

次世代バイオ燃料（バイオジェット燃料） 分野の技術戦略策定に向けて

2020年7月

| | |
|----------------------------------|----|
| 1 章 次世代バイオ燃料技術の概要 | 2 |
| 1-1 次世代バイオ燃料の製造プロセス概要 | 4 |
| 1-2 次世代バイオ燃料の製造プロセスと要素技術 | 6 |
| 2 章 次世代バイオ燃料の置かれた状況 | 8 |
| 2-1 背景と重点分野 | 8 |
| 2-2 バイオジェット燃料をめぐる動向 | 13 |
| 3 章 次世代バイオ燃料分野の技術課題 | 22 |
| 3-1 次世代バイオ燃料の製造プロセスの課題 | 22 |
| 3-2 まとめ | 25 |
| 4 章 おわりに | 27 |

TSCとはTechnology Strategy Center（技術戦略研究センター）の略称です。

1章 次世代バイオ燃料技術の概要

バイオマスは、再生可能なエネルギー資源として利用することが可能であるとともに、燃焼時に二酸化炭素（CO₂）を排出するが、等量のCO₂を成長時に吸収していることから、利用時のCO₂排出量をゼロとみなすことができるため、低炭素なエネルギー資源^{*1}として、導入が進められてきている。

バイオマスは多種多様であり、その成分や賦存量も様々である。また、バイオマスは、熱、電気、液体燃料、その他製品など様々な形に変換可能である。中でも、液体燃料は、図1のとおり、バイオエネルギーに位置付けられ、運輸部門のCO₂削減への寄与に期待されていると

同時に、バイオリファイナリーにも位置付けられることから、液体燃料製造時の副産物（高付加価値製品）や、あるいは高付加価値品を主要品とし、同時に輸送用液体燃料を製造することも可能である。したがって、多様な原材料を使って、多様な製品を製造することが可能となる。

本レポートは、このような液体燃料、即ちバイオ燃料を対象とし、TSC Foresight Vol.21「次世代バイオ燃料技術分野の技術戦略策定に向けて」に続くレポートである。本レポートVol.37は、Vol.21がバイオ燃料の製造プロセス及びその要素技術の実態と課題を解説したのに対し、バイオ燃料を社会に実装することを前提として重点的に取り組む製造プロセスを示した。したがって、技術的な検討の他に、多様なバイオマス原材料の収集の可能性やその市場性を考慮しつつ、日本のプレーヤーによる社会実装の可能性が高い製造プロセスの技術課題を提示している。

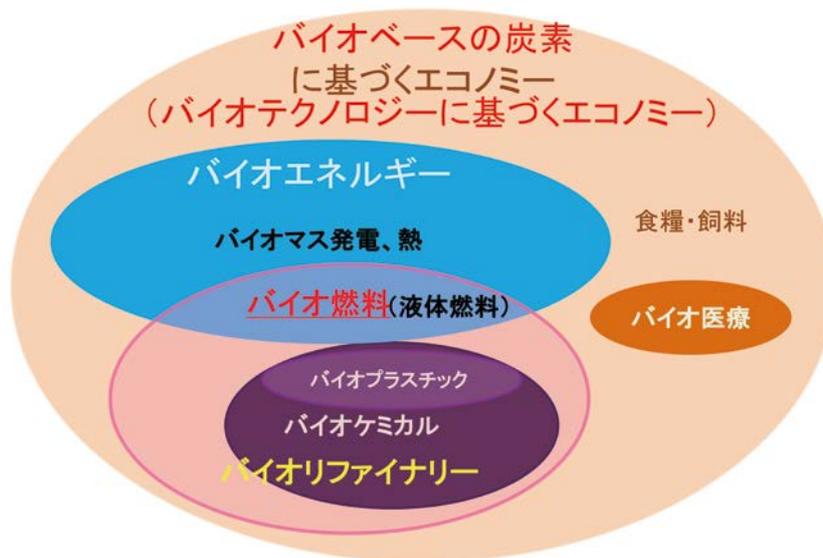


図1 バイオベースの炭素に基づくエコノミー
出所：NEDO 技術戦略研究センター作成（2018）

^{*1} ただし、バイオマスを加工、変換、運搬する過程で必要な追加のエネルギー投入に伴いCO₂が排出されることから、これらの排出量が、既存の化石燃料と比較して優位でなければ、低炭素なエネルギーとはならない点に留意する必要がある。この点は、製造プロセスがほぼ一定である太陽光発電や風力発電と異なる点であり、バイオマス利用技術の場合、プロセス毎にそのエネルギー収支及びCO₂削減効果を検証する必要がある。

次世代バイオ燃料（バイオジェット燃料）分野の技術戦略策定に向けて

なお、バイオ燃料には、第1世代と呼ばれるバイオエタノール（特に砂糖やデンプンなどを原料としたもの）や脂肪酸メチルエステル（FAME：Fatty Acid Methyl Ester）、及び第2世代と呼ばれるバイオマスの非可食部を原料としたバイオエタノールがあるが、Vol.21及び本レポートVol.37でとりあげるバイオ燃料は、既存のインフラ設備とより親和性の高い酸素を含まない炭化水素

系燃料で、バイオジェット燃料や水素化植物油（HVO：Hydrotreated Vegetable Oil）の対象となるバイオマス由来の燃料を次世代バイオ燃料と定義している（表1）。第1世代バイオ燃料及び第2世代バイオ燃料を検討の対象としなかったのは、第1世代、第2世代ともガソリン代替及び軽油代替燃料として既に商用化段階にあり、世界各国で導入が進められているからである。

表1 次世代バイオ燃料の定義

| 区分 | 食料との競合の観点から見た社会受容性 | ガソリン・軽油の代替 | ジェット燃料の代替 | 国内外の開発動向 |
|------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------|----------|
| 第1世代バイオ燃料 （可食部由来バイオエタノール/ディーゼル） | × | ○ （混入比率 ^注 に制限有り） | × | 商用化 |
| 第2世代バイオ燃料 （セルロース系バイオエタノール等） | ○ | ○ （混入比率 ^注 に制限有り） | × | R&D～実証 |
| 次世代バイオ燃料 （炭化水素系バイオ燃料） | ○ （食料と競合しない原料の選択が必要） | ○ （混入比率 ^注 の制限を克服可能） | ○ | R&D |

注）既存インフラ設備（自動車を含む）を利用する場合の化石燃料由来の燃料へのバイオ燃料の混合比率

出所：NEDO技術戦略研究センター作成（2017）

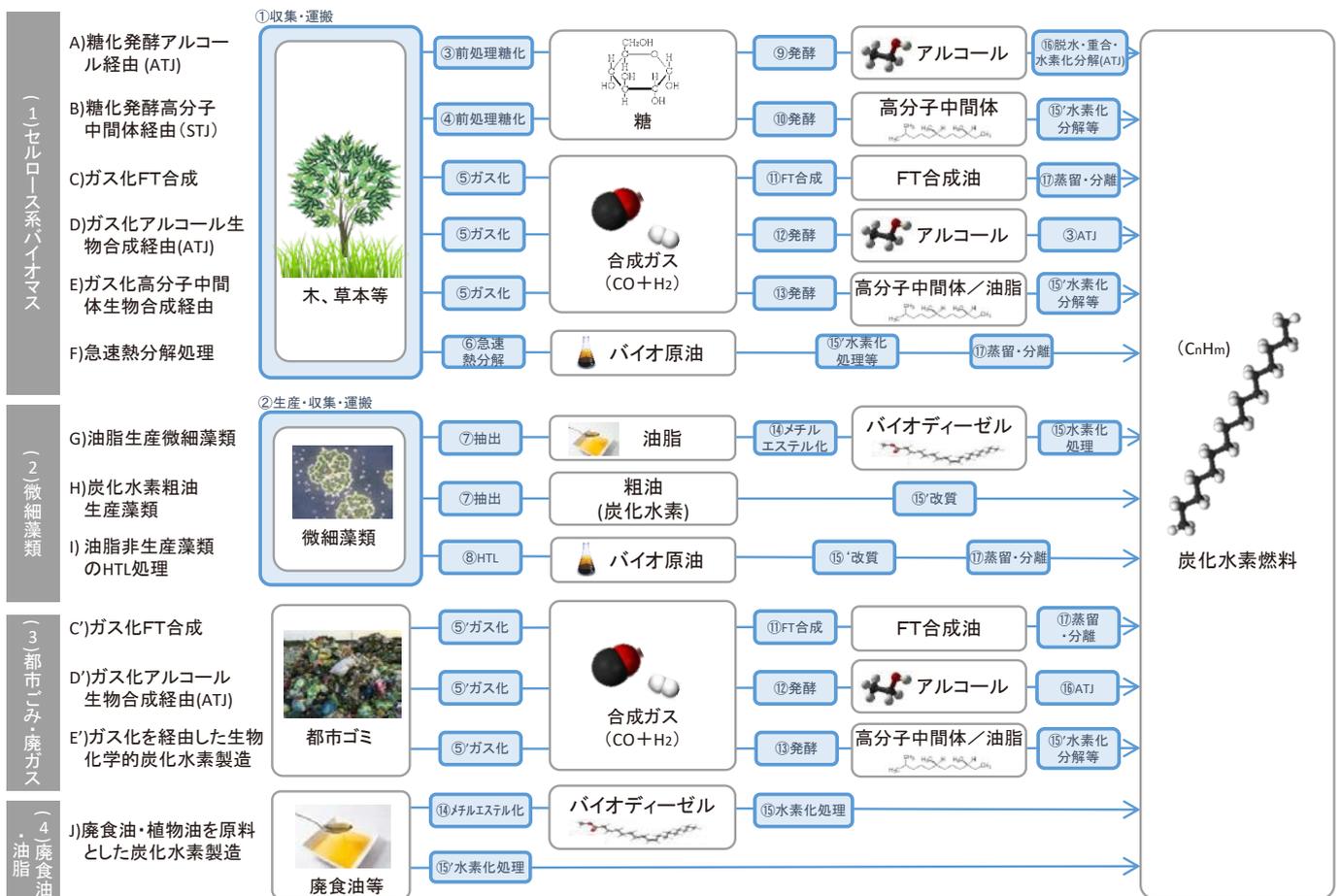
次世代バイオ燃料（バイオジェット燃料）分野の技術戦略策定に向けて

1-1 次世代バイオ燃料の製造プロセス概要

次世代バイオ燃料は、様々な原料と燃料製造プロセスの組合せによって製造される。まず、図2の(1)～(4)の原材料別の製造プロセスの概要を記す。

(1) セルロース系バイオマス为原料とした次世代バイオ燃料製造プロセス

本製造プロセスは、木質、草本等のセルロース系バイオマスを原料とし、主に糖化発酵を経由するプロセス（図2のAとB）と合成ガス（水素、一酸化炭素等の混合ガス）を経由するプロセス※2（図2のC～E）、及び急速熱分解を用いてバイオ原油にした上で、これを精製するプロセス（図2のF）の3種類が存在する。



(注) ⑤'ガス化は廃棄物を対象としている点で⑤ガス化と差別化している

⑮'水素化処理等は、⑮バイオディーゼル (FAME) を対象としている水素化処理と差別化している

図2 様々なバイオマス原材料からの次世代バイオ燃料の製造プロセスの一覧

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2017)

※2 ガス化を経由するプロセスはBTL (Biomass to Liquid) と呼ばれることもある。

次世代バイオ燃料（バイオジェット燃料）分野の技術戦略策定に向けて

糖化発酵を経由するプロセスについては、主にアルコールを経由するプロセス（ATJ：Alcohol to Jet）と高分子中間体（ファルネセン等）を経由するプロセス（STJ：Sugar to Jet等）に分けられ、合成ガスを経由するものは、FT^{※3}合成（熱化学的変換技術）を利用するものと、微生物合成（生物化学的変換技術）を利用するものに分けられる。

（2）微細藻類を原料とした

次世代バイオ燃料製造プロセス

微細藻類を利用することの主なメリットは、単位面積当たりの油脂等の生産量を他の油脂生産植物（大豆等）より高めることができる可能性があることである（表2）。この高い生産性から、各国でその有効利用に向けた取組が進められている。

表2 各種油脂生産作物と微細藻類の油脂収量の比較

| 作物 | 油脂収量 (L/ha/年) |
|--------|----------------|
| 大豆 | 450 |
| カメリナ | 560 |
| ひまわり | 955 |
| ジャトロファ | 1,890 |
| パーム | 5,940 |
| 微細藻類 | 3,800 – 50,800 |

出所：Drzins, A. Pienkos, P. and Edye, L. (2010) . Current Status and Potential for Algal Biofuels Production (IEA-task39, 2010) を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2017)

微細藻類を原料とした製造方法には、主に微細藻類に代謝させた油脂や炭化水素を抽出して精製する方法と、微細藻類自体を有機物として水熱液化処理（HTL：Hydrothermal Liquefaction）^{※4}によりバイオ原油を製造し、これを精製する方法がある。なお、従属栄養型の微細藻類を用いた油脂製造プロセスも存在するが、これらについては（1）に分類した。

（3）都市ごみまたは排ガスを原料とした次世代バイオ燃料製造プロセス

本製造プロセスは、セルロース系バイオマスを原料として合成ガス（水素、一酸化炭素等の混合ガス）を経由したプロセスと同じであるが、都市ごみを原料としていることから、合成ガスの組成等が異なる。また、製鉄所からは水素や一酸化炭素の合成ガスが副生成物として発生しており、これらを基に熱化学的／生物化学的手法を用いてアルコールや炭化水素を合成するプロセスも存在する。

（4）油脂（廃食油・植物油）を原料とした次世代バイオ燃料製造プロセス

本製造プロセスは、廃食油や植物油等の油脂を原料とし、メチルエステル化処理を行いバイオディーゼルを製造し、これを水素化処理して炭化水素燃料を製造するプロセスである。メチルエステル化処理は、バイオディーゼル製造のための要素技術として商用段階の技術であり、かつ、水素化処理技術も一般的な石油精製技術であるため、本プロセスは技術的には成熟した変換技術である。なお、バイオディーゼルの経路せずに水素化処理等を行い、炭化水素燃料化する手法も存在する^{※5}。

※3 Fischer-Tropsch

※4 バイオマスを高温高压の熱水中で熱分解させ、バイオ原油を得る技術である。水熱状態は温度の違いで生成物が異なり、200～300℃でバイオマスが液化される。

※5 米国 Chevron と ARA が共同開発した Biofuels ISOCONVERSION Process 技術等。

1 -2 次世代バイオ燃料の製造プロセスと要素技術

次世代バイオ燃料は、原料種別に対応する要素技術を組み合わせて製造される。以下に製造プロセスの各種製造方法を整理した。

(1) セルロース系バイオマスを原料とした

次世代バイオ燃料製造プロセス

A) 糖化発酵アルコール経由次世代バイオ燃料製造プロセス (ATJ)

本製造プロセスでは、糖化発酵によりエタノールやブタノールを生産し、それをエチレン等に転換、重合させ、炭化水素燃料を製造する。糖化発酵技術自体は現在実用化しつつある技術であり、その利用が可能である。その後の炭化水素燃料への変換技術（エタノールからエチレンへの転換及びエチレンの低重合）は、既存の化学工業で実用化している技術の適用が可能である。

B) 糖化発酵高分子中間体経由次世代バイオ燃料製造プロセス (STJ)

本製造プロセスでは、糖化発酵により高分子中間体（ファルネセン等）を生産し、水素化分解等の処理を経て炭化水素燃料を製造する。

C) ガス化FT合成による次世代バイオ燃料製造プロセス

本製造プロセスでは、ガス化炉を用いてバイオマスをガス化し、それをFT合成することで炭化水素燃料を製造する。FT合成技術は石炭や天然ガスからの液体燃料製造のための要素技術（CTL: Coal to Liquid、GTL:

Gas to Liquid)として既に実用化しているが、非常に大規模な設備を想定した技術のため^{*6}、バイオマスの規模感に合わせた設備は実用化されていない。FT合成は化学触媒を用いた反応のため、高速かつ安定的に燃料を製造できる反面、炭素数の異なる炭化水素の混合物としてFT合成油が製造されるため、単一の燃料（例えばジェット燃料のみ）の収率は低い。

D) ガス化アルコール生物合成経路による次世代バイオ燃料製造プロセス

本製造プロセスでは、ガス化炉で製造した合成ガスを発酵槽に投入し、微生物を使ってこれをアルコール等に代謝させる。FT合成に比べ、比較的高い選択性で、目標とする生成物（アルコール）を生成でき収率を上げられるといったメリットがある。その後のアルコールから炭化水素燃料を製造するプロセスは、前述A)のATJプロセスと同様である。

E) ガス化高分子中間体／油脂生物合成経路次世代バイオ燃料製造プロセス

本製造プロセスでは、ガス化炉で製造したガスを基に微生物を使って高分子中間体あるいは油脂を生産し、水素化分解等の処理を経て炭化水素燃料を製造する。本プロセスの技術シーズは現時点では少ないが、油脂を生産する技術シーズは国内に出てきており、東大発ベンチャーCO₂資源化研究所がUCDI水素菌を使ってCO₂から油脂を製造する技術を開発している^{*7}。

F) 急速熱分解処理による次世代バイオ燃料製造プロセス

本製造プロセスでは、高温高压の急速な熱分解処理によりバイオ原油を生産し、更に水素化処理を施すことで炭化水素燃料を製造する。高温高压に耐えうる設備の運用管理が課題であるとともに、急速熱分解処理によって様々な成分（炭素数）を含むバイオ原油となるため、単一の燃料の収率は低い。

*6 例えば2007年稼働のQatar Petroleum、Sasol、ChevronらのGTLプラントは、32,400BPD (barrel per day) (5,151kL/日)、2011年稼働のQatar PetroleumとShell OilによるGTLプラントは、70,000BPD (11,129kL/日)と、バイオ燃料プラント(数万kL/年)と比べて数十倍～百倍程度の大きさである。(出所: 2013年度JPECレポート「世界のGTLプロジェクトの最新状況」)

*7 CO₂資源化研究所Webサイト
https://www.co2.co.jp/pdf/20190227_UCDI_release.pdf

次世代バイオ燃料（バイオジェット燃料）分野の技術戦略策定に向けて

(2) 微細藻類を原料とした次世代バイオ燃料製造プロセス

G) 油脂生産微細藻類を用いた次世代バイオ燃料製造プロセス

本製造プロセスは油脂を代謝する微細藻類を生産し、そこから油脂を取り出し精製するもので、油脂を取り出した後の処理は後述の(4)で紹介する廃食油・油脂を原料とした炭化水素燃料の製造方法と同様である。油脂から炭化水素燃料に変換する方法には、中間生成物としてのバイオディーゼルを経由する方法のほか、水素化処理等によって直接炭化水素燃料に変換する方法などがある。

H) 炭化水素粗油生産藻類を用いた次世代バイオ燃料製造プロセス

本製造プロセスは炭化水素を代謝する微細藻類を生産し、そこから炭化水素を取り出し精製するもので、ボトリオコッカス・ブラウニーなどの藻類を用いたものがこれに当たる。直接炭化水素を生産するため、炭化水素に変換するまでのメチルエステル化や水素化処理等を省略できるメリットがある。

I) 油脂非生産藻類のHTL処理による次世代バイオ燃料製造プロセス

本製造プロセスでは、高成長の微細藻類を、油脂等を代謝させずに生産し、それをHTL処理することでバイオ原油を製造、これを精製して炭化水素燃料を製造すると

いうものである。HTL技術自体は古くから存在している技術であり、水分を多く含むバイオマスを乾燥させずにそのまま高温高压で処理することで、バイオ原油（様々な化合物が混合された可燃物質）を製造することが可能である。

(3) 都市ごみまたは排ガスを原料とした合成ガス経由次世代バイオ燃料製造プロセス

都市ごみ等の廃棄物から、セルロース系バイオマスを原料とした次世代バイオ燃料製造と同じガス化FT合成プロセスを経由し炭化水素燃料を製造する技術である（合成ガスの組成や原料の性状等が異なる）。また、製鉄所からは水素や一酸化炭素の合成ガスが副生成物として発生しており、これらを基に熱化学的／生物化学的手法を用いてアルコールや炭化水素を合成するプロセスも存在する。

(4) 油脂（廃食油・植物油）を原料とした次世代バイオ燃料製造プロセス

本製造プロセスでは、油脂（廃食油・植物油）を原料とし、メチルエステル化処理を行うことでバイオディーゼルを製造する。これを改質（水素化処理）することで、炭化水素燃料を製造する。メチルエステル化処理は、商用段階にある技術である。また、水素化処理技術も一般的な石油精製技術であるため、本プロセスは成熟した技術である。

次世代バイオ燃料（バイオジェット燃料）分野の技術戦略策定に向けて

2章

次世代バイオ燃料の置かれた状況

次世代バイオ燃料技術分野に取り組む意義や、重点分野について検討する。更に、市場性や技術の論文分析結果を提示する。

2-1 背景と重点分野

2-1-1 背景と重点分野

今日、世界のCO₂排出量のうち運輸部門のCO₂排出量は24%と発電等の41%に次いで多い（図3）。更に

運輸部門のエネルギーCO₂排出量の2014年の実績と2030年及び2050年の予測値の種別内訳をみると、普通乗用車（煉瓦色）が約5割を占め最も多く、重量車（黄緑）が約3割、航空機（濃い青）と船舶（水色）が1割程度である。（図4）。したがって、運輸部門のそれぞれの種別におけるCO₂排出量削減の取組はCO₂排出量全体に大きく貢献することができる。

ただし、航空機や船舶、普通乗用車、重量車のうち、普通乗用車は電動化が進むことが予測されるため、バイオ燃料が必要とされるのは、航空機や船舶、重量車であるとして、この3つの種別における次世代バイオ燃料の導入の可能性を探った。

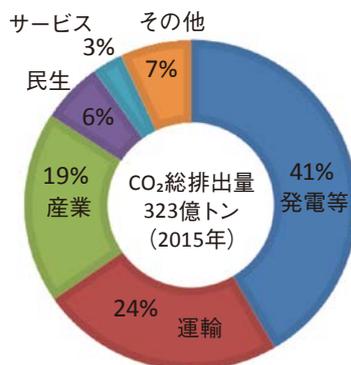


図3 世界のセクター別CO₂排出量

出所：CO₂ Emissions From Fuel Combustion (IEA, 2017)

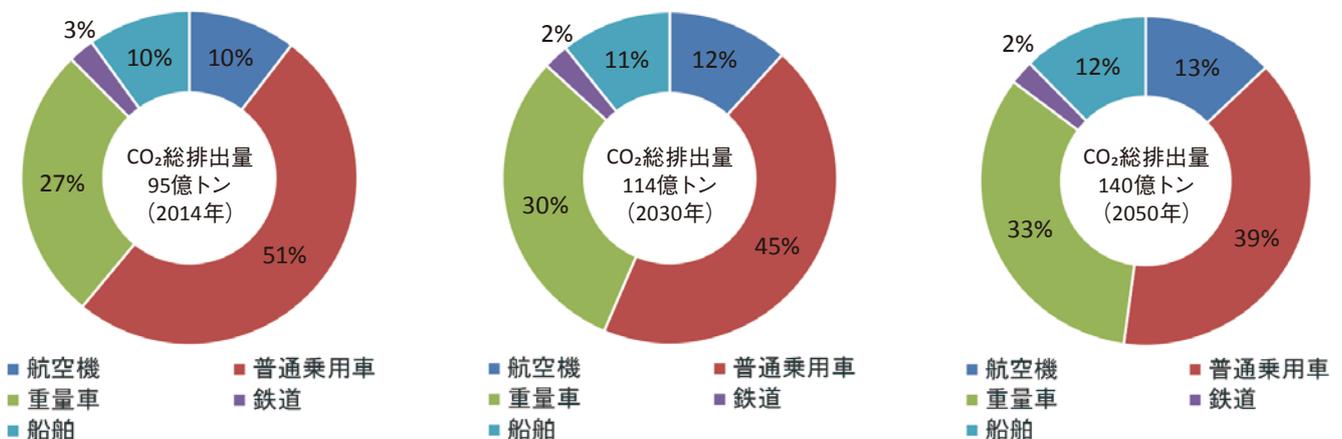


図4 世界の運輸部門のCO₂排出量の種別内訳 (2014年、2030年、2050年)

出所：Energy Technology Perspective (IEA, 2017)

次世代バイオ燃料（バイオジェット燃料）分野の技術戦略策定に向けて

2-1-2 運輸部門におけるCO₂排出削減目標

(1) 航空業界

航空業界では、2020年以降の地球温暖化対策の国際的枠組みを定めたパリ協定を受けて、国際線について、国連の下部組織である国際民間航空機関（ICAO：International Civil Aviation Organization）や、国際民間航空の団体である国際航空運送協会（IATA：International Aviation Transport Association）が、CO₂排出削減のための目標や対策を発表している^{※8}。IATAは2050年にCO₂を2005年（4億トン^{※9}）比で50%削減する目標を掲げている。

その具体的な対策としては、機体の軽量化や運航管理の効率化などがあげられるが、抜本的な削減対策として、ICAOは国際線分野の市場メカニズムを活用した世界的な温室効果ガス排出削減制度（CORSIA：Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation）を設定した。この制度は、航空機用バイオ燃料（以下、バイオジェット燃料）導入及びクレジット購入によるCO₂排出削減策として、2021年から自主規制、2027年から義務化される予定である^{※10}。

日本を含めた欧米先進国の民間航空会社は、2021年からこの制度に参加する。バイオジェット燃料を混合する上限は設定されているが、初期段階は、少量の混合であってクレジット購入は免除されることから、民間航空会社はバイオジェット燃料搭載を進める方針である。先進諸国の国際線空港拠点もまた、民間航空会社の利用が促進されるように、バイオジェット燃料の供給体制構築に積極的姿勢を示している^{※11}。

※8 IATA Webサイト

<https://www.iata.org/en/programs/environment/climate-change/>

※9 CO₂ EMISSIONS FROM FUEL COMBUSTION Highlights (2011 Edition)

※10 “Introduction of CORSIA”. 2018. p.8. (COP24資料)

<https://www.nordicenergy.org/wp-content/uploads/2018/12/2.-Katowice-IATA.pdf>

※11 “Introduction of CORSIA”. 2018. p.9. (COP24資料)

<https://www.nordicenergy.org/wp-content/uploads/2018/12/2.-Katowice-IATA.pdf>

(2) 船舶業界

船舶業界は、2018年4月に、国際海事協会（IMO：International Maritime Organization）が短期中期目標^{※12}を提示した。

短期目標は、2030年までに2008年比で40%の効率改善を目標とする。その対策として、新しく液化天然ガス（LNG：liquefied natural gas）船舶を導入していく。

中期目標は、2050年までに2008年比で70%の効率改善を目標とし、CO₂排出総量の削減を2008年（6億トン^{※13}）比で50%削減とする。長期的にはゼロエミッションを目標としている。

このIMOの短期中期目標発表後、IMO、国土交通省、日本海事協会それぞれがロードマップの検討を開始している。

(3) 重量車

大型バスやトラックなどの重量車のCO₂排出削減目標とその対策については、国ごとの取組となる。日本では、資源エネルギー庁の自動車新時代戦略会議の中間整理（2019年8月31日）の中で、重量車からのCO₂排出量が国内の自動車全体のCO₂排出量の約38%を占めることから、バスやトラックを含む商用車の領域において、2050年CO₂排出量8割削減を目指すとしている^{※14}。

2-1-3 CO₂排出削減手段の検討

航空業界、船舶業界、重量車それぞれのCO₂排出削減手段を検討し、次世代バイオ燃料導入が期待される業界について評価した。その検討のプロセスと結果を以下に提示する。

※12 国際海事協会 Webサイト

https://unfccc.int/sites/default/files/resource/250_IMO%20submission_Talanoa%20Dialogue_April%202018.pdf

※13 CO₂ EMISSIONS FROM FUEL COMBUSTION Highlights (2011 Edition)

※14 経済産業省 Webサイト

<https://www.meti.go.jp/press/2018/08/20180831007/20180831007-3.pdf>

次世代バイオ燃料（バイオジェット燃料）分野の技術戦略策定に向けて

(1) 航空業界

航空業界では、バイオジェット燃料の他に、航空機の電動化や、バイオマス由来ではない再生可能エネルギーによる電気から生産される燃料（Power to Jet）や、太陽エネルギーから生産される燃料（Solar to Jet）も、CO₂排出量削減を実現する技術として研究開発が進められている^{※15}。

Power to Jetについては実証段階と位置付けられているが、電気エネルギーから化学エネルギーへの変換効率が50%と電気エネルギーから水素にしてその水素を直接利用することに比べて非効率であることや、コストが高いことが課題とされている^{※16※17}。Solar to Jetの研究開発はEU FP7（Framework Program 7）のプロジェクトとして2011年から2015年に実施された^{※18}。しかし未だ実験室レベルの成果に留まっている。このように、Power to JetやSolar to Jetの商用化の見通しは未だたっていないことから、CO₂排出削減に貢献する技術とし

て、バイオジェット燃料への期待が高まっている。

電動化の可能性を確認するために、液体燃料の重量別エネルギー容量と、蓄電池（現在及び2030年頃）の重量別エネルギー容量とを比較した（図7）。青い点線が、現在の航空機の液体燃料の重量別エネルギー容量を示している。これに対し、黄色の部分現在の蓄電池の可能容量で、ピンク色の部分が2030年頃の蓄電池の可能容量である。2030年頃の蓄電池でも、現在の液体燃料のエネルギー容量には及ばない。2030年頃の蓄電池（NEDO蓄電池ロードマップ2013）を搭載した場合の航続距離は、大型ジェット旅客機は2,000km、小型機で160km、ヘリコプターで80kmとなり、小型機の国内短距離飛行やヘリコプターの飛行の電動化は可能であるが、大型ジェット旅客機の長距離飛行に関しては電動化が難しく、液体燃料、CO₂排出削減のためにはバイオジェット燃料が必要である。

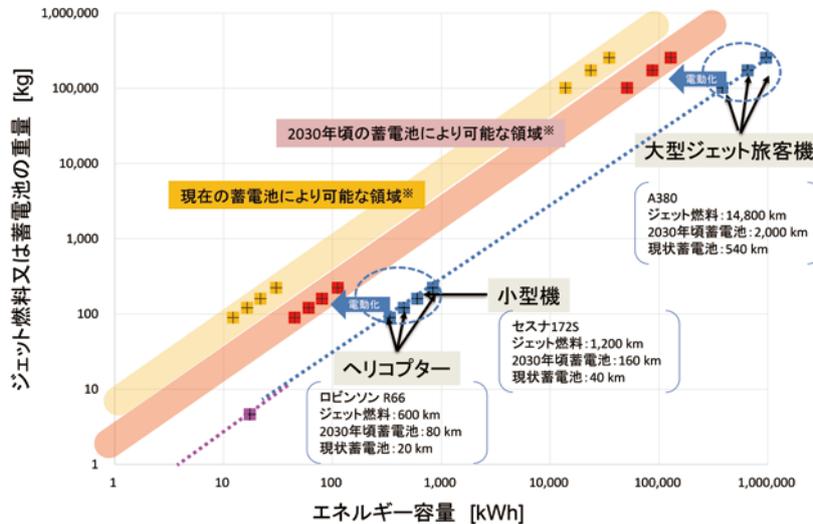


図7 航空機の液体燃料と蓄電池の比較^{※19}

出所：NEDO技術戦略研究センター作成（2018）

※15 IATA Webサイト

<https://www.iata.org/contentassets/462587e388e749eeb040df4dfdf02cb1/2015-report-alternative-fuels.pdf>

※16 Transport and Environment Web サイト

https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/Power-to-Liquids%2C%20Potential%20and%20Perspectives_Dr.%20Harry%20Lehmann.pdf

※17 Transport and Environment Web サイト

https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/Alternative%20aviation%20fuels%2C%20Flightpath%20to%202050_Dr.%20Chris%20Malins.pdf

※18 CORDIS Web サイト

<https://cordis.europa.eu/project/id/285098>

※19 電動航空機ではジェット燃料よりもエネルギー密度が低い蓄電池を搭載するため、搭載可能重量が制限される。燃料重量をすべて蓄電池に置換えた場合（Full electric）、大型ジェット旅客機、小型機等の航続距離は1/20以下となる。

次世代バイオ燃料（バイオジェット燃料）分野の技術戦略策定に向けて

(2) 船舶業界

船舶のCO₂排出量削減手段としては、バイオ燃料に加え、LNG船舶の導入や再生可能エネルギーによる電気から製造されるメタンやメタノール、アンモニア等の燃料が挙げられる。

船舶業界では、2030年までは天然ガスによるLNG船舶を導入し、2030年以降は、再生可能エネルギーによる電気から製造されるメタンやメタノール、アンモニアを燃料とすることが計画されている。また、短距離船については、電動化も進められる予定である。

バイオ燃料については、欧米では、軍隊やHeineken Netherlandsなどが船舶への導入を推進している。しかし日本では、大型の外航船の燃料は、低価格なシンガポール等海外で調達するのが慣例となっており、バイオ燃料価格が現行価格と競合できるような低価格を実現する

必要がある。

船舶についても、液体燃料と蓄電池の重量別エネルギー容量の比較を行った（図8）。緑とピンクの点線は、現在の船舶の液体燃料の重量別エネルギー容量を示している。これに対し、黄色の部分に現在の蓄電池の可能容量で、ピンク色の部分が2030年頃の蓄電池の可能容量である。2030年頃の蓄電池でも、現在の液体燃料のエネルギー容量には及ばないことが分かる。

また、重油を同じ重量の現在の蓄電池に置き換えた場合、大型船舶の航続距離は1/25以下となる。同様に、2030年頃の蓄電池に置き換えた場合、大型船舶の航続距離は現在の約40,000kmであるのに対し、2030年頃の蓄電池での航続距離は約5,000kmとなる。それゆえ、2030年頃においても、長距離の運航には引き続き液体燃料が必要である。

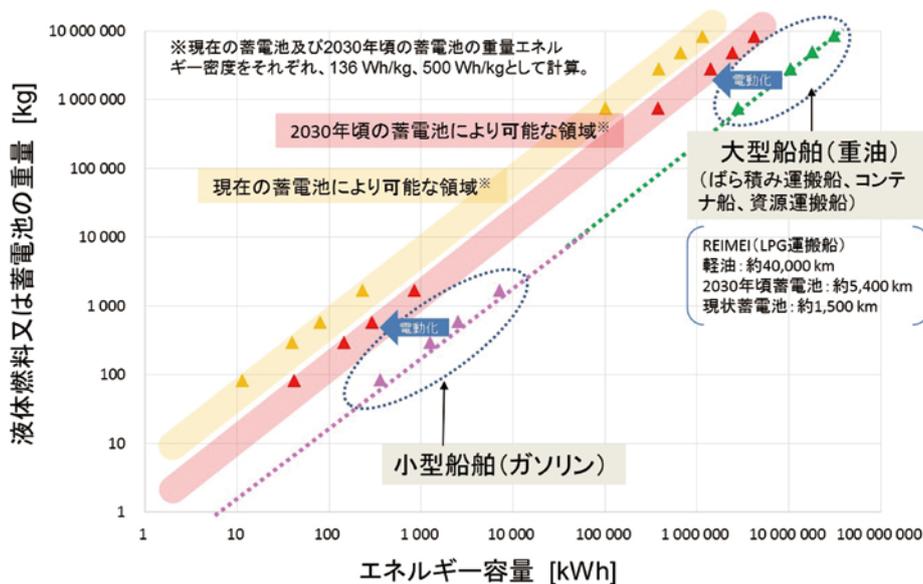


図8 船舶の液体燃料と蓄電池の比較

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成（2018）

次世代バイオ燃料（バイオジェット燃料）分野の技術戦略策定に向けて

(3) 重量車

重量車のCO₂排出量削減手段としては、バイオディーゼルや蓄電池、燃料電池の導入が挙げられる。

重量車については、大型のバスやトラックへのバイオディーゼルの導入が期待される。重量車についても、液体燃料と蓄電池の重量別エネルギー容量の比較を行った(図9)。図9の緑の領域が内燃機関エンジン(ICE: internal-combustion engine)のバス・トラックの可能領域で、黄色の領域がバス・トラックの蓄電池の領域を示している。2030年頃の蓄電池であっても、ICEバス・トラッ

クの可能領域に及ばない。また、蓄電池を大量に積載する場合、車両総重量が増加し、燃費は低下する。航続距離が長い長距離バスや大型トラックには、液体燃料を使用することが必要である。

他方、燃料電池車(FCEV: fuel cell electric vehicle)については、現在のFCEVもICEバス・トラックの可能領域に達していることから、重量車のCO₂排出削減手段として有望である。したがって、重量車のCO₂排出削減手段として、バイオ燃料とFCEVが候補になる。

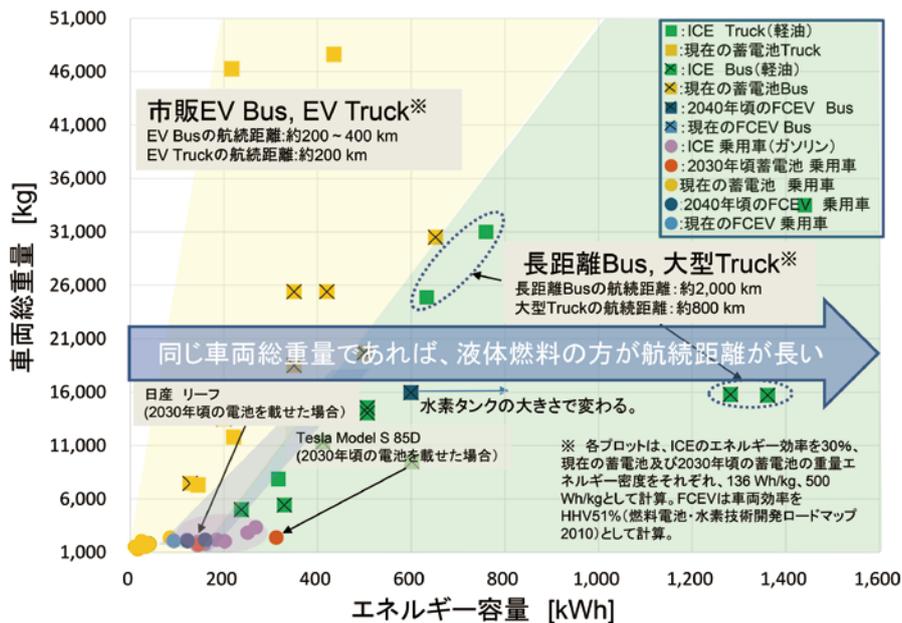


図9 重量車の液体燃料(ICE)、蓄電池、燃料電池(FCEV)技術比較

出所: NEDO 技術戦略研究センター作成 (2018)

2-1-4 まとめ

運輸部門におけるCO₂排出削減対策として、航空業界、船舶業界、重量車におけるCO₂排出削減の目標や政策、及び実現手段について前述のとおり検討した。この3つの業界の中で、航空業界は、CO₂排出削減目標とその規制を明確に表明している。加えて、実現手段としても、次世代バイオ燃料導入の優先度が高い。

これに対し、船舶業界はLNG船舶の導入や、長期的にはメタンやメタノール、アンモニアの導入が計画されており、次世代バイオ燃料の優先度はそれらに比べて低い。重量車、特に長距離トラックやバスについては、CO₂排出削減の実現には、バイオディーゼルを利用するか、あるいは燃料電池車にするかの選択となる。当面重量車にはバイオディーゼルがCO₂排出削減のために利用されるが、2030年以降は、燃料電池車のインフラが整備されない地域での利用が続くものの、国内では、重量車用バイオディーゼル市場の拡大の可能性は低い。

以上から、運輸部門において、CO₂排出削減のための手段として次世代バイオ燃料が有望な業界は航空業界であると位置づけられる。

2-2 バイオジェット燃料をめぐる動向

次世代バイオ燃料の市場導入の優先度が高い航空業界における次世代バイオ燃料、バイオジェット燃料に焦点を当て、その市場規模や認証制度の動向、国内外の技術動向、特許論文動向分析について解説する。

バイオジェット燃料の市場規模
2-2-1（国内、海外）・予測

前述のとおり、IATAは2050年時点で航空業界のCO₂排出量半減を目標として掲げており、2009年から2020年の間に、平均年1.5%の燃料効率改善を行うことや、2020年までに航空業界の実質CO₂排出量の上限を設定し、炭素中立成長を実現することなどを盛り込んだ自主目標を設定している。更に、2015年にフランス・パリで開催された気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）を受けて、ICAOは、CO₂削減のための機体改善の義務化に係る文書「ICAO CO₂ standard for aircraft^{※20}」を発表^{※21}するなど、航空業界におけるCO₂排出量削減の圧力は高まりつつある。

今後2050年に向けて国際線旅客量の増加とCO₂排出量の半減（図10）を両立させるためには、運用改善や燃費向上のみの対策では、CO₂排出削減量目標の達成は困難であるとともに、電動化など革新的な機体改善の実現は不確実であることから、バイオ燃料の開発と普及は、この目標達成に不可欠である。

国際再生可能エネルギー機関（IRENA:International Renewable Energy Agency）は、2050年のバイオジェット燃料必要量を既存のジェット燃料の半分量に相当する

※20 ICAO Webサイト

<https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/CO2%20Metric%20System%20-%20Information%20Sheet.pdf>

※21 ICAO Webサイト

<https://www.icao.int/Newsroom/NewsDoc2017/COM.05.17.EN.pdf>

次世代バイオ燃料（バイオジェット燃料）分野の技術戦略策定に向けて

5億4,000万 kLを最大量と見積もっている^{※22}。したがって、この最大量を基に試算すると、2050年の世界のバイオジェット燃料市場は、最大で65兆円^{※23}市場となる。

他方、国内で消費されるジェット燃料（国内線及び国内で給油する国際線でのジェット燃料消費量）は、2019

年の消費量、730万 kLから2050年には1,300万 kLの消費量になる^{※24}。この消費量の半分をバイオジェット燃料に代替すると仮定すると、650万 kLをバイオジェット燃料で消費することになり、その市場規模は、7,800億円市場となる。

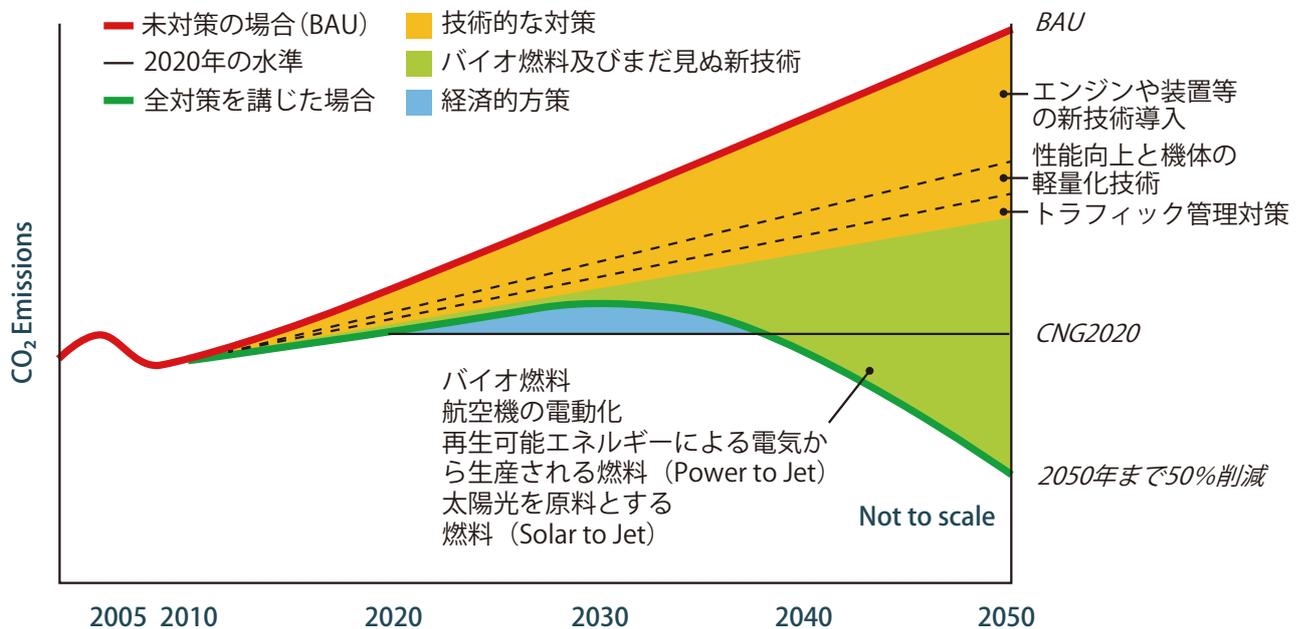


図10 航空機業界におけるCO₂排出削減ロードマップ

出所：IATA technology roadmap 2013 (IATA, 2013) を基に NEDO 技術戦略研究センターで作成 (2019)

※22 IRENA Biofuels for aviation Technology brief (2017)

※23 1Lを120円として試算。

※24 国土交通省「航空輸送統計速報（令和元年（2019年）分）」<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001333684.pdf>を基に NEDO 技術戦略研究センターが行った試算。

次世代バイオ燃料（バイオジェット燃料）分野の技術戦略策定に向けて

2-2-2 認証制度の動向

バイオジェット燃料が航空機に搭載されるためには、代替航空燃料の認証制度である ASTM International D7566 で既に認証されている変換プロセスに該当する必要がある。既に認証されているプロセスであれば、新たに申請して認証を取得する必要はないが、未だ認証されていない場合には新しいプロセスとして認証される手続きが必要になる。新たに認証を取得する場合、その評価に2年以上の期間がかかることから、商用化は数年先となる。国内外で商用化、あるいは商用化にあと一步にあるバイオジェット燃料は、この ASTM International D7566 に認証されているプロセスによる燃料がほとんどである。

ASTM International D7566 は、既に6つの変換プロセスが認証されている（表3）。この認証制度はバイオ

ジェットを含む代替航空燃料を対象としており、バイオマス以外からの変換であっても認証されているプロセスであれば航空機に搭載可能な燃料として認められる。例えば石炭や天然ガス、再生可能エネルギー由来の電気から生成される合成ガスを用いた FT 合成であっても認められる。

これまでの申請企業の多くは海外企業である。日本企業としては唯一 IHI が、微細藻類による炭化水素粗油を ASTM International に申請し認証を取得している※25。

なお、バイオマス由来の粗油を既存の石油精製設備に混合しバイオジェット燃料とする Co-Processing プロセスも申請され、油脂を最大5%混合する Co-Processing は、ASTM D1655 ANNEX1 として認証されている。ガス化 FT 合成製造プロセスの粗油の Co-Processing が申請され評価途上にある※26。

表3 代替航空燃料認証制度 ASTM International D7566 認証状況

| 認証済No. | 変換プロセス | 概要 | 申請企業 |
|---------------------------------|--|---|---|
| ANNEX1 C) C')※ | Fischer Tropsch(FT) | 2009年9月 GTL(Gas to Liquid)50%混合が承認された | SASOL(南アフリカ)、 Rentech(米) |
| ANNEX2 (海外では 商用化段階) J) | Hydroprocessed esters fatty acids (HEFA) | 2011年7月 Bio-SPK(Bio Synthetic Paraffin Kerosene)50%混合が承認された | Chevron(米)、BP(英)、 Phillips 66(米) |
| ANNEX3 B) E) | Synthetic Iso- paraffin (direct sugar) (SIP) | 2014年6月 10%混合が承認された | AMYRIS(米)、TOTAL (仏) |
| ANNEX4 C) C') | Synthesized paraffinic kerosine plus aromatics (SPK/A) | 2015年11月 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 | SASOL(南アフリカ)、 Rentech(米) |
| ANNEX5 A) D) D') | Alcohol to Jet (ATJ) | 2016年1月ブタノールto JET 30%混合が承認された 2018年4月 エタノールto JET 50%混合が承認された | GEVO(米) LanzaTech(米) |
| ANNEX6 J) | Catalytic hydrothermolysis jet (CHJ) | 2020年1月 50%混合が承認された | Chevron Lummus Global & Applied Research Associates (ARA)(米) |
| ANNEX7 H) | HydroCarbon- Hydroprocessed Esters Fatty Acids (HC-HEFA SPK) | 2020年5月バイオ由来炭化水素の 水素化処理により精製される合成 パラフィンケロシン10%混合が承認 された | IHI(日) |

※該当する図2の製造プロセス

出所：各種資料を基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2020）

※25 NEDO Web サイト

https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101314.html

※26 Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative (CAAFI) Web サイト

http://www.caaafi.org/focus_areas/fuel_qualification.html

次世代バイオ燃料（バイオジェット燃料）分野の技術戦略策定に向けて

2-2-3 バイオジェット燃料技術分野の動向

ICAOによる国際線を対象としたCO₂排出削減量の制度 CORSIA が2021年から自主規制、2027年から義務化を目前に控えることから、航空会社及びハブ空港はバイオジェット燃料調達に意欲的である。

前述の ASTM International D7566 において認証された変換プロセスの中で、ANNEX2の HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) の製造プロセスによる廃食油や植物油を原料としたバイオジェット燃料が商用化段階にある。廃食油等から HEFA 製造プロセスのバイオジェット燃料を製造している米国の World Energy (旧 Altair) は、2016年から民間定期便にバイオジェット燃料を提供している^{※27※28}。HEFA の製造プロセスでバイオジェット燃料を製造できるプラントは、フィンランドやオランダ、シンガポールに拠点をもち Neste、米国の Diamond Green Diesel、米国の REG、イタリアの ENI らのプラントがある。いずれも自動車や船舶に用いられる HEFA デーゼルの製造を主要としており、バイオジェット燃料製造量は未だ少ない。自動車や船舶のディーゼルの需要と航空機のバイオジェット燃料の需要見合いで、2021年以降にバイオジェット燃料製造の割合が高まると推測される。加えて、米国の SG Preston など、HEFA 製造プロセスが成熟した技術であることから、あえて研究開発を経ずに商用化し、航空会社と長期供給契約 (Offtake Agreement) を結ぶ後発ベンチャー企業も出現している。

他方、セルロース系バイオマスを原料とするガス化

FT 合成製造プロセスは、成熟した技術として ASTM International D7566 の ANNEX1 として第一号に認証を受けた。しかし、認証時点では、石炭を原材料としており、バイオマスを原材料とした場合のバイオジェット燃料については未だ商用化に至っていない。森林残渣を原材料としてガス化 FT 合成による製造プロセスを用いて 2016 年から商用化を予定していた米国 Red Rock Biofuels は、商用化を 2020 年に延期している^{※29}。都市ごみを原材料にしてガス化 FT 合成によりバイオジェット燃料を製造する米国の Fulcrum は、カリフォルニア州にて 2020 年からの商用化を目指してプラントを建設している^{※30}。なお、ANNEX4 はガス化 FT 合成により芳香族が含まれる製造プロセスである。ガス化 FT 合成の製造プロセスでは、ANNEX1 か ANNEX4 のプロセスが採用される。

また、ANNEX3 の SIP (Synthetic Iso-paraffin) 製造プロセスは、米国の Amyris のブラジルの糖を原材料として微生物による高分子中間体 (Farnessene) 経由で生産されるバイオジェット燃料である。航空会社にはフランスの Total がバイオジェット燃料を供給した^{※31}。この SIP 製造プロセスの場合、既存のジェット燃料へのバイオジェット燃料粗油の混合は 10% を上限とされることや、プロセス中の高分子中間体 (ファルネセン等) が化粧品など高付加価値製品の原材料にもなることから、バイオジェット燃料製造が事業の中軸として拡大する兆しは見えていない^{※32}。

更に、ANNEX5 のアルコールからバイオジェット燃料を製造する ATJ の製造プロセスについては、米国の GEVO が、ブタノールからバイオジェット燃料に製造するプロセスを 2016 年に ASTM International から認証を受

※27 Biodiesel Magazine Web サイト

<http://www.biodieselmagazine.com/articles/893006/united-airlines-begins-using-biojet-fuel-in-routine-lax-flights>

※28 Bioenergy Web サイト

<https://bioenergyinternational.com/biofuels-oils/united-airlines-expands-world-energy-biojet-deal>

※29 米国エネルギー省 Web サイト

https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/04/f61/Woody%20Biomass%20Biorefinery%20Capability%20Development_EE000DPA2.pdf

※30 Renewables Now Web サイト

<https://renewablesnow.com/news/fulcrum-starts-construction-of-nevada-garbage-to-fuel-plant-613317/>

※31 TOTAL Web サイト

<http://publications.total.com/Total-rapport-CSR-2014-EN-version-accessible/our-accomplishments/open-innovation-to-build-the-energy-future/first-commercial-flights-with-total-amyris-biojet.html>

※32 Amyris Web サイト

<https://amyris.com/product-category/clean-beauty/>

次世代バイオ燃料（バイオジェット燃料）分野の技術戦略策定に向けて

け2017年に実証フライトも成功させている^{※33}。エタノールから製造するプロセスについては、米国 LanzaTech が2018年に ASTM International から認証を受け、デモプラント実証及び実証フライトを既に終え^{※34}、商用プラントを建設する段階にある^{※35}。

微細藻類由来の燃料については、多くの微細藻類が油脂を生産することから、ANNEX2の HEFA の製造プロセスが対応するとされるが、微細藻類種によって他の製造プロセスを経由するものもある。日本のユーグレナは ANNEX6、IHI は、ANNEX7 の製造プロセスによりバイオジェット燃料を製造する。

微細藻類の大量培養が未だ確立していないことから、燃料製造にはコストがかかり、微細藻類からの燃料製造を標榜していた米国の Sapphire Energy や Solazyme

は燃料製造事業から撤退している^{※36※37}。しかし、米国エネルギー省 (DOE: Department of Energy) は微細藻類による燃料と高付加価値品等との併産モデルを積極的に支援しており、大量培養技術の確立に向けて、DOE 傘下の国立研究所や大学研究機関において研究開発が継続されている^{※38}。

このような海外のバイオジェット燃料研究開発実証の動向から、HEFA の製造プロセスによるバイオジェット燃料が商用化段階にあり、他の製造プロセスについては、ガス化 FT 合成製造プロセス及び ATJ が研究開発実証段階の商用化一歩手前にある。微細藻類由来の燃料製造プロセスは、2030 年以降に期待される製造プロセスとみなされ研究開発が進められている。

※33 IRENA Web サイト

https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/IRENA_Biofuels_for_Aviation_2017.pdf

※34 LanzaTech Web サイト

<https://www.lanzatech.com/2018/10/04/virgin-atlantic-lanzatech-celebrate-revolutionary-sustainable-fuel-project-takes-flight/>

※35 LanzaTech Web サイト

<https://www.lanzatech.com/2019/11/22/lanzatech-moves-forward-on-sustainable-aviation-scale-up-in-the-usa-and-japan/>

※36 Algae World News Web サイト

<https://news.algaeworld.org/2017/04/happened-sapphire-energy/>

※37 Fortune Web サイト

<https://fortune.com/2016/03/16/solazyme-terravia-ditches-biofuels/>

※38 米国エネルギー省 Web サイト

<https://www.energy.gov/eere/bioenergy/downloads/2019-project-peer-review-advanced-algal-systems>

次世代バイオ燃料（バイオジェット燃料）分野の技術戦略策定に向けて

(1) 特許動向分析

図11は、2007年から2016年の10年間の次世代バイオ燃料の製造プロセスの出願特許件数の動向を示している。

F) 木質草本系急速熱分解処理、G) H) 微細藻類燃料生産の製造プロセスの出願特許件数の増加の推移が顕著である。B) E') 糖化発酵高分子中間体経由の製造プロセスの出願特許件数も次いで増加傾向にあるが、この出願特許件数には燃料以外の高付加価値品用途の特許も含まれている。

なお、A) D') 糖化発酵アルコール経由の製造プロセスについては、ATJとして、エタノールあるいはブタノールから炭化水素燃料を製造するプロセスを対象としたかったが、特許検索式にエタノールやブタノールを原材料のみに限定することが難しく、検索結果には製造品としてのエタノールやブタノールも含まれることから、ATJで重要な要素技術であるアルコールから脱水・低重合するプロセスのみ（燃料用途と限定していない）を対象として検索を行った。

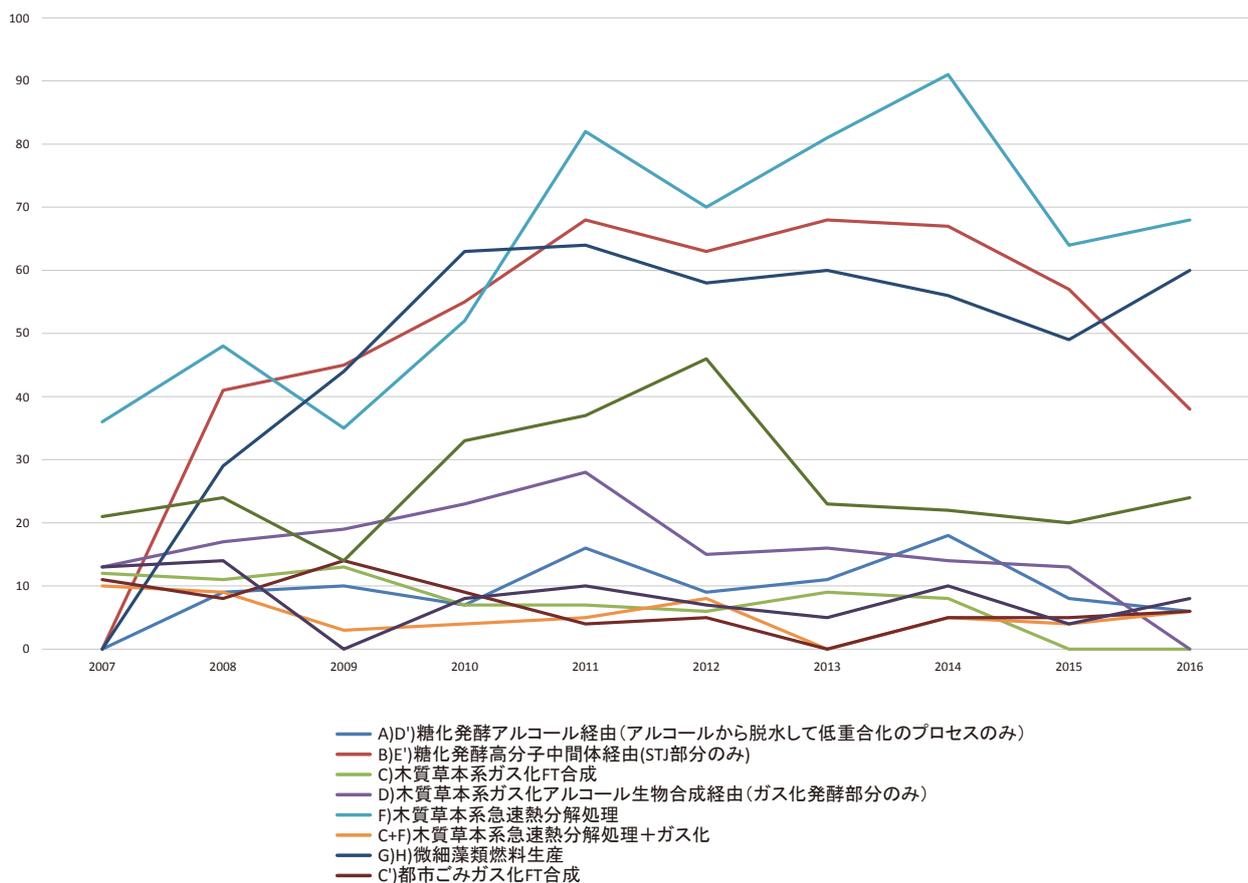


図11 製造プロセス別特許出願件数の推移

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2019)

次世代バイオ燃料（バイオジェット燃料）分野の技術戦略策定に向けて

(2) 論文動向分析

次に、図12に、次世代バイオ燃料の各製造プロセスの論文件数について、2009年から2018年の10年間の推移を示す。

F) 木質草本系急速熱分解処理の論文数は他の製造

プロセスに比べて件数も多く増加傾向にある。また、G) 微細藻類燃料の論文件数も増加傾向にある。C') 都市ごみガス化FT合成の論文数は少ないが、緩やかな増加傾向にある。

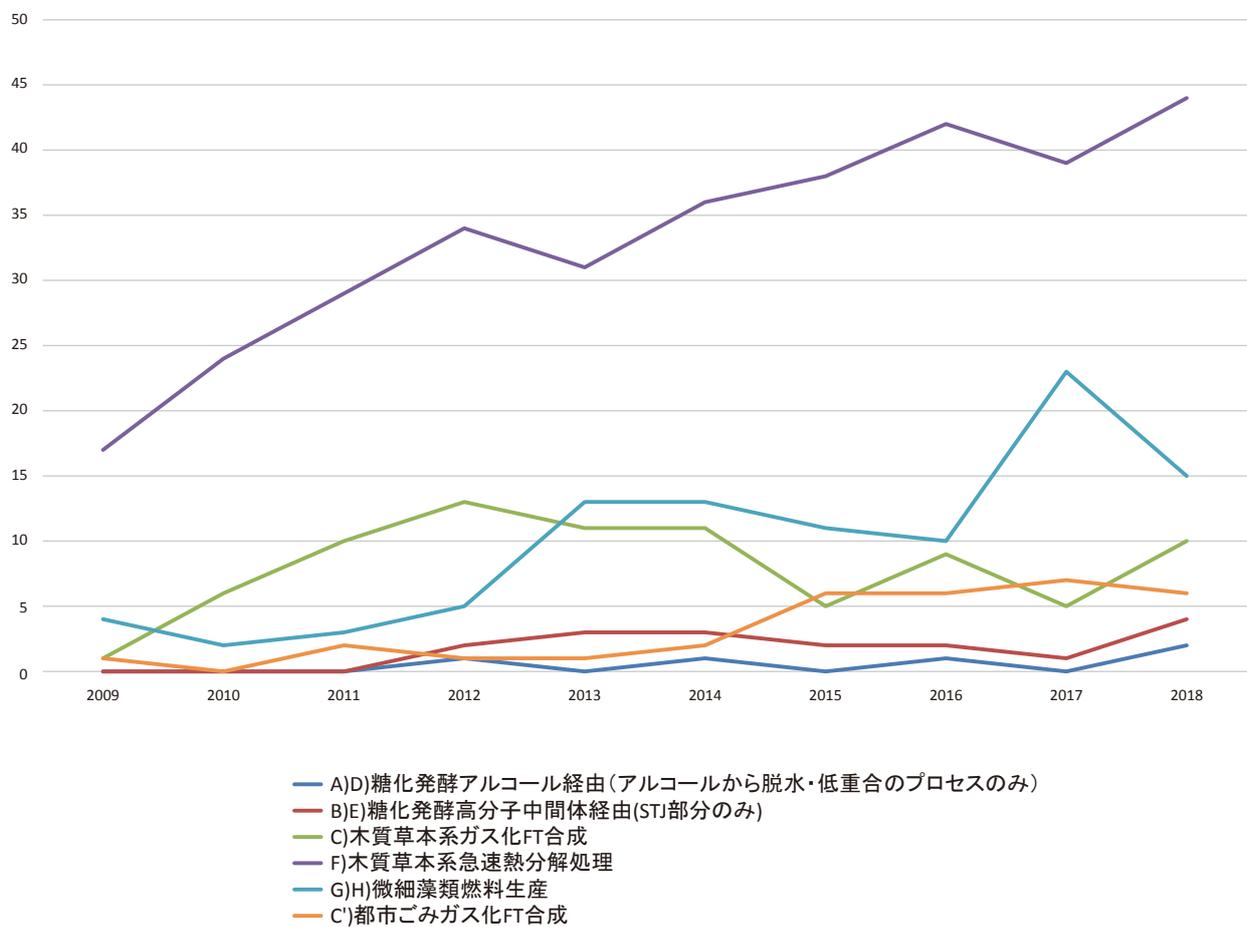


図12 製造プロセス別論文件数の推移

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2018)

(3) 特許・論文動向分析からの考察

特許、論文の分析において、F) 木質草本系急速熱分解処理の製造プロセスの件数が他の技術に比べて多く、増加傾向も顕著であった。木質草本系原材料からの熱分解によるバイオジェット燃料は、米国のKiorがASTM Internationalにその製造プロセスを申請したが最終評価までには至らなかった^{※39}。バイオマスの熱分解油は芳香族の割合が高く、パラフィンに変換するのが難しかったからである。しかし、芳香族が多い熱分解油を、パラフィンを主とする他の製造プロセスによるバイオジェット燃料に混合すれば、100%バイオマス由来のバイオジェット燃料を製造することは可能となる。

次に特許、論文分析の両方の経年変化で増加傾向にあるのがG) 微細藻類燃料製造プロセスである。微細藻類から製造される燃料は、研究開発途上にある。

C) C') 木質草本系ガス化FT合成やA) D') 糖化発酵アルコール経由（アルコールから脱水して低重合化のプロセスのみ）、D) 木質草本系ガス化アルコール生物合成経由（ガス化発酵部分のみ）については、2010年以降は、特許・論文分析とも、件数は少なく、顕著な増減は見られなかった。

2-2-5 まとめ

バイオジェット燃料は、ICAO、IATAがCO₂削減量の目標を掲げ、CO₂削減のための民間国際航空会社に対する具体的な規制を表明していることから、自主規制が開始される2020年、義務化が実施される2027年に向けてバイオジェット燃料製造は増産されその市場は拡大されることが推測される。

海外のバイオジェット燃料製造及び民間国際航空会社の導入状況からは、HEFAのプロセス（図2の(4)J)のバイオジェット燃料が商用段階にある。今後、ガス化FT合成（図2のC)、C'）、ATJ（図2のA)、D)の製造プロセスによるバイオジェット燃料が商用化されるものと推測される。

※39 ICAO Webサイト

<https://www.icao.int/Meetings/SAFStocktaking/Documents/ICAO%20SAF%20Stocktaking%202019%20-%20AI1-1%20Jim%20Hileman.pdf>

3章 次世代バイオ燃料分野の技術課題

3-1 次世代バイオ燃料の製造プロセスの課題

次世代バイオ燃料の製造には、多くのプロセスが必要となる場合が多いため、総じてエネルギー収支やCO₂排出削減効果及び経済性の観点などから課題を有する。そのためHEFA製造プロセス以外のプロセスは商用化水準に達しておらず、これらの課題克服が必要となる。

(1) セルロース系バイオマスを原料とした

次世代バイオ燃料製造プロセス

A) 糖化発酵アルコール経由次世代バイオ燃料製造プロセス(ATJ)

セルロース系バイオマスを原料としたエタノール等のアルコール製造プロセスに立脚していることから、まずはこれらのアルコールを経済的に製造する技術が必要となる。

アルコールを炭化水素燃料に変換するプロセスでは、高分子の炭化水素燃料に重合する等の多くの設備が必要となる。加えて、ATJプロセスによって安価にバイオジェット燃料を製造するためには原料となるアルコールの安価な製造技術あるいは輸入、及びアルコールから炭化水素燃料への各変換技術の低コスト化が必要となる。また、エタノールやイソブタノールを脱水しエチレンにした後、低重合のプロセスによりイソパラフィンがC8～C18の範囲でなだらかな山形の分布になるように変換させな

ればならない。低重合のプロセスは、1960年代より、潤滑油や洗剤の製造目的で使われてきたが、燃料用途には全く使用されてこなかった。このプロセスを燃料目的で効率的にスケールアップすることが課題となる。

米国では、ガソリンへのバイオエタノール混合の上限が設定されていることから、余剰するバイオエタノールをバイオジェット燃料に変換するATJの技術が注目されている。米国のLanzaTechはDOE傘下の国立研究所(PNNL: Pacific Northwest National Laboratory)の触媒技術の排他的な知的財産権を有し、ビートから製造されたバイオエタノールを原料としてバイオジェット燃料を製造するATJの研究開発実証を行った^{*40}。そのバイオジェット燃料を用いてVirgin Atlanticのデモフライトを成功させている^{*41}。米国ではLanzaTech以外に、ByogyやVertimassが独自の製造プロセスの研究開発を行っている。Byogyは、LanzaTechのプロセスに加え、芳香族も含む100%バイオジェット燃料を実現する製造プロセスを開発している^{*42}。他方、Vertimassは、エタノールから一段でバイオジェット燃料を変換する製造プロセスを国立研究所(ORNL: Oak Ridge National Laboratory)の触媒技術を用いて実現している^{*43}。ただし、Vertimassのバイオジェット燃料粗油は芳香族が多いため、既存のジェット燃料との混合比率は低くなる。しかし、パラフィンが主成分のバイオジェット燃料粗油と混合すれば100%バイオジェット燃料を実現することが可能となる。ByogyもVertimassもASTM International D7566の認証は評価段階にある^{*44}。

*40 LanzaTech Web サイト

<https://www.lanzatech.com/2016/12/30/lanzatech-awarded-4m-doe-low-carbon-jet-diesel-demonstration-facility/>

*41 LanzaTech Web サイト

<https://www.lanzatech.com/2018/10/04/virgin-atlantic-lanzatech-celebrate-revolutionary-sustainable-fuel-project-takes-flight/>

*42 Aviation: Benefits Beyond Borders Web サイト

<https://aviationbenefits.org/newswire/2014/04/avianca-brasil-and-byogy-renewables-drive-atj-approval/>

*43 米国エネルギー省 Web サイト

https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/07/f24/wyman_bioenergy_2015.pdf

*44 IATA Web サイト

<https://www.iata.org/contentassets/8dc7f9f4c38247ae8f007998295a37d5/safs2019-day1.pdf>

次世代バイオ燃料（バイオジェット燃料）分野の技術戦略策定に向けて

B) 糖化発酵高分子中間体経由次世代バイオ燃料製造プロセス (STJ)

これまで、セルロース系バイオマスの発酵技術は、エタノール等の低分子のアルコール発酵に関する技術がほとんどを占めており、高分子中間体を代謝する発酵技術については取組例が比較的少ない。そのため、有効な代謝経路を持つ微生物の探索等が重要となる。

米国の Amyris はこの製造プロセスから燃料を製造しているが、高分子中間体（ファルネセン等）からは化粧品などの高付加価値製品原材料を製造することもできるため、燃料よりも高付加価値製品を主目的として開発を進めている。この製造プロセスに関しては、日本では研究開発段階にあり、実証段階にはない。

C) ガス化 FT 合成による次世代バイオ燃料製造プロセス

バイオマス原料に合わせたガス化技術及び触媒等の最適化による FT 合成収率の向上などが既に実施され、一貫製造プロセスでの収率及び経済性の向上等の研究開発が進められている。木質草本系バイオマスや都市ごみを原材料とする場合など、原材料に合わせた前処理とガス化技術の効率性向上の研究開発が重要である。また、バイオマスに合わせた規模 (GTL 等の数十分の1以下) でのシステムの開発が必要となる。

D) ガス化アルコール生物合成経由による次世代バイオ燃料製造プロセス

A) のプロセスと同様に、エタノール等のアルコール製造プロセスに立脚していることから、安価なアルコール製造及び炭化水素燃料への変換技術が必要となる。

アルコールを製造するまでの技術については、米国の LanzaTech がライセンス提供し、中国で、排ガス（合成ガス）を原料とした商用プラントが稼働されている^{※45}。

E) ガス化高分子中間体／油脂生物合成経由次世代バイオ燃料製造プロセス

本製造プロセスは研究例が少なく、有効な代謝経路を持つ微生物の探索等が重要となる。前述の東大発ベンチャー CO₂資源化研究所が開発した UCIDI 水素菌による場合^{※46}、火力発電所の排ガスの CO₂を使用することができるが、UCIDI 水素菌は合成ガス成分に水素も必要とすることから CO₂フリー水素をどこから入手するかが課題となる。

F) 急速熱分解処理による次世代バイオ燃料製造プロセス

本プロセスは、急速熱分解による生成物の制御が難しく、目的とした生成物の収率を高めるための技術等が重要となる。「2-2-4 特許論文動向分析」において、バイオマスの急速熱分解の特許論文数は増加傾向にあった。実験室レベルを超えた産業レベルに応用可能となる研究開発が期待される。

急速熱分解等を用いたバイオ原油については、既存の石油精製設備である流動接触分解装置 (FCC: Fluid Catalytic Cracker) の原料油に5%まで混合して処理し、既存の石油精製の流通にのせて様々な製品に適用することも検討されている。石油精製から生産される様々な製品がバイオマス由来となりうることから、バイオ原油の Co-processing が注目され、米国やカナダのベンチャーの Ensyn が米国 DOE 傘下の国立研究所 (NREL: National Renewable Energy Laboratory) らと研究開発を行った^{※47}。しかし、急速熱分解油は原材料が様々であることからバイオ原油の組成が一定にならないため、ASTM International のジェット燃料の認証対象とはならない。ジェット燃料以外の輸送用燃料や化成品の原材料として使用される可能性はある。

※45 LanzaTech Web サイト

<https://www.lanzatech.com/2018/06/08/worlds-first-commercial-waste-gas-ethanol-plant-starts/>

※46 CO₂資源化研究所 Web サイト

https://www.co2.co.jp/pdf/20190227_UCDI_release.pdf

※47 Ensyn Web サイト

<http://www.ensyn.com/refinery-feedstocks.html>

次世代バイオ燃料（バイオジェット燃料）分野の技術戦略策定に向けて

(2) 微細藻類を原料とした

次世代バイオ燃料製造プロセス

微細藻類を利用することの主なメリットは、単位面積当たりの油脂等の生産量を他の油脂生産植物（大豆等）より高めることができる可能性があることであるが、現行の方法では栽培時、収穫時、脱水時等に多くの労力とエネルギーを消費するため、これらの改善が必要である。

また、エネルギー収支のみならず、経済性の観点からも、栽培、収穫、脱水等にかかる費用を低減させるとともに、生産速度や収率等を向上させていく必要がある。

微細藻類を原料とした次世代バイオ燃料製造プロセスは、エネルギー収支及び経済性の観点からの研究開発が進められてきている。このような研究開発が進展する中で、栽培時に、エネルギー消費を極力少なくして微細藻類を大量培養させる技術の確立が重要視されるようになってきている。

油脂を生産しない微細藻類をHTL処理する製造プロセスは、微細藻類の種類を選ばないことから、藻類の生産性を高めやすいメリットがあるが、微生物等を活用した変換プロセスよりも生成物の選択性が低くなる点などが課題である。パイロットスケールまでの開発は行われたが、実用化例はまだない。

(3) 都市ごみまたは排ガスを原料とした

合成ガス経由次世代バイオ燃料製造プロセス

既存のガス化、FT合成技術等を用いるが、都市ごみを原材料にした場合、分別前処理技術の開発が必要となる。米国のFulcrumは、10年間に110億円をかけて分別前処理技術を自前で開発している^{※48}。都市ごみには不純物が多く、夏と冬で構成物が異なるといった問題がある。Fulcrumの分別前処理は、「クラッシュ、濃度分別、磁石による金属除去、センサーによるプラスチック除去」の各工程を経て物理的に実施されている。

木質草本系バイオマスと同様に、都市ごみをガス化した場合、触媒の被毒成分となるタール、硫黄分、汚染物質等の不純物を除去したクリーンなガスを得ることが課題となる。特に都市ごみの場合は、様々な微量物質の除去が必要である。これに対し、産業廃棄物は、例えば建築廃材では塗料に含まれる砒素が、ペーパースラッジには硫黄が含まれるなど特定の有害物質が含まれているが、有害物質が特定されるためその除去対策をとればよい。

また、製造規模を大きくして経済性効果を図るためには、必要な都市ごみを大量に収集できることが重要となる。

(4) 油脂（廃食油・植物油）を原料とした

次世代バイオ燃料製造プロセス

技術的には既に成熟段階にある技術であり、一部改善の余地は残されているが、新規技術開発要素は比較的乏しい。

なお、本製造プロセスは現時点ではバイオジェット燃料の製造方法として多く取り入れられている一方、廃食油の場合は原料が少なく、植物油を原料とする場合も食料との競合等の課題があり、今後大幅に量を拡大していけるかどうかは不透明である。

しかし、本製造プロセスは、唯一商用化段階にあるプロセスである。早期にサプライチェーンを構築するためには本プロセスによる次世代バイオ燃料を用いて社会実装のための検討を開始する意義は大きい。

また、廃食油や植物油等については、前述のCo-processingを進める動きがある。この場合も、油脂を既存の石油精製設備であるFCCに5%まで混合し、既存の石油精製の流通にのせて様々な製品に適應することが検討されている。油脂については、組成が一定であることから、ジェット燃料の対象となり、油脂のCo-processingはASTM Internationalにおいて、既存のJet A-1の認証であるD1655のANNEX1として承認されている^{※49}。

※48 NEDO 技術戦略研究センターによるFulcrum社へのヒアリング（2017年11月）より。

※49 CAAFI Web サイト
http://www.caafi.org/focus_areas/fuel_qualification.html

次世代バイオ燃料（バイオジェット燃料）分野の技術戦略策定に向けて

3 -2 まとめ

上述の技術課題及び2章の「次世代バイオ燃料の置かれた状況」の実態をもとに、バイオジェット燃料の主要な製造プロセスを、NEDOにおける要素技術の検証の有無、ASTM International D7566取得状況、コスト低減の要件、国内原材料確保の可能性、研究開発段階の観点から整理し、表4に提示した。

更に、今後重点的に取り組むべき製造プロセスとして、ATJ、ガス化FT合成、微細藻類由来燃料の3つの製造プロセスを選定した。選定の理由は以下のとおりである。

① ATJ

ANNEX5としてASTM International D7566に認証済みの製造プロセスであり、技術的課題は燃料用途の低重合化のスケールアップである。エタノールからの製造プロセスの混合率は50%とブタノールからの製造プロセスの30%よりも高い。

また、バイオエタノールは、ブラジル、米国で流通しており、米国では自動車ガソリンに対するブレンドウォールがあるため飽和状態にある。国内で製造されたバイオエタノールに加えて低価格な輸入のバイオエタノールを大量に確保することができれば、市場競争力のある価格のバイオジェット燃料が製造される可能性は高い^{※50}。したがって、ATJは重点的に取り組むべき製造プロセスと評価した。

表4 重点研究開発製造プロセス

| 製造プロセス | NEDO要素技術検証 | ASTM International D7566取得状況 (混合率) | コスト低減要件 | 国内原材料確保 | 研究開発段階 | 備考 |
|---|------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------|------------|---------------------------------|
| Alcohol to Jet (ATJ) A) D) D') [※] | 未 | 取得済 (エタノール～50%) (ブタノール～30%) | 原材料コスト低減と大規模生産 | 輸入も含み確保 | 研究開発実証 | 輸入の原材料も活用し、大規模に生産することが重要。 |
| 高分子中間体経由燃料生産 (Sugar to Jet) B) | 未 | 取得済 (10%) | 原材料コスト低減と大規模生産 | 輸入も含み確保 | 研究開発実証 | 混合率が低く、高付加価値品生産に向くため燃料生産になりにくい。 |
| ガス化FT合成 C) C') | 済み | 取得済 (50%) | 原材料コスト低減と大規模生産 | 廃棄物系原材料を確保 | 研究開発実証 | 廃棄物系原材料を大量に確保し大規模生産することが重要。 |
| 急速熱分解 F) | 済み | 未取得 | 原材料コスト低減と大規模生産 | 廃棄物系原材料を確保 | 研究開発実証 | ASTMIに該当しない。 |
| 微細藻類経由燃料生産 G) H) | 済み | 取得済 (50%) | 生産能力の高い藻体の開発と大量培養技術の確立、及び広大な土地の確保 | 土地を確保 | 研究開発 | 大規模生産することが重要。 |
| 油脂からのHEFA生産プロセス J) | 済み | 取得済 (50%) | 原材料コスト低減 | 輸入も含み確保 | 商用化研究開発要素小 | 商用化段階にある。 |

※図2の該当製造プロセス

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2019)

※50 上野, 藤本, 仁木, 矢部. 感度分析手法を用いたバイオジェット燃料生産プロセスにおける経済性の重要要因の解析. 資源・エネルギー. 2020, 41(1), p.62-62.

次世代バイオ燃料（バイオジェット燃料）分野の技術戦略策定に向けて

②高分子中間体経由燃料製造

ANNEX3として ASTM International D7566 に認証済みの製造プロセスである。混合率は10%である。原材料である糖を安価に大量に確保し微生物経由で大規模に製造できればコスト低減は可能である。

しかし、この製造プロセスは、化粧品や医薬品等の高付加価値品に向くため燃料よりは高付加価値品の製造に使用されている。ASTM International D7566 で規定される混合率も10%と低いことから、製造は可能であるが、重点的に取り組むべき製造プロセスではないと評価した。

③ガス化 FT 合成

ANNEX1として ASTM International D7566 に認証済みの製造プロセスである。ATJ 製造プロセス同様に、燃料価格低減には大規模に製造が不可欠である。加えて無償あるいは逆有償の原材料であることが望ましいことから、そのような原材料が大量に収集されれば有望な製造プロセスとなる^{※51}。現在、発電や熱利用に使用されている都市ごみや木質系原材料をバイオジェット燃料に転用されることが期待される。ガス化 FT 合成製造プロセスは、これらの条件が克服されれば社会実装可能であることから、重点的に取り組むべきであると評価した。

④急速熱分解

木質系原材料などセルロース系原材料の急速熱分解製造プロセスは、ASTM International D7566 では認証されていない。2-2-4 (3) で前述のとおり、米国ベンチャー Kior が木質系原材料の急速熱分解の製造プロセスを ASTM International に申請したが評価プロセ

スを進むことができなかった。このプロセスから製造される粗油は多くが芳香族であるため、ジェット燃料の主成分であるイソパラフィンへの変換が難しいからである。したがって、バイオジェット燃料製造プロセスとして重点的に取り組むべきではないと評価した。

⑤微細藻類由来燃料の製造プロセス

油脂を生産する微細藻類は ASTM International D7566 の ANNEX2 とされるが、微細藻類の種によって異なるプロセスに評価される場合もある。炭化水素燃料を生産する微細藻類は ANNEX7 として評価されている。

微細藻類由来燃料コスト低減には成長速度が速い藻体の開発と微細藻類の大量培養が不可欠となる。これらの研究開発は未だ確立されていないが、副産物の高付加価値製品生産や高付加価値製品の併産も視野に入れながら基礎研究も含めて研究開発を進めることが重要である。研究開発の成果を評価しつつ今後も研究開発を継続すべき重点的製造プロセスとして評価した。

⑥油脂からの HEFA 製造プロセス

廃食油や植物油から水素化処理を経由して製造されたバイオジェット燃料は商用化段階にある。バイオジェット燃料についても、現在商用フライトに搭載されているバイオジェット燃料はこの製造プロセスによるものである。技術課題も少ないことから、現時点でバイオジェット燃料のサプライチェーン構築に導入するには適している。しかし、この製造プロセスの課題は、主要原料とされる廃食油の量が限られることで、量を確保するには輸入の植物油に依存しなければならないことである。

※51 上野, 藤本, 仁木, 矢部. 感度分析手法を用いたバイオジェット燃料生産プロセスにおける経済性の重要要因の解析. 資源・エネルギー. 41(1), p.62-62.

4章 おわりに

前レポートのVol.21は、製造プロセス及びその要素技術の概要を解説した。本レポートVol.37では、技術的側面に加えてサプライチェーンの構築面も含め社会実装可能な製造プロセスを、今後研究開発を進めるべき重点製造プロセスとして提示した。具体的には、3章の表4の赤字の3つの製造プロセス、ATJ、ガス化FT合成、微細藻類由来燃料を対象とした。

この3つの製造プロセスを選んだ理由としては、ATJとガス化FT合成については、原材料を大量に確保スケールアップすることができれば低価格な燃料製造が期

待できること、微細藻類由来燃料製造については、現在は未だ技術的に成熟してはいないが2030年以降に研究開発の成果が実れば、国際競争の進展が期待されることがあげられる。

国際民間航空に対するCO₂排出削減の規制は、2021年に自主規制から開始され2027年に義務化される。バイオジェット燃料導入は民間航空会社のCO₂排出削減努力にカウントされることから、未だ生産量の少ないバイオジェット燃料をめぐる民間航空会社の調達合戦が激化する恐れもある。日本の民間航空会社がバイオジェット燃料を確実に確保できるように、日本の事業者からバイオジェット燃料が提供されるためのサプライチェーン構築を含めた研究開発実証が重要となる。

技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight Vol.37

次世代バイオ燃料(バイオジェット燃料)分野の技術戦略策定に向けて

2020年7月31日発行

TSC Foresight Vol.37 次世代バイオ燃料(バイオジェット)分野 作成メンバー

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
技術戦略研究センター (TSC)

■ センター長 岸本 喜久雄

■ センター次長 西村 秀隆

■ 再生可能エネルギーユニット

・ユニット長 仁木 栄

・研究員 上野 伸子 (2020年5月まで)

江川 光 (2019年10月まで)

森 則之 (2020年1月まで)

・フェロー 植田 讓 東京理科大学 工学部 電気工学科 教授

● 本書に関する問い合わせ先
電話 044-520-5150 (技術戦略研究センター)

● 本書は以下URLよりダウンロードできます。
<https://www.nedo.go.jp/library/foresight.html>

本資料は技術戦略研究センターの解釈によるものです。
掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。
引用を行う際は、必ず出典を明記願います。