



技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight

Vol. **21**

次世代バイオ燃料分野の 技術戦略策定に向けて

2017年11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定義と位置づけ	2
1-2	次世代バイオ燃料の製造プロセス概要	3
2 章	次世代バイオ燃料技術の置かれた状況	5
2-1	次世代バイオ燃料の市場動向と将来見込み	5
2-2	国際標準化の動向	10
2-3	国内外の技術開発動向	11
2-4	特許・論文の動向	13
3 章	次世代バイオ燃料分野の技術課題	16
3-1	次世代バイオ燃料の製造技術	16
3-2	次世代バイオ燃料の製造技術の課題	18
3-3	次世代バイオ燃料の標準化に向けた取組の重要性	19
4 章	おわりに	20

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

次世代バイオ燃料分野の技術戦略策定に向けて

1章 次世代バイオ燃料技術の概要

1-1 次世代バイオ燃料の定義と位置づけ

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、燃焼時に排出する二酸化炭素と等量の二酸化炭素を成長時に吸収していることから、利用時の二酸化炭素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、導入が進められている。

本レポートでは、バイオ燃料を第1世代、第2世代及び次世代の3つに区分した。それぞれの特徴を表1に示す。

第1世代バイオ燃料は、特に砂糖やでんぷん、植物油等のバイオマスの可食部^{※2}を原料として製造されたバイオエタノールやバイオディーゼル（脂肪酸メチルエステル：FAME）を指し、ガソリンや軽油の代替燃料として既に

世界各国で導入が進められている。また第2世代は、バイオマスの非可食部であるセルロースなどを原料としたセルロース系バイオエタノールなどを指し、各国で商用化に向けた技術開発及び実証事業などが進められている。

第1世代及び第2世代のバイオ燃料（以後、「従来型バイオ燃料」という）は、既存インフラ設備（既存のガソリン車やジェット機等の運輸機器、その燃料供給のための各種インフラ設備）をそのまま活用する場合、ガソリン等の化石燃料に混合して利用するが、その混合比率に制限がある^{※3}。また、ジェット燃料は要求される品質規格が厳しく、従来型バイオ燃料を混ぜることは認められていない。

これらに対して、本レポートでは既存のインフラ設備とより親和性の高い炭化水素系のバイオ燃料^{※4}を「次世代バイオ燃料」と定義した。次世代バイオ燃料は酸素を含まない炭化水素系の燃料であるため、適切に精製することで化石燃料由来の燃料とほぼ同じ燃焼特性を実現でき、また、ジェット燃料にも混合できることが最大の特徴である。

表1 次世代バイオ燃料の定義と位置づけ

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）

※1 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二酸化炭素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、生産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、プロセスごとにそのエネルギー収支及び二酸化炭素削減効果を検証する必要がある。

※2 世界全体では飢餓等の課題がまだに存在している中、食糧生産と競合する形での燃料生産に対する批判が高まっていることから、食糧生産と競合しない非可食部（食糧生産の残渣等）を原料としたバイオ燃料（第2世代以降）の開発が進められている。

※3 ガソリン車において、エタノールの混合比率が10%程度の燃料までは自動車メーカーによってバイオ燃料を利用することに支障がないことが保障されているが、それ以上の混合比率には対応しない事例などがある。

※4 炭化水素（hydrocarbons）は炭素原子と水素原子だけでできた化合物の総称であり、その分子構造により直鎖状のものや環状のもの、芳香族炭化水素などに区分される。一般的に石油は主に炭化水素からできており、このため現在流通しているガソリン、軽油（ディーゼル）、ジェット燃料（ケロシン）は炭化水素燃料と呼ばれている。なお、現在バイオ燃料として商用化されているバイオエタノールやバイオディーゼルは酸素を含む化合物であり、炭化水素ではない。

次世代バイオ燃料分野の技術戦略策定に向けて

1-2 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、様々な原料と燃料変換プロセスの組合せによって製造される。以下に、原料区分ごとに使用されるプロセスを示す(原料別の個別の変換プロセス(図1のA~J)についての詳細は3章を参照)。

(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技術

本製造技術は、木質、草本等のセルロース系バイオマスを原料とした製造プロセスで、主に糖化発酵を介するプロセス(図1のA・B)と合成ガス(水素、一酸化炭素等の混合ガス)を介するプロセス※5(図1のC~E)、及び急速熱分解等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1のF)の3種類が存在する。

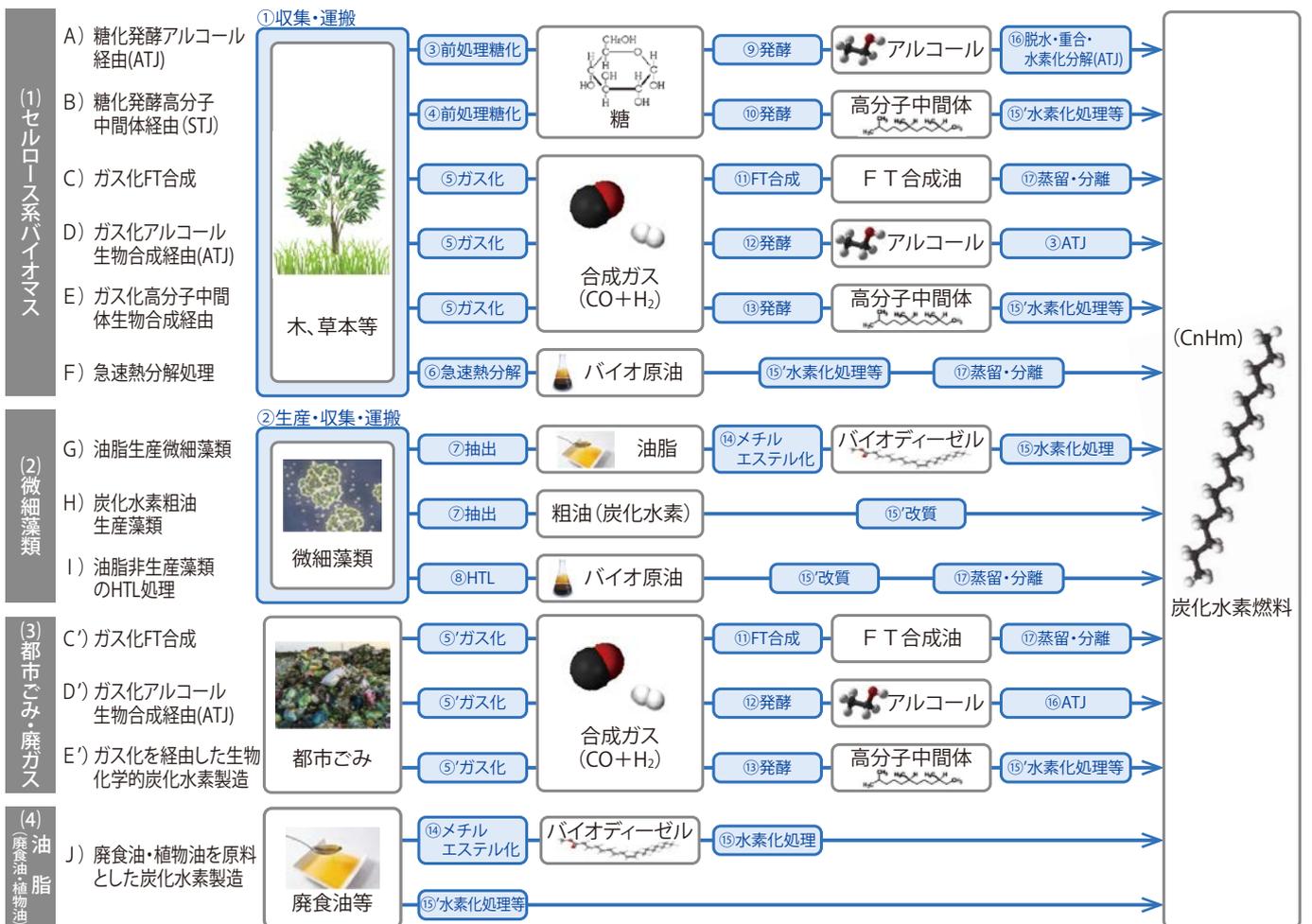


図1 次世代バイオ燃料製造プロセス一覧

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

出所: NEDO 技術戦略研究センター作成 (2017)

※5 ガス化を介するプロセスはBTL (Biomass to Liquid) と呼ばれることもある。

次世代バイオ燃料分野の技術戦略策定に向けて

さらに、糖化発酵を介するプロセスは主にアルコールを経由するATJ (Alcohol to Jet) とファルネセンなどの高分子中間体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合成^{※6} (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技術

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
カメラナ	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 Edey, 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邦訳 (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 (HTL : Hydrothermal Liquefaction)^{※7} 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生産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・廃ガス (合成ガス) を原料とした次世代バイオ燃料製造技術

本製造技術は、都市ごみを原料とした製造プロセスで、セルロース系バイオマス为原料として合成ガス (水素、一酸化炭素等の混合ガス) を介したプロセスと同じである。ただし、原料が違うことから、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技術

廃食油や植物油等の油脂を原料とした製造プロセスは、油脂に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、これを改質 (水素化処理) 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介さ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^{※8}。

※6 Fischer-Tropsch process

※7 バイオマスを高温高圧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。

※8 米国 Chevron 社と ARA 社が共同開発した Biofuels ISOCONVERSION Process 技術等。

次世代バイオ燃料分野の技術戦略策定に向けて

2章 次世代バイオ燃料技術の置かれた状況

2-1 次世代バイオ燃料の市場動向と将来見込み

次世代バイオ燃料は、自動車や船舶、航空機等の各種輸送機器において利用することが可能であり、長期的には液体バイオ燃料の過半数を占める可能性がある(図2)。IEA (International Energy Agency: 国際エネルギー機関) のロードマップを基にしたNEDO技術戦略研究センターの試算によれば、2030年におけるバイオジェット燃料の市場規模は約4兆円、2050年においては19兆円程度まで拡大すると見込まれる^{※9}。

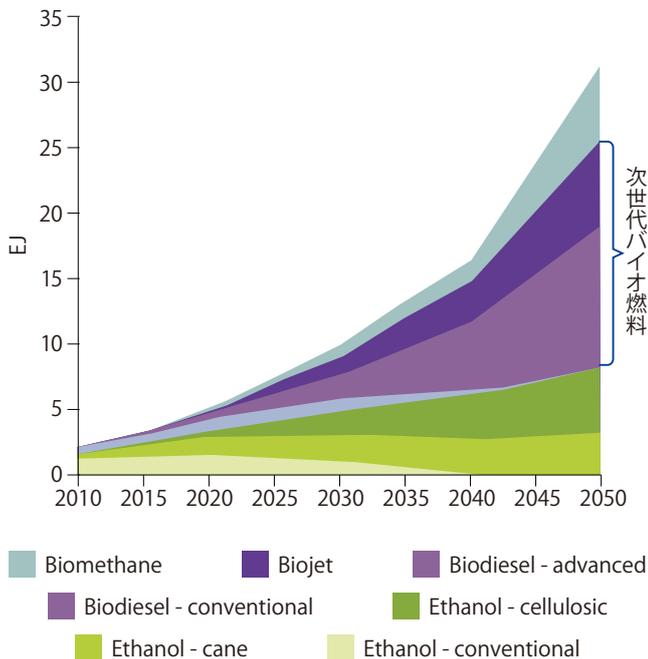


図2 世界のバイオ燃料消費量の将来見込み
出所：Technology Roadmap Biofuels for Transport (IEA, 2011) にNEDO技術戦略研究センター追記(2017)

一方、現状では、次世代バイオ燃料は既に商用化が進む従来型バイオ燃料(バイオエタノールやバイオディーゼル)に比べて、その製造と精製にコストがかかる^{※10}。そのため、その実用化に当たっては、従来のバイオ燃料とは差別化を図り、既存インフラ設備との親和性が高いという有用性を発揮しやすい市場を直近ターゲットとしていくことが重要となる。

次世代バイオ燃料が有用性を発揮しやすい市場としては、ジェット燃料代替及び従来のバイオ燃料の混合比率が高くなった地域での自動車用等の燃料代替の2つが想定される。後者の自動車用等の燃料代替については、世界的には当面の間エタノールやバイオディーゼルなどが先行し、既存インフラ設備との関係から混合比率に制限が発生するのはまだ先になると考えられる^{※11}。一方で、前者のジェット燃料代替に関しては、今後も市場が拡大傾向にあることに加え、航空業界の低炭素化を図る観点から、バイオ燃料へのニーズが高まっている。また、従来型バイオ燃料ではジェット燃料の代替は困難であることなどから、次世代バイオ燃料の有用性が発揮しやすい。これらのことから、次世代バイオ燃料の対象市場としてはジェット燃料市場が先行するものと考えられる。

※9 Technology Roadmap, Biofuels for Transport (IEA, 2011) に記載の熱量(EJ)を基に、120円/Lと仮定して試算。

※10 現在市場で取引されているバイオエタノールの価格は41円/L程度(ガソリン混合用エタノールの米国シカゴ取引所の先物取引価格の2016年平均値)であり、ガソリンとかなり近い価格で取引されている。

※11 既に、エタノール等の混合比率の制限が発生しつつある市場の例としては、米国の例が挙げられる。米国においては、バイオ燃料(エタノール等)の導入義務量が総ガソリン需要の10%を超えて設定されている。その一方で、米国は、消費者が既存インフラ設備との関係から高い混合比率のエタノールを利用しないという課題(通称ブレンドウォール)に直面している。そのため、次世代バイオ燃料は、航空機燃料としてのみならず、混合比率の制限を克服可能な炭化水素燃料としても期待が高まりつつある。

次世代バイオ燃料分野の技術戦略策定に向けて

(1) ジェット燃料市場の特殊性と

バイオジェット燃料^{※12}の必要性

世界的な経済成長に伴い、旅客量は増加傾向にある(図3)。そして、この傾向は今後も継続していくことが想定されている(図4)。また、ジェット燃料を電気や水素等の他エネルギー媒体に代替することは困難なため、ジェット燃料の消費量は長期的に増加する見込みである。

一方、2009年にICAO (International Civil Aviation Organization: 国際民間航空機関)^{※13}は2050年時点で航空業界の二酸化炭素排出量半減を目標として掲げた。これを受けて、IATA (International Air Transport Association: 国際航空運送協会)は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、2020年までに航空業界の実質二酸化炭素排

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。さらに、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から二酸化炭素削減のための機体改善の義務化に係る文書(ICAO CO₂ standard for aircraft)^{※14}が発表されるなど、航空業界は二酸化炭素排出量の削減に向けた取組を強く求められている。

増加する航空需要を維持しつつ、ICAO及びIATAの2050年の二酸化炭素排出削減目標(2005年比半減)を達成するためには、運用改善や機器の更新等による燃費向上に加えて、革新的な技術やバイオ燃料の導入による燃料自体の低炭素化が必要であることから(図5)、次世代バイオ燃料の早期実用化が期待されている。

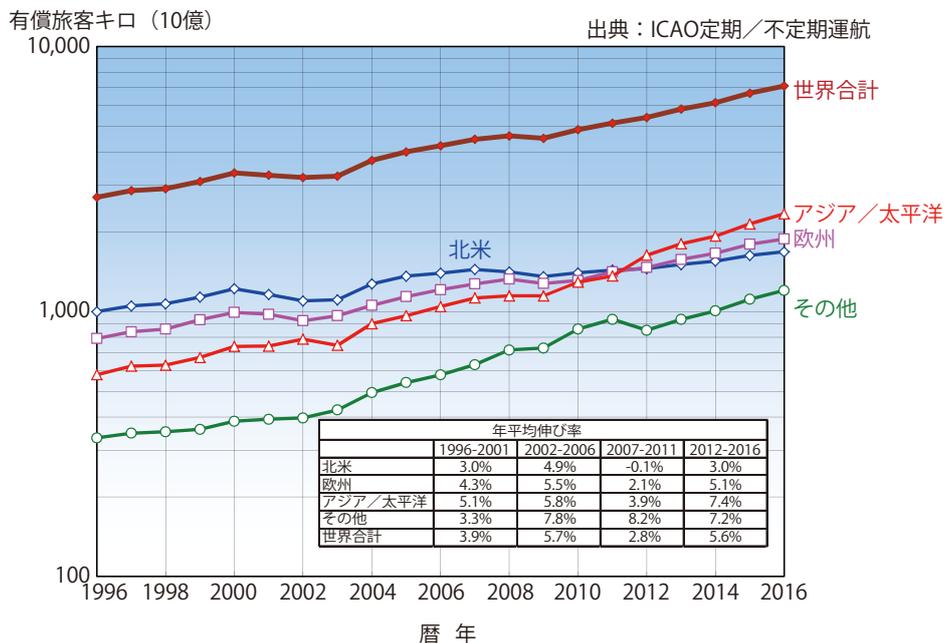


図3 世界の航空旅客輸送の推移

出所：航空機関連データ平成28年版(日本航空機関開発協会, 2017)

※12 次世代バイオ燃料をジェット燃料に適用したもの。

※13 国際民間航空が安全かつ整然と発達するように、また、国際航空運送業務が機会均等主義に基づいて健全かつ経済的に運営されるように各国の協力を図ることを目的として、1944年に採択された国際民間航空条約(通称シカゴ条約)に基づき設置された国連専門機関(出典：外務省ウェブサイト)。

※14 新規導入航空機は設定された標準が義務付けられ、2020年以降は導入済みの航空機についても標準化が義務付けられる。

次世代バイオ燃料分野の技術戦略策定に向けて

また、航空業界（特に国際線）における二酸化炭素排出量削減に向けた取組に関しては、国際的な枠組みの影響が大きい点にも留意が必要である。国家間をまたぐ航空業界に関しては、国際的に定められる合意事項に基づき、二酸化炭素削減に向けた取組が進められる^{※15}。そのため、国際的にバイオ燃料の導入目標や義務量が

設定されることで、必然的に各国の航空業界の対応が必要になる。国内産業や国内運輸向け燃料に関しては、国ごとに二酸化炭素排出量の削減に向けた取組が進められるため、各国政府が設定する導入義務量や導入目標量が重要となってくる。

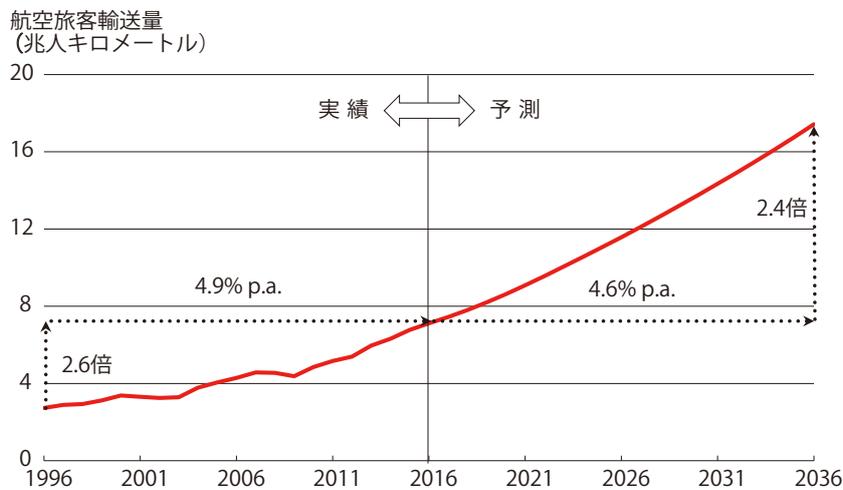


図4 世界の航空旅客予測

注) 図中の p.a.とは、per annumの略で、年平均の伸び率を示す。
出所：航空機関連データ平成28年版（日本航空機開発協会，2017）

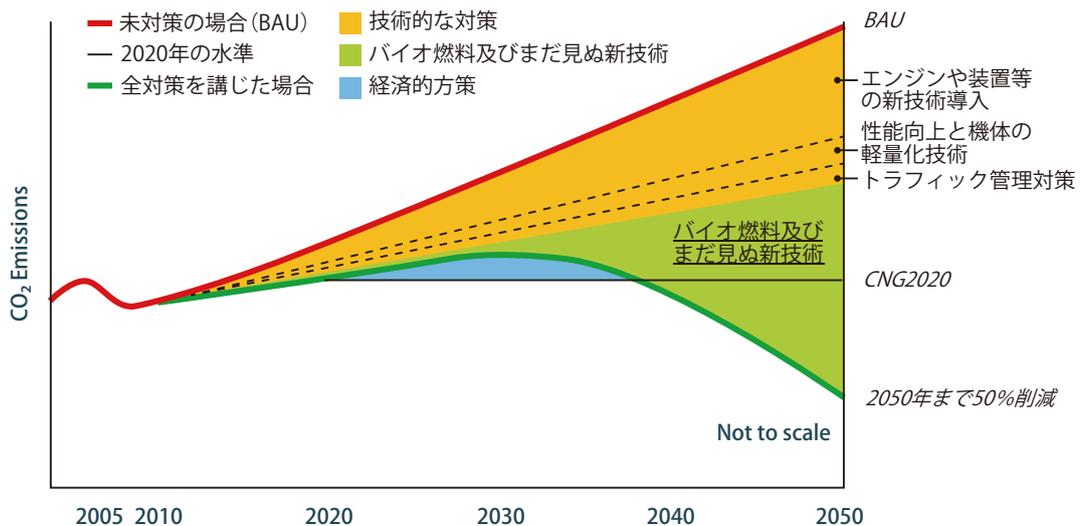


図5 航空機業界における二酸化炭素排出量削減ロードマップ

出所：IATA technology roadmap 2013（IATA，2013）を基に NEDO 技術戦略研究センター邦訳（2017）

※15 気候変動枠組条約においても、国際線の二酸化炭素排出量削減に向けた取組については、国連下の組織であるICAOが中心となって進めることとされている。

次世代バイオ燃料分野の技術戦略策定に向けて

(2) バイオジェット燃料の試験利用等の状況

複数の航空会社が、燃料供給先の安定確保の観点からバイオ燃料の開発に積極的な姿勢を見せており^{※16}、

バイオジェット燃料を搭載した試験飛行^{※17}、有償飛行^{※18}等を行っている(表3)。

表3 バイオジェット燃料を搭載した試験飛行・有償飛行

年月日	飛行形態	航空会社	燃料供給会社	原材料(混合率)
2008/12/30	試験飛行	Air New Zealand	Terasol Energy	ジェットロファ (50%)
2009/1/7	試験飛行	Continental Airlines	Sapphire Energy, Terasol Energy	ジェットロファ (47.5%)、藻類 (2.5%)
2009/1/30	試験飛行	日本航空 (JAL)	Sustainable Oils	カメラナ、ジェットロファ、藻類
2009/11/23	試験飛行	KLM	GE, Honeywell	カメラナ (50%)
2010/11/23	試験飛行	TAM	不明	ジェットロファ (50%)
2011/4/1	試験飛行	Interjet	Honeywell	ジェットロファ (27%)
2011/6/20	試験飛行	Boeing	GE, Honeywell	カメラナ (15%)
2011/6/22	有償飛行	KLM	SkyNRG	廃食油
2011/7/15	有償飛行	Lufthansa	Neste Oil	混合原材料
2011/10/13	有償飛行	Air France	SkyNRG	廃食油
2011/10/28	試験飛行	Air China	PetroCVhina, Honeywell UOP	ジェットロファ (50%)
2011/11/7	有償飛行	United	Solazyme ^{※19}	藻類 (40%)
2012/1/24	試験飛行	ETIHAD	不明	廃食油
2012/4/13	試験飛行	中国東方航空	不明	地溝油・パーム油 100%
2012/4/16	空輸飛行 ^{※20}	全日本空輸 (ANA)	SkyNRG	廃食油
2012/8/2	空輸飛行	日本貨物航空 (NCA)	SkyNRG	廃食油
2014/6-7	有償飛行	GOL	Honeywell UOP	非可食コーン油、廃食油
2014/9/15	有償飛行	Lufthansa	Amyris Total	ファルネセンシュガー由来燃料 (10%)
2014/9/23	有償飛行	Finair	SkyNRG	廃食油
2014/10/7	有償飛行	Scandinavian Airline	SkyNRG Nordic	廃食油 (10%)
2014/11/11	有償飛行	Scandinavian Airline	SkyNRG Nordic	廃食油 (48%)
2014/11/11	有償飛行	Norwegian	SkyNRG Nordic	廃食油 (50%)
2015/3/21	有償飛行	東南航空	Sinopec	廃食油 (50%)

出所：経済産業省「2020年オリンピックに向けたバイオジェット燃料の導入までの道筋検討会」(2014年3月)資料、及び AviationBenefit.org 資料を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2017)

※16 航空会社は年間の支出の大部分(2~3割程度)を燃料費に費やしており、他業種に比べ石油価格の変動リスクに強くさらされている業界の一つといえる。

※17 英語では test flight という。航空機を実際に飛行させて所定の事項を確認すること。

※18 英語では revenue flight という。旅客、貨物等、営業運転の飛行を指す。

※19 2016年3月に社名を TerraVia に変更し、燃料製造事業から撤退、食品事業に特化している。

※20 英語では Ferry flight。航空機を、営業運転としてではなく移動させること。

次世代バイオ燃料分野の技術戦略策定に向けて

試験飛行、有償飛行のいずれも継続的な商業利用ではなく、一時的な試験的取組となっているが、有償飛行に関しては2011年に、バイオジェット燃料の国際認証 ASTM (American Society for Testing and Materials) において、廃食油や植物油等の油脂を原料とした変換技術 HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) が認証されて以降、行われている。

現時点では比較的調達・精製が容易な植物油^{*21}や廃食油を原材料とした燃料（バイオディーゼルを利用したもの）を使用した飛行が多い。

(3) 次世代バイオ燃料の価格について

次世代バイオ燃料の価格については、2016年時点では大規模な商業生産は行われていないため、市場に流通している量が極めて少なく、公表されているデータは少ないが、米国国防総省 (DOD: Department of Defense) がバイオジェット燃料の調達実績及び調達価格を提示している (表4)。最も調達量が多いのは HEFA で10.11ドル/L (約1,200円/L) である。他方、価格が安いのは、HDC-D (急速熱分解処理) による燃料であるが、調達量が少なく、実際のコストを反映できているかどうかは検証が必要である。

表4 米国 DOD のバイオジェット燃料調達の実績

変換技術	調達量 L (gal)	総コスト \$/L	平均価格 \$/L (\$/gal)	最少価格 \$/L (\$/gal)	最大価格 \$/L (\$/gal)	契約数 (企業数)
HEFA J) 廃食油・植物油を原料とした炭化水素製造	4,108,428 (1,085,450)	41,534,620	10.11 (38.26)	7.07 (26.75)	39.37 (149.00)	12 (4)
ATJ A) 糖化発酵アルコール経由	352,005 (93,000)	5,487,000	15.59 (59.00)	15.59 (59.00)	15.59 (59.00)	4 (1)
STJ B) 糖化発酵高分子中間体経由	162,755 (43,000)	1,106,390	6.80 (25.73)	6.80 (25.73)	6.80 (25.73)	4 (1)
HDC-D F) 急速熱分解処理	24,603 (6,500)	57,525	2.34 (8.85)	2.34 (8.85)	2.34 (8.85)	2 (1)
(参考) ^{*22} FT 合成 (石炭・天然ガス由来)	2,763,050 (730,000)	2,745,650	0.99 (3.76)	0.90 (3.41)	1.85 (7.00)	4 (3)

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

ATJ: Alcohol to Jet

STJ: Sugar to Jet、糖化発酵により直接炭化水素に変換する。

急速熱分解処理 (HDC-D (Hydrotreated Depolymerized Cellulosic Diesel)): 急速熱分解処理による木質系バイオマスからのジェット燃料生産 (参考) FT 合成: 天然ガスや石炭を原料としており、バイオマス由来ではない。

出所: IATA 2014 Report on Alternative Fuels (IATA, 2014) を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2017)

^{*21} ジャトロファやカメリアなどの植物から得られる油脂。

^{*22} 原典の代替ジェット燃料一覧の中では、FT 合成によるジェット燃料価格が最も低くなっているが、これは石炭を原材料とした CTL (Coal to Liquid) であり、バイオマス由来の燃料ではないため、参考として表末尾に提示している。

次世代バイオ燃料分野の技術戦略策定に向けて

2 -2 国際標準化の動向

ジェット燃料に関する国際規格には、ASTM インターナショナル (American Society for Testing and Materials International) が発行する ASTM 規格や英国の DEF STAN 規格等が存在し、次世代バイオ燃料をジェット燃料として利用する場合、これらの国際的な規格にのっとり、認証を取得する必要がある。

現在は、バイオジェット燃料の規格として、ASTM の D7566 という規格が整備されており、当該規格にのっとり、各種の方法で製造されたバイオジェット燃料の試験・評価が行われている。D7566 は、ドロップイン^{※23}のバイオジェット燃料として、従来のジェット燃料の規格であ

る D1655 同等の燃料であることを保証する規格である。既に規格認証を取得済みのバイオジェット燃料製造方法は D7566 の Annex に追記され、2016 年 1 月時点では表 5 のとおり、ANNEX1 Fischer Tropsch (FT)、ANNEX2 Hydroprocessed ester and fatty acids (HEFA)、ANNEX3 Synthetic Iso-paraffin (SIP)、ANNEX4 SPK plus aromatics (SPK/A)、ANNEX5 Alcohol to Jet (ATJ) の 5 種類のバイオジェット燃料が認可されている。

そのほかの新たな製造方法についても、ANNEX への追加に向けた調整が進められており、これらについては ASTM インターナショナルにてタスクフォースが設けられ、認可に向けた検証が行われている。

表 5 ASTM D7566 の取得技術

取得状況	変換プロセス	概要	申請企業
ANNEX1 注1)	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 注2)	Hydroprocessed ester and fatty acids (HEFA)	2011年7月 Bio-SPK (Bio Synthetic Paraffin Kerosene) 50%が承認された	Chevron (米), BP (英), Phillips 66 (米)
ANNEX3 注3)	Synthetic Iso-paraffin (direct sugar) (SIP)	2014年6月 10%混合が承認された	AMYRIS (米), TOTAL (仏)
ANNEX4 注4)	Synthesized paraffinic kerosine plus aromatics (SPK/A)	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 注5)	Alcohol to Jet (ATJ)	2016年1月 ブタノール to JET	GEVO (米)

注1) 1章図1の(1)C) ガス化 FT 合成、(3)C') ガス化 FT 合成など

注2) 1章図1の(2)G) 油脂生産微細藻類、H) 炭化水素粗油生産藻類、(4)J) 廃食油・植物油を原料とした炭化水素製造など

注3) 1章図1の(1)B) 糖化発酵高分子中間体経由など

注4) 有機物全般を対象とし、芳香族が入っているものをアルキル化するプロセス。例えばバイオ原油など

注5) 1章図1の(1)A) 糖化発酵アルコール経由 (ATJ)、D) ガス化アルコール生物合成経由 (ATJ) など

出所：各種資料を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2017)

※23 既存の機器、設備に従来の化石燃料由来の燃料と同じようにそのまま利用可能な燃料をドロップイン燃料という。

次世代バイオ燃料分野の技術戦略策定に向けて

2-3 国内外の技術開発動向

次世代バイオ燃料の技術開発については、二酸化炭素排出削減の観点に加え、石油価格の変動リスクの低減及び自給率の向上といったエネルギーセキュリティの観点などから各国政府及び民間航空会社などで進められている。表6は、世界及び日本のバイオジェット燃料開発に取り組む主な企業・研究機関の一覧である。現時点で

優位性のあるプロセスは絞り込まれておらず、実用化に向け、様々な製造方法の検討が行われている。

(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技術

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技術としては、実証段階にあるものとして、FT合成によるものと熱分解処理技術を用いたものの2種類の技術の実証事業が進められている。

表6 国内外の主な技術開発実施者

原料種別	フェーズ	海外	国内
(1) セルロース系バイオマス	応用研究・実証	<ul style="list-style-type: none"> Red Rock Biofuels (米国) Cool Planet Energy System (米国) SynSel Energi AS (米国) [参考] GEVO (米国) ※トウモロコシ利用 Total (フランス)、Amyris (米国) ※糖利用 	<ul style="list-style-type: none"> 三菱日立パワーシステムズ、東洋エンジニアリング
(2) 微細藻類	応用研究・実証	<ul style="list-style-type: none"> サンディア国立研究所 (米国) Sapphire Energy (米国) Cellana (米国) Heliae (米国) Renewable Algal Energy (米国) Algenol Biofuels (米国) 	<ul style="list-style-type: none"> デンソー、中央大学、出光興産 電源開発、日揮、東京農工大学 IHI、神戸大学、ちとせ研究所 ユーグレナ、千代田化工建設、いすゞ、全日本空輸 (ANA)
(3) 都市ごみ	応用研究・実証	<ul style="list-style-type: none"> Fulcrum BioEnergy (米国) 	
(4) 廃食油・植物油	応用研究・実証	<ul style="list-style-type: none"> SBRC (Sustainable Bioenergy Research Consortium) (UEA) Sunchem Holding Ltd (イタリア) Sustainable Oils, Inc. (米国) [試行的] Neste Oil (フィンランド) AltAir Fuels Refinery (米国) Dynamic Fuels (米国) Sinopec (中国) 	<ul style="list-style-type: none"> 出光興産 ユーグレナ、伊藤忠エネクス

注) 基礎研究を除く

出所: 各種公開資料を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2017)

次世代バイオ燃料分野の技術戦略策定に向けて

米国のRed Rock Biofuelsは、森林間伐材^{※24}等の木質バイオマスを原料として、ガス化FT合成技術による次世代バイオ燃料を生産するプラントの建設を計画している。通常、間伐材等を原料とした事業では間伐材の収集費用等がかかるが、Red Rock Biofuelsの実証プラントでは、州政府が間伐材等を処理費用として有償で引き取っているため、原材料費は0円となっており、当該プラントの収益性向上の一因となっている。

熱分解による次世代バイオ燃料の生産については、Cool Planet Energy SystemやSynSel Energi ASが実証事業に取り組んでいる。なお、Kiorも熱分解による事業を実施していたが、現在は撤退している。

国内では、NEDOが平成22年から平成28年度にかけて実施した「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業」の中で、バイオマスのガス化技術等のBTL技術の開発を行っている。

(2) 微細藻類を原料とした

次世代バイオ燃料製造技術

バイオ燃料製造を目的とした微細藻類から油脂あるいは炭化水素を抽出する研究開発及び実証は、米国及び日本を中心に進められているが、具体的な商用化計画はいまだ発表されていない。米国では、サンディア国立研究所が、2016年2月25日にバイオ燃料の製造を目的とした屋外での実証プロジェクトを開始している。一方で、燃料製造としつつも、付加価値の高い化学製品や健康食品などの生産を主体とした研究開発・実証も存在し、一部の事業ではそれらが主体となりつつある傾向もある(Sapphire Energy、Heliae、Cellana等)。

国内では、主に経済産業省、農林水産省及び文部科学省で微細藻類を用いた燃料製造技術の開発が進められている。「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業」では、屋外1,500m²の試験プラントでのバイオ燃料用微細藻類の培養の実証に成功している。

(3) 都市ごみ・廃ガス(合成ガス)を原料とした次世代バイオ燃料製造技術

英国のGreenSky Londonプロジェクトや米国のFulcrum BioEnergyが都市ごみを原料とした燃料生産に取り組んでいたが、そのうちGreenSky Londonプロジェクトについては、原油価格の下落等を理由に2016年1月にプロジェクトが終了しており、現在はFulcrum BioEnergyのプロジェクトのみが進行中である。

(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技術

民間の有償飛行や試験飛行に搭載されたバイオジェット燃料は、廃食油や植物油など油脂系の原料が主である。このような油脂系の原料を基にした変換技術は、既存のバイオディーゼル等を活用しやすいことから比較的容易に実施できる^{※25}ことやASTMの認証済みであることから先行して導入が進められている。

※24 Red Rock Biofuels が設備を設置している地域(米国オレゴン州ポートランド)では、山火事を防止する観点から、州政府が間伐材を有償で収集・処理することとなっている。

※25 既に市場に流通しているバイオディーゼルを原料として使う場合は、バイオディーゼル等を水素化処理する設備を新設すれば炭化水素燃料を製造することができるため、他のプロセスに比べて製造に係る追加の初期費用が小さくできるメリットがある。

次世代バイオ燃料分野の技術戦略策定に向けて

2-4 特許・論文の動向

(1) 特許

図6に、バイオ燃料関連技術の特許出願人国籍別の特許出願件数を示す。中国が49%と約半数の割合を占め、次いで米国の16%、日本の10%であった。

なお、調査対象とした特許出願は、次世代バイオ燃料関連技術のみに絞ったものではない。

図7に、出願人国籍別の特許出願件数の経年変化を示す。中国の伸びが顕著である。日本は、2008年以降、徐々に特許出願件数が減少している。

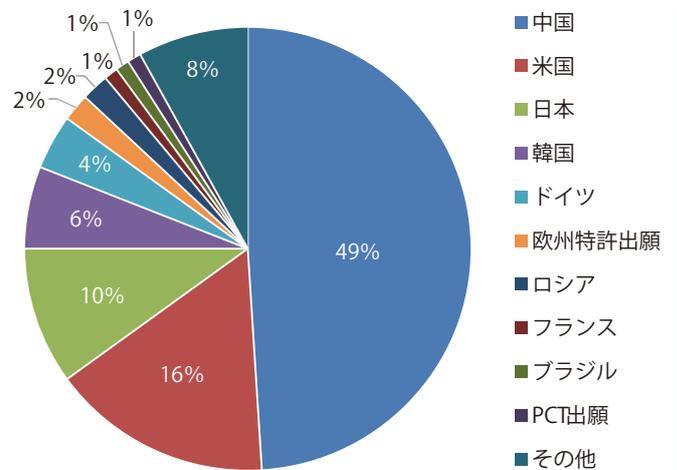


図6 出願人国籍別バイオ燃料関連技術特許出願の割合

N=56,095、期間2005年1月1日～2015年11月4日

出所：NEDO「平成27年度出願特許における日本のポジションに関する情報収集」(2015)

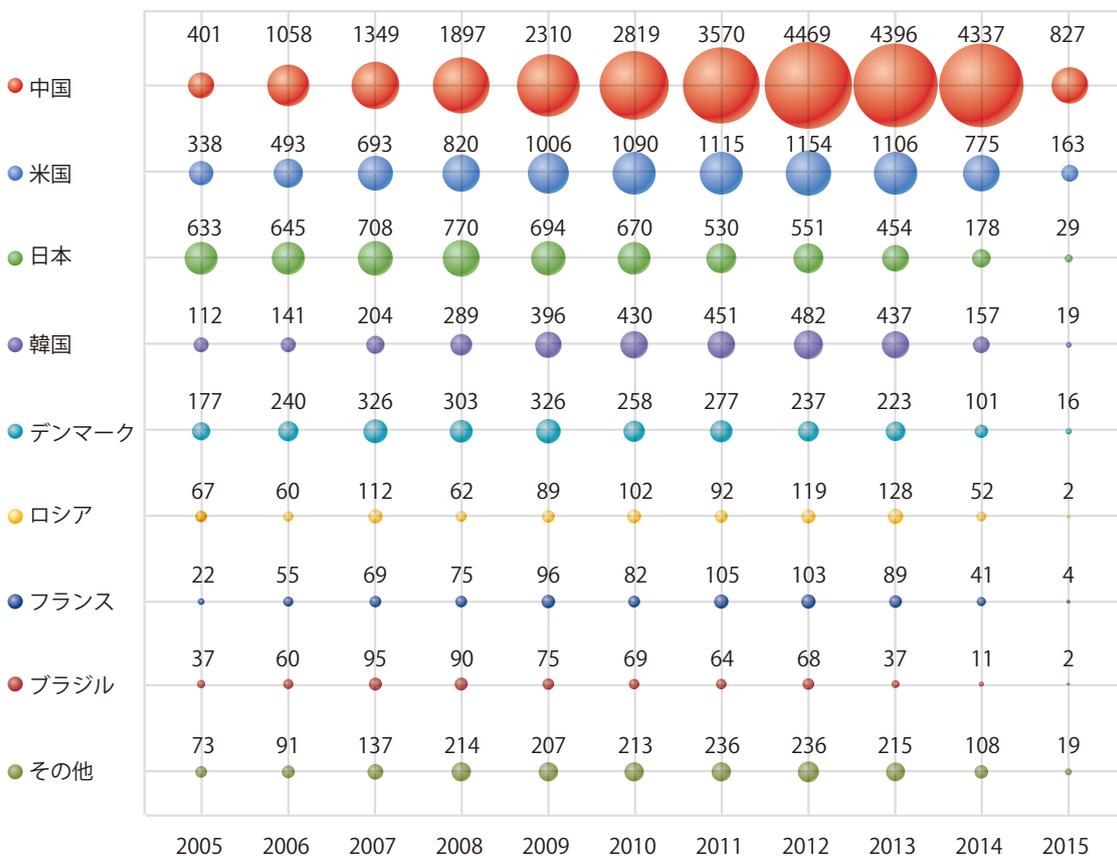


図7 出願人国籍別特許出願件数の経年変化

注) 2015年の値は未確定値

出所：NEDO「平成27年度出願特許における日本のポジションに関する情報収集」(2015)

次世代バイオ燃料分野の技術戦略策定に向けて

図8に、バイオ燃料関連の要素技術についての特許出願人国籍別特許出願件数を示す。日本はおおむね第3位である。

(2) 論文

図9に、バイオ燃料関連の要素技術に関する論文発表件数の経年変化を示す。藻類由来液体燃料製造技術に関する論文発表件数が顕著に伸びていることがわかる。



図8 バイオ燃料関連技術に関する出願人国籍別特許出願件数

出所：NEDO「平成27年度出願特許における日本のポジションに関する情報収集」(2015)

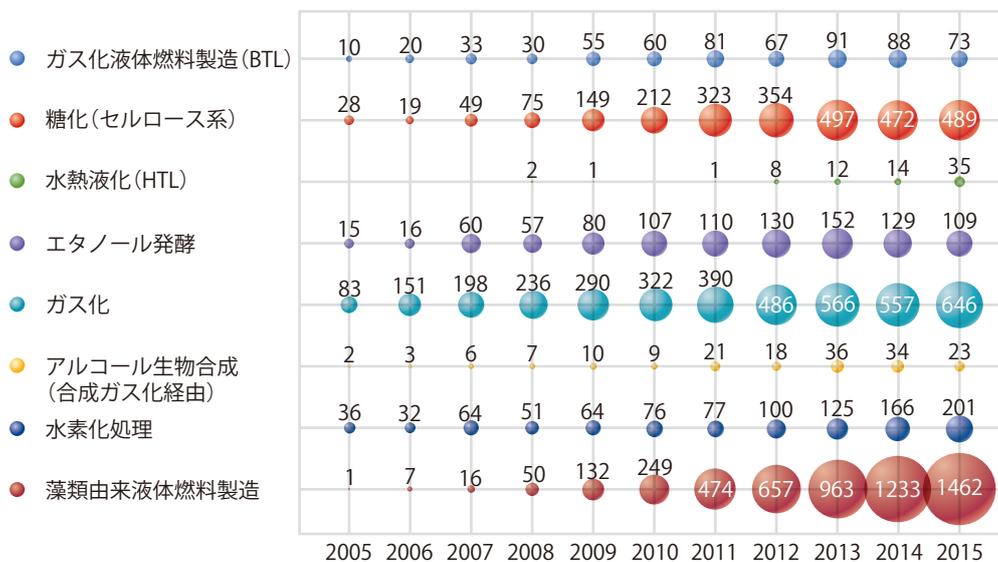


図9 バイオ燃料関連技術に関する論文発表件数の経年変化

出所：Web of Science™, InCitesでの検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成 (2017)

次世代バイオ燃料分野の技術戦略策定に向けて

伸び率の多い藻類由来液体燃料製造及びガス化の論文発表件数に関して、国別の経年変化を図10、図11に

示す。日本は、2005～2015年の総計では、藻類由来液体燃料製造技術で第8位、ガス化技術で第3位である。

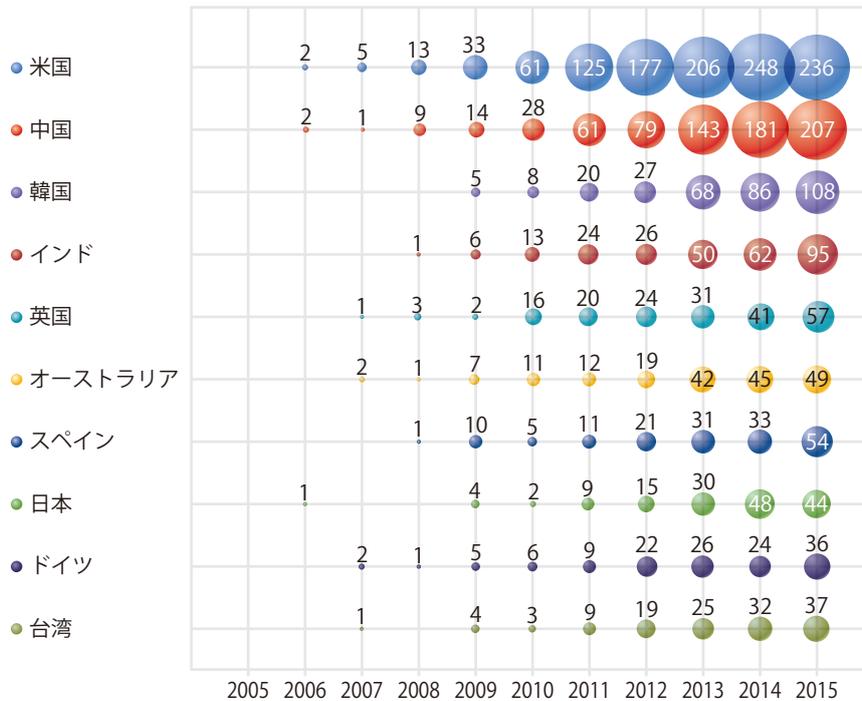


図10 藻類由来液体燃料製造技術に関する論文発表件数の経年変化
出所：Web of Science™, InCitesでの検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2016)

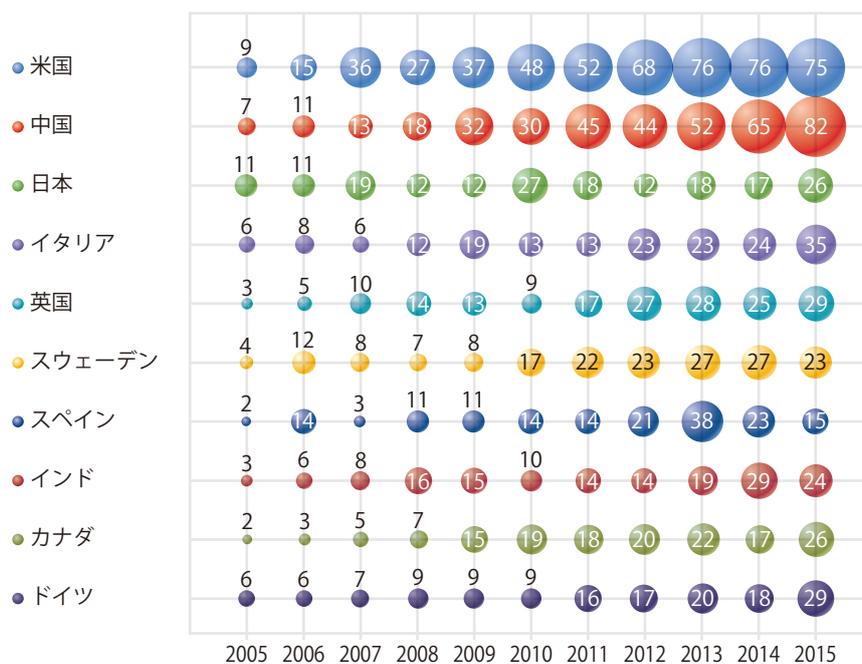


図11 ガス化技術に関する論文発表件数の経年変化
出所：Web of Science™, InCitesでの検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2016)

次世代バイオ燃料分野の技術戦略策定に向けて

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技術

次世代バイオ燃料は、原料種別に対応する技術を組み合わせて製造される。以下に各種製造方法を整理した。

(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技術A) 糖化発酵アルコール経由次世代バイオ燃料製造技術
(ATJ)

本プロセスでは、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
技術 (STJ)

本プロセスでは、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。米国の Amyris 社などが開発を進めているが、国内では研究開発段階にあり、実証段階にはない^{※26}。

C) ガス化 FT 合成による次世代バイオ燃料製造技術

本プロセスでは、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^{※27}、バイオマスの規模感に合わせた設備は商用化されていない。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由による次世代バイオ
燃料製造技術

本プロセスでは、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、前述した ATJ プロセスと同様である。アルコールを製造するまでの技術については、米国の Lanzatech 社、Ineos 社などが、それぞれ廃ガス（合成ガス）やセルロース系バイオマスを原料としたプレ商用プラントを稼働させている。

E) ガス化高分子中間体生物合成経由次世代バイオ燃
料製造技術

本プロセスでは、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。現時点では当該プロセスは実用化されておらず、技術シーズも少ない。

※26 燃料の生産を目的とした取組は少ないが、生物発酵技術を用いたバイオマスの化学品製造の取組は多く行われている。

※27 例えば 2007 年稼働の Qatar Petroleum 社、Sasol 社、Chevron 社らの GTL プラントは、32,400BPD (barrel per day) (5,151kl/日)、2011 年稼働の Qatar Petroleum 社と Shell Oil 社による 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」)

次世代バイオ燃料分野の技術戦略策定に向けて

F) 急速熱分解処理による次世代バイオ燃料製造技術

本プロセスでは、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。

(2) 微細藻類を原料とした次世代バイオ燃料製造技術

G) 油脂生産微細藻類を用いた次世代バイオ燃料製造技術

本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介する方法のほか、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技術

本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、ポトリオコッカス・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技術

本プロセスでは、高成長の微細藻類を、油脂等を代謝させずに生産し、それを水熱液化(Hydrothermal Liquefaction: HTL)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。油脂等を代謝させる必要がないため、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・廃ガス(合成ガス)を原料とした次世代バイオ燃料製造技術

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プロセスを経由し、炭化水素燃料製造技術を用いて、都市ごみ等から炭化水素燃料を製造する技術であり、原料がバイオマスではなく、都市ごみ等の廃棄物である点が異なる(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技術

本プロセスでは、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。この方法を用いて、商用フライトへ一部利用するなどの実証事業が各国で進められている。

メチルエステル化処理については、バイオディーゼル製造技術として商用段階にある技術であるとともに、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製造技術である。

次世代バイオ燃料分野の技術戦略策定に向けて

なお、上記の手法のほか、脂肪酸メチルエステルを介さ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。

3-2 次世代バイオ燃料の製造技術の課題

次世代バイオ燃料の製造には、従来型バイオ燃料（バイオエタノール及びバイオディーゼル）製造よりも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二酸化炭素排出削減効果及び経済性の観点などから課題を有する。そのため現在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。

なお、現時点ではどのプロセスも十分な経済性試算がされていないため、今後それぞれのプロセスがどの程度の経済性に到達し得るか、また、どのプロセスに優位性があるかを検証していくことも必要である。

(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技術

A) 糖化発酵アルコール経由次世代バイオ燃料製造技術 (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技術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。また、これらの設備に、アルコールを炭化水素燃料に変換するための設備（高分子の炭化水素燃料に重合するための設備等）が追加されるため、安価なアルコール製造及びアルコールから炭化水素燃料への変換技術が必要となる。

B) 糖化発酵高分子中間体経由次世代バイオ燃料製造技術 (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。

C) ガス化FT合成による次世代バイオ燃料製造技術

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進められてきており、今後は一貫プロセスでの収率及び経済性の向上等が重要となるとともに、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路による次世代バイオ燃料製造技術

A)のプロセスと同様に、エタノール等のアルコール製造技術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。

E) ガス化高分子中間体生物合成経路次世代バイオ燃料製造技術

本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。

F) 急速熱分解処理による次世代バイオ燃料製造技術

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) 微細藻類を原料とした

次世代バイオ燃料製造技術

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。

次世代バイオ燃料分野の技術戦略策定に向けて

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。

(3) 都市ごみ・廃ガス（合成ガス）を原料とした 次世代バイオ燃料製造技術

既存のガス化、FT合成技術等を用いるが、都市ごみ等を想定した設備（原料性状及び規模）の開発が必要である。

また、現時点では十分な経済性試算がされておらず、どの程度の経済性に到達し得るかの検証も必要である。

(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技術

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。

3-3 次世代バイオ燃料の標準化に向けた 取組の重要性

ASTM国際標準によるバイオジェット燃料規格のASTM D7566は、現在はバイオジェット燃料を製造する上で必要不可欠な規格となりつつある。そのため、バイオジェット燃料製造技術の確立に向けては、開発した製造技術が既存の規格に適合するかどうか、また新たな製造方法に当たる場合は、同規格へ申請、認可（ANNEXへの追記）が必要となる。

開発した技術の商用化に向けては、これら国際標準を定める機関との調整も重要となる。また、同規格への申請手続には相当量の試験用燃料を実際に製造する必要がある。そのため、技術研究開発と並行して、認証取得に必要な数量の燃料を製造できるよう、試験的な取組段階からその生産規模にも留意するなど、当該規格への国際認証の取得を踏まえた取組を含めることが重要である。

4章 おわりに

世界の航空輸送業界は、今後も拡大する航空需要予測を背景に、地球温暖化対策や石油価格変動に対するリスクヘッジの確保が業界としての大きな課題となっている。ICAOやIATAが掲げている2050年の二酸化炭素排出削減目標(2009年比半減)の達成に、バイオジェット燃料は不可欠である。また、バイオジェット燃料の製造コストが十分経済的になれば、石油価格変動に対するリスクヘッジとしても有効である。

一方で、現状次世代バイオ燃料は、いまだ商用化段階にはなく、コストも極めて高い。また、その製造方法についても多種多様であり、経済的に優位性のある製造方法が出されておらず、実用化に向けては、製造にかかるエネルギー収支や二酸化炭素排出削減効果を改善し、かつ、スケールメリットを含めて経済性が成立する製造技術の開発が必須となる。

こうした中、NEDOでは、「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業」(平成22年度～平成28年度)において、2030年頃の実用化を目指した次世代バイオ燃料製造技術の開発に取り組み、実用化の見通しが比較的高い要素技術を見いだした。

今後は、一貫製造プロセスにおけるパイロットスケール試験を行い、要素技術開発成果の確認と実用化に向けた取組を進めるとともに、これら以外の新たなプロセスの創出にも取り組んでいくことが重要である。また、これらの取組において、国際規格への対応を考慮していくことも重要である。

技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight Vol.21

次世代バイオ燃料分野の技術戦略策定に向けて

2017年11月1日発行

TSC Foresight Vol.21 次世代バイオ燃料分野 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 川合 知二

■ センター次長 矢島 秀浩

■ 再生可能エネルギーユニット

・ユニット長 矢部 彰

・統括研究員 板倉 賢司

・研究員 米倉 秀徳 (2017年8月まで)

上野 伸子

中村 茉央 (2016年4月まで)

森 則之

江川 光

吉田 卓生

・フェロー 黒沢 厚志 一般財団法人エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 部長

● 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。
<http://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。