

第1章 バイオ液体燃料の持続的な生産・利用システムの構築に向けて

表1 実用例があるバイオ液体燃料の原料や主成分、性状、用途、規格

液体燃料	主な原料	主成分(炭素鎖長)	沸点範囲(目安), 性状	主な用途	規格(国際標準)
バイオエタノール	サトウキビ, トウモロコシ, 糖蜜, セルロース系バイオマス	C2 アルコール	78℃, オクタン価 108-110	ガソリン代替 (E10 / E20 / E85), SAF (ATJ) の原料	ASTM D4806 (燃料用エタノール), 混合燃料 ASTM D4814 (ガソリン)
バイオブタノール	糖含有物(糖蜜, トウモロコシ, キャッサバ, セルロース糖化液)	C4 アルコール	118℃, オクタン価 96-105	ガソリン代替, SAF (ATJ) の原料	明確な専用規格なし, 混合燃料 ASTM D4814 (ガソリン)
バイオディーゼル (FAME)	植物油, 廃食油, パーム脂肪酸残渣 (PFAD), 動物油	C16-18 脂肪酸メチルエステル	330-360℃, セタン価 50-65	ディーゼル代替 (B5 / B20)	EN 14214 / ASTM D6751, 国内 FAME 燃料規格 JIS K2390
再生可能ディーゼル (RD/HVO)	植物油, 廃食油, パーム脂肪酸残渣 (PFAD), 動物油	C15-18 パラフィン(炭化水素)	180-360℃ (軽油留分), セタン価 70-90	ディーゼル代替(完全互換)	EN 15940 / ASTM D975 (軽油扱い), 国内 JIS K2204 (軽油) 適合すれば使用可
持続可能航空燃料 (SAF)	廃食油 (HEFA), バイオエタノール・ブタノール (ATJ), 木質/バイオガス化 (G/FT)	C8-16 パラフィン(炭化水素)	150-250℃ (ジェット留分)	ジェット燃料代替	ASTM D7566 (SAF), 混合後: ASTM D1655 (Jet-A), 国内 ASTM D7566 (SAF) を採用し導入許可
パイロシス油 (Bio-oil/Pyrolysis oil)	木質バイオマス, 農業残渣, 廃材	含酸素化合物混合物(多成分)	広範囲/混合物 酸性・含水率高, 安定性低, ディーゼル用途不可	重油代替燃料, HVO や SAF の原料(精製が必要)	ASDM D7544 (ボイラー用), 輸送燃料としての規格なし, 国内燃料規格なし

スモ石油は 2024 年度に年間 3 万 kL, 出光興産は 2028 年に年間 25 万 kL の生産能力を目指したプラント計画を進めている⁴⁾。ただし, 廃食油は安定確保が困難なため, いずれの企業も廃食油以外の原料からの SAF 製造技術の併用を検討している。

さらに, バイオ液体燃料の製造では, 製造する燃料ごとに品質規格を満たすことが必須である。広く利用されているバイオ液体燃料には, 国際的な基準(アメリカ・国際規格 ASTM や欧州規格 EN) が定められている。品質規格の厳しさは, 燃料に要求される安全性や使用条件に応じて異なる。最も厳しいのはジェット燃料であり, 極低温(-50℃以下)でも凍結しないこと, 長時間飛行でも酸化劣化しないこと, 不純物を含まないことが要求される。次はガソリンであり, 揮発性・爆発性が高いため, 蒸気圧やオクタン価が厳しく規定される。ディーゼル燃料(軽油)は,

バイオ液体燃料の最新動向

表1 ガソリン, バイオエタノール, ETBE の性状比較

	ETBE	ガソリン	エタノール
組成	$(\text{CH}_3)_3\text{COC}_2\text{H}_5$	$\text{C}_4\sim\text{C}_{12}$	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$
分子量	102	100~105	46
酸素濃度, wt%	15.7	0	34.7
比重	0.740	0.72~0.78	0.789
沸点, °C	72	30~220	78
蒸気 (RVP) kPa	28	44~78	16
水との相溶性 wt%	1.2	ほぼなし	100
真発熱量, kJ/kg	35.2	44.0	26.8
オクタン価 (RON)	118	90または100	111

記の条件を満足していることがわかる。

4.3 ETBE 方式によるバイオエタノールの導入

ブラジルやアメリカではバイオエタノールをガソリンに直接混合して使用する方法が用いられている。一方、欧州ではバイオエタノールを直接ガソリンに混合するのではなく、ETBE (Ethyl Tertiary-butyl Ether) という物質に一旦変換したあと、ガソリンに混合する方法が採用されており、わが国の石油会社も現在はこの方法を採用している。

わが国や欧州で ETBE を採用している理由は、以下の利点があるからである。

- ・エタノールをガソリンに直接混合する方法より、車両部品に対する悪影響が少ない
- ・直接混合をした場合に発生する蒸気圧上昇という現象が発生しない
- ・水への溶解度が小さく、貯蔵中の水による品質変化や漏洩時の地下水汚染が少ない
- ・オクタン価向上剤として使われる MTBE の製造装置を若干改良するだけで、容易に ETBE を製造することができる

図3に ETBE とガソリンの化学構造を示すが、両者は非常によく似た構造を持つことが分かる。このため、バイオエタノールをガソリンに直接混合した場合よりガソリン品質に与える影響

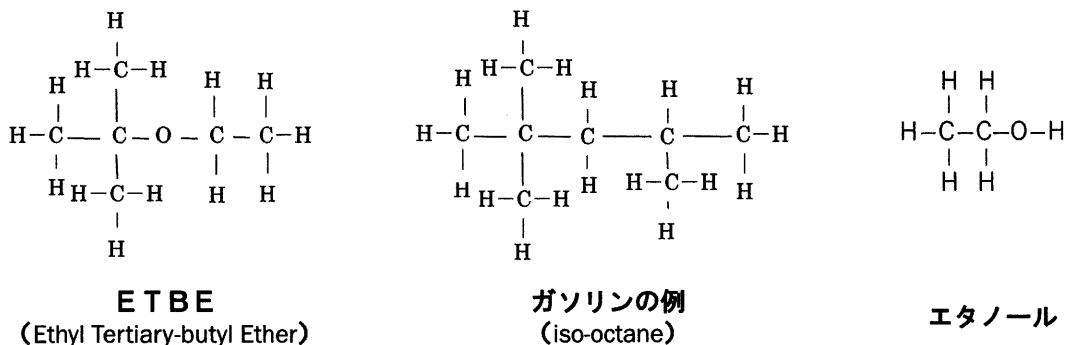


図3 ETBE とガソリン, エタノールの化学構造式の比較

バイオ液体燃料の最新動向

表1 バイオ燃料生産への利用が期待される微細藻類の特徴と遺伝子改変

藻名	分類	主な貯蔵 油脂	併産が期待さ れる有用物質	主な遺伝子改変技術	改変によって油脂蓄積が増加 した遺伝子
Botryococcus ボトリオコッカス	緑藻	ボトリオ コクセン	ボトリオコッ セン	—	—
Chlorella クロレラ	緑藻	TAG	タンパク質, ルテイン	RNAi 過剰発現 CRISPR/Cas9	FAD3
Dunaliella ドナリエラ	緑藻	TAG	β -カロテン	RNAi 過剰発現 CRISPR/Cas9	—
Euglena ユーグレナ	ユーグレ ナ藻	ワックス エステル	パラミロン	CRISPR/Cas9	—
Nannochloropsis ナンノクロロプシ ス	不等毛藻	TAG	EPA	相同組み換え RNAi 過剰発現 TALEN CRISPR/Cas9	DGAT, GPAT, GPDH, UGPase, UGDH, HLH, bZIP, ZnCys, SPX2, BGS
Phaeodactylum フェオダクチラム	不等毛藻	TAG	EPA, フィコキサン チン	RNAi 過剰発現 メガヌクレアーゼ TALEN CRISPR/Cas9	DGAT, AGPAT, GPDH, TE, ME, UDPase, TES
Synechococcus, Synechocystis シネココッカス, シネコキステイス	ラン藻	—	フィコシアニ ン	相同組み換え RNAi 過剰発現 CRISPR/Cas9	Aas, galp1 または galp2, rndAB

表中に略語で示した遺伝子名とその改変について著した文献については本文を参照。

Botryococcus (ボトリオコッカス)

細胞外マトリックスが発達しており遺伝子導入が難しいこと、群体を形成しているため異なる変異の細胞が混在するコロニーになってしまうなどの問題点があり、遺伝子改変技術の確立は進んでいない。近年、簡便な方法で単一細胞を回収し、遺伝的に均質なコロニーを再生させる手法¹⁵⁾が報告されており、ボトリオコッカスの遺伝子改変技術の発展が期待される。

Chlorella (クロレラ)

細胞壁が厚く導入効率が低いいため、プロトプラスト化や細胞壁透過性を高める前処理が必要であるが、遺伝子導入は以前から行われていた¹⁶⁾。CRISPR/Cas9 を用いたゲノム編集は2020年に初めて報告され、 ω 3 不飽和化酵素 (FAD3) のゲノム編集によって油脂含有量が46%増加した¹⁷⁾。

Dunaliella (ドナリエラ)

ガラスビーズ法¹⁸⁾、パーティクルガン法¹⁹⁾、エレクトロポレーション法²⁰⁾などを用いた形質転換が可能で、遺伝子導入やRNAiによる発現抑制などが行われてきた。改変のターゲットはカロテノイド合成系が多く、2021年にCRISPR/Cas9を用いた β -カロテン水酸化酵素のゲノム編

2.2.5 油脂原料 SAF のプロセスライセンス

世界の主な油脂原料 SAF のプロセスライセンスは UOP/Eni (Ecofining), Topsoe (HydroFlex), Neste (NExBTL), Axens (Vegan) 等である (表6)。

表6 油脂原料 SAF プロセスライセンス

ライセンス	プロセス	日本での採用
UOP/Eni	Ecofining TM	コスモ石油 (堺), IHI
Neste	NExBTL TM	伊藤忠が独占販売
Topsoe	HydroFlex TM	
Axens	Vegan TM	ENEOS
Chevron	ISOTERRA	ユーグレナ

2.3 バイオアルコール原料

2.3.1 バイオエタノール

バイオエタノールは欧米ではガソリンブレンド (E10) として用いられているが, EV の普及によりガソリンブレンドの需要が減ることと, SAF 原料とすることにより付加価値が上がるために今後は SAF 向けの需要が増加すると予想される。

2.3.2 バイオエタノールから SAF (ETJ) の製造

(1) LanzaJet ATJ プロセス

米国の LanzaJet 社は PNNL (Pacific Northwest National Laboratory) とエタノールから SAF (ETJ) の製造プロセスを共同開発し, 米国ジョージア州フリーダムにおいて, バイオエタノールから 1,000 万ガロン (約 3.8 万 kL)/年の SAF と再生可能ディーゼルの生産を 2024 年 1 月に開始したが, 機器トラブルで 2025 年秋に稼働を始める予定である。最初はブラジル産のバイオエタノールが用いられるが, 米国产のバイオエタノールに切り替えられる予定である。三井物産や日本全日空 (ANA) も参加している。エタノールのエチレンへの脱水は Technip Energies の Hummingbird[®] 技術を用いている。エチレンの最初の二量化は Ni/SiO₂-Al₂O₃ 触媒を用い, 85℃, 300 psig で行われる。エチレンの転化率は 97%, C₄ は 72%, C₆ は 24%, C₈ は 4%, C₁₀+ は < 1% 得られている。二段目の二量化は H-β 触媒を用い, 250℃, 300 psig で行われ, 水素化分解/異性化は Pt/ゼオライトが用いられている。C₈+ 収率は 70%, C₁₀+ 収率は 48% である。SAF 90~75%, Diesel 10~25% が得られている (図6)⁶⁾。

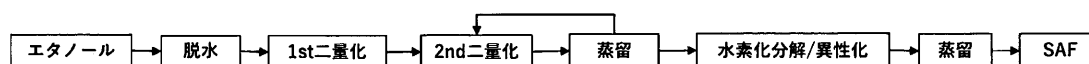


図6 LanzaJet のエタノールから SAF の製造スキーム