

脱炭素化の鍵となる液体燃料のカーボンニュートラル化

～ バイオ燃料・合成燃料の現状と課題 ～

株式会社 野村総合研究所
サステナビリティ事業コンサルティング部
シニアコンサルタント 山口 諒



1 はじめに

地球温暖化対策は世界各国の喫緊の課題であり、2050年までのカーボンニュートラル（CN）社会の実現に向けて、エネルギーシステムの抜本的な転換が求められている。化石燃料に大きく依存してきた従来のエネルギー構成を、再生可能エネルギー（以下、再エネ）などを取り入れた低炭素・脱炭素型のエネルギーミックスへと移行させることが不可欠である。

この脱炭素化の潮流のなかで、液体燃料のCN化が注目を集めている。液体燃料は、運輸部門をはじめ、産業部門や家庭部門など、あらゆる分野で広く利用されている。その高いエネルギー密度と利便性から、電動化や他の代替燃料への転換が困難な用途も多い。したがって、液体燃料そのものを低炭素化・脱炭素化することが、CN達成に向けた重要な鍵となる。

液体燃料のCN化には、主に二つのアプローチがある。一つは、バイオマス資源を活用したバイオ燃料、もう一つは、再エネ由来の水素と回収したCO₂から製造する合成燃料である。これらのCNな液体燃料は、既存のインフラや内燃機関（ICE：Internal Combustion Engine）を活用しつつ、化石燃料からの転換を進められる点に大きな利点がある。

本稿では、このような認識のもと、液体バイオ燃

料・合成燃料に焦点を当てる。これらの燃料の現状と直面する課題、将来の普及見通しについて考察を深めることで、CN社会の実現に向けた具体的な道筋を探ることを目的とする。

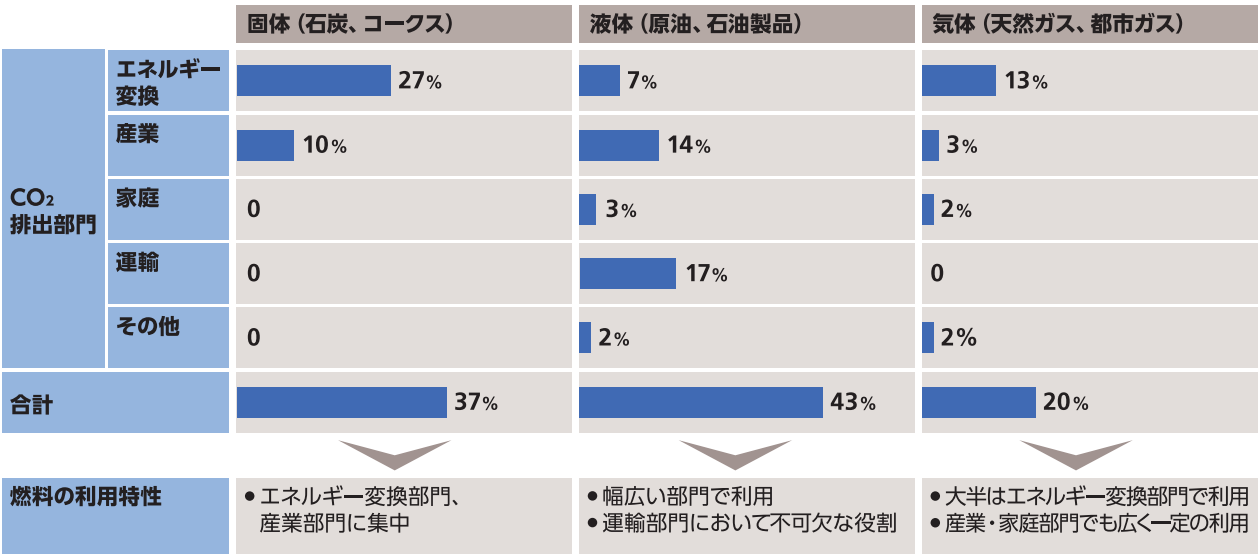
2 液体燃料の脱炭素化

1) 液体燃料の特性

まず、液体燃料の主な用途や脱炭素化における特徴について、他の燃料種との比較を通じて考察する。化石燃料はその物理的状態によって、石炭などの固体燃料、石油などの液体燃料、天然ガスなどの気体燃料に大きく分類される。図表1を見ると、固体・気体燃料に比べ、液体燃料はその利用範囲が多岐にわたっており、また日本におけるCO₂排出量に占める割合も大きいことが分かる。したがって、液体燃料の脱炭素化は、CNの実現に向けた重要な取り組みであるといえる。液体燃料の主な用途は、運輸部門におけるガソリン（乗用車・小型トラック）、ディーゼル（大型トラック・船舶）、ジェット燃料（航空機）である。他にも、エネルギー転換や産業部門でも残渣（ざんさ）油などが使用されている。

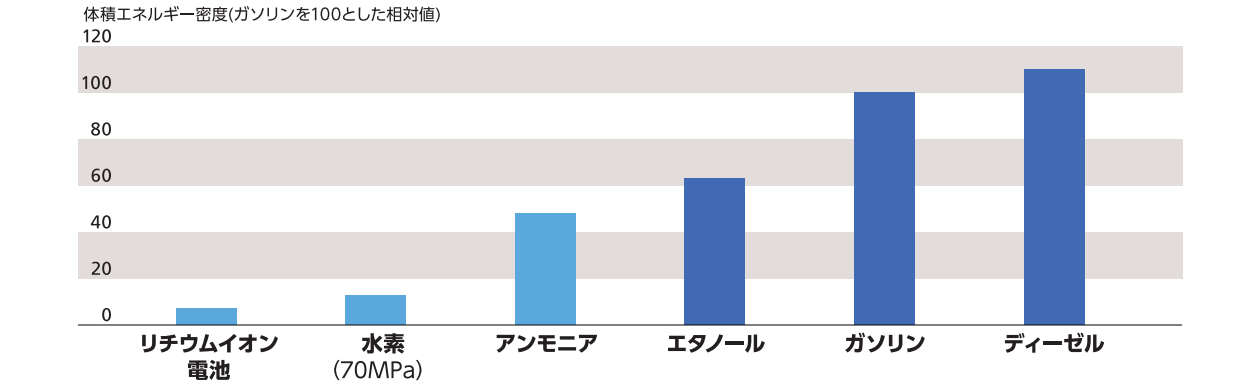
燃料用途の脱炭素化のアプローチは、燃料の使用量を削減する以外に、①電動化や水素・アンモニアへの転換のように、従来の化石燃料を利用しない形態へと切り替える手法と、②従来の化石燃料と同様

図表 1 国内における 2022 年度の各化石燃料別・用途別 CO₂ 排出比率



出所) 経済産業省「総合エネルギー統計」「2050 年カーボンニュートラルを見据えた 2030 年に向けたエネルギー政策の在り方」等をもとに NRI 作成

図表 2 蓄電池ならびに代表的な燃料種の体積エネルギー密度



出所) NRI 作成

の性質を有する CN な燃料の使用に切り替える手法の二つに大別される。燃料種や用途に応じてこの二つのアプローチを組み合わせることで、社会の CN 化が達成される。

液体燃料の脱炭素化においては、②のアプローチが特に重要である。液体燃料は、輸送における利便性やエネルギー密度の高さ（図表 2）から、電動化や水素・アンモニア等の代替燃料への転換が困難な用途が多いためである。

例えば、ジェット燃料やディーゼルを燃料とし

て使用する航空機や大型トラックなどにおいては、バッテリーや燃料電池の重量・スペース制約から電動化や代替燃料への切り替えは特に難易度が高い。また、長距離・重量貨物輸送では、充電・燃料補給インフラ整備も大きな課題となる。こうした用途では、液体燃料の利便性を維持しつつ、化石燃料由来の液体燃料を同様の性質を有する CN な液体燃料に置き換えていくことが、脱炭素化の有力な方策になる。

2) CN な液体燃料

CN な液体燃料には、バイオ燃料、合成燃料、オフセット燃料の三つの燃料種が存在する。これらの燃料は、燃焼時に大気中の CO₂ を追加的に増加させないという特性を有している。

バイオ燃料は、主に植物由来の原料（バイオマス）から製造される燃料である。植物は成長過程で光合成によって大気中の CO₂ を吸収するため、バイオ燃料の燃焼で放出される CO₂ は、植物が成長過程で吸収した CO₂ とみなすことができる。つまり、バイオ燃料の利用は、大気中の CO₂ 濃度を追加的に増加させない炭素循環を形成しており、CN な燃料と位置づけられる。

合成燃料は、排気ガスまたは大気中から回収した CO₂ と水素を合成して製造される。バイオ燃料と同様に、燃焼時に CO₂ は放出されるものの、それは製造時に回収した CO₂ であるため、大気中の CO₂ 濃度を追加的に増加させない。したがって、合成燃料も CN な燃料と分類される。

一方、オフセット燃料は、化石燃料の燃焼によって発生する CO₂ 排出量を、CCS（Carbon dioxide Capture and Storage：二酸化炭素回収・貯留）やカーボンクレジット^{※1}の購入によってオフセットすることで、実質的に CN とする燃料である。そのため、原料から製造、使用に至る燃料のライフサイクルにおいて CN を実現するバイオ燃料・合成燃料とは根本的に性質が異なる。オフセット燃料は、燃料自体は従来の化石燃料そのものであり、炭素循環モデルとしての持続可能性や、付与されるカーボンクレジットの実効性・信頼性には議論の余地がある。

以上より、CN な液体燃料としては、バイオ燃料・合成燃料が主要な選択肢となっていく可能性が高い。次章以降では、これらの液体燃料に焦点を当て、それぞれの現状と課題について論じていく。

3 液体バイオ燃料の動向

1) 液体バイオ燃料の原料と製造フロー

液体バイオ燃料は、製造に用いる原料の種類によって、第1世代、第2世代、第3世代に分類される。

第1世代バイオ燃料は、食用作物（トウモロコシ、サトウキビ、大豆等）を原料としたものであり、バイオエタノール、バイオディーゼルの一種である FAME（Fatty Acid Methyl Ester：脂肪酸メチルエステル）^{※2} が代表的である。バイオエタノールは、糖質・でんぷん質原料を発酵・蒸留することで製造される。一方、FAME は、大豆油やパーム油などの植物油を、触媒下でメタノールとエステル交換（HEFA：Hydroprocessed Esters and Fatty Acids）することによって製造される。

また、バイオエタノールへの ATJ（Alcohol to Jet）技術^{※3}の適用や、植物油への水素化処理の適用によって、バイオジェット燃料（SAF：Sustainable Aviation Fuel）や、HVO（Hydrotreated Vegetable Oil：水素化植物油）の製造も可能である。HVO は、ディーゼルと同等の組成を持ち、完全なドロップイン燃料として注目されている。

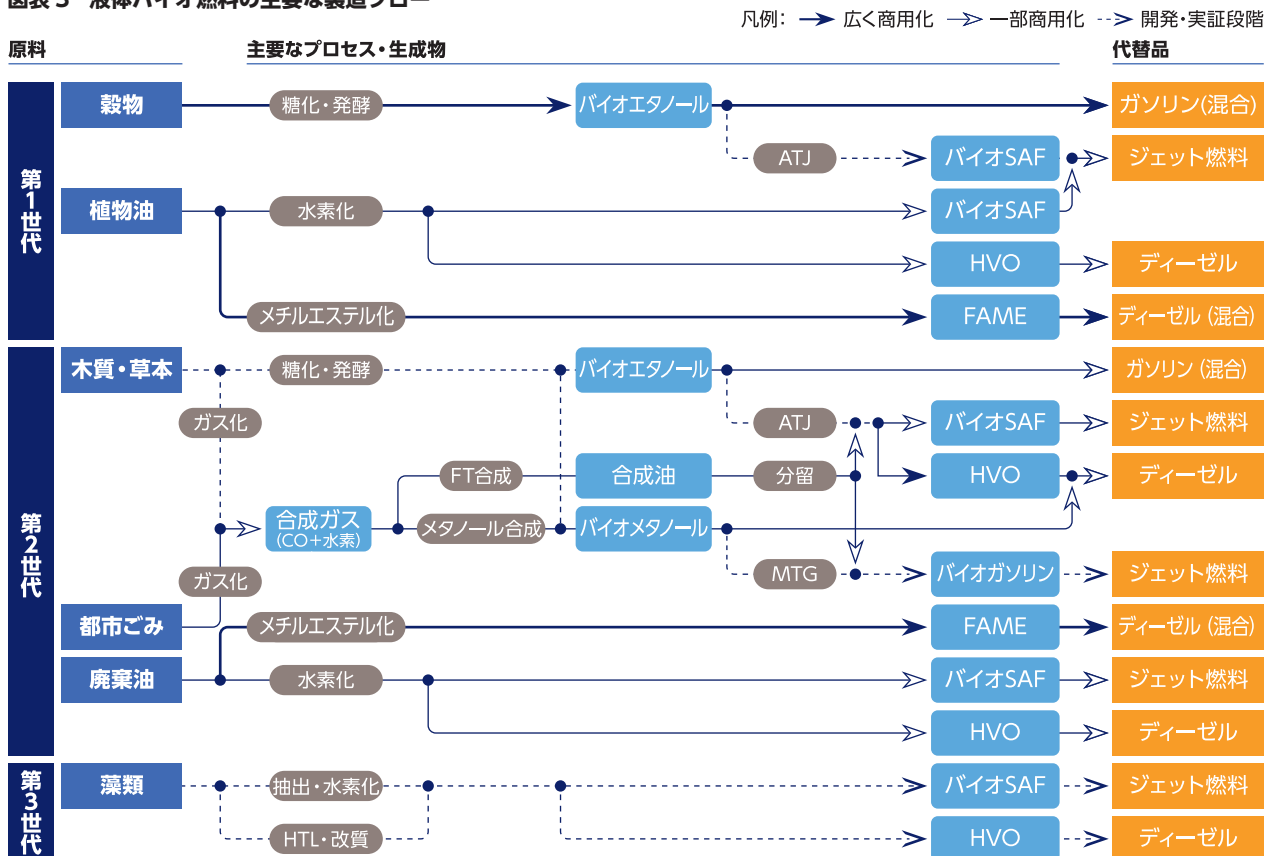
第2世代バイオ燃料は、非食用バイオマス（木質、草本、廃棄物等）を原料とする。第1世代の製造フローと比較した際の主な差異は、水素と一酸化炭素（CO）の合成ガスを經由する製造ルートが検討されている点である。この手法では、エタノールや SAF だけでなく、メタノールなどの多様な製品が得られ

※1 CO₂ 排出削減価値を証書化したもの

※2 FAME は従来の化石燃料とは根本的に組成が異なり、高濃度での利用は機器の不具合の原因となるため、ディーゼルとの混焼が前提となる

※3 アルコール（エタノール）を原料に、触媒反応を通じてジェット燃料を製造する技術・プロセス

図表3 液体バイオ燃料の主要な製造フロー



出所) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)「次世代バイオ燃料分野の技術戦略策定に向けて」(2020年7月)等をもとにNRI作成

る。さらに、メタノールからMTG(Methanol to Gasoline)技術^{※4}を用いてバイオガソリンを製造することも可能である。

第3世代バイオ燃料は、微細藻類を原料とした燃料であり、主にSAFやHVOが製造される。製造工程においては、まず開放池または閉鎖系のフォトバイオリアクターで培養した微細藻類から、水熱液化法(HTL:Hydrothermal liquefaction)などによって藻類油が抽出される。その後、抽出した藻類油を水素化処理・改質することによってSAFやHVOを得ることができる。

2) 液体バイオ燃料の普及における課題

バイオ燃料の普及には、いくつかの課題が存在する。まず、第1世代バイオ燃料に固有な課題として

は、食料競合や間接的土地利用変化(ILUC)^{※5}に対する対応が挙げられる。トウモロコシやサトウキビ等の食用作物の燃料利用は、食料価格の高騰や食料不足を招く恐れがある。また、バイオ燃料の原料

※4 メタノールを原料に、触媒反応を通じてガソリンを製造する技術・プロセス

※5 ある地域の土地利用の変化が、他の地域の土地利用の変化を誘発する現象を指す。例えば、ある地域でバイオ燃料原料の生産のために農地を拡大した結果、他の地域で食料や飼料の生産のために未開拓地が新たに開発されることが起こりうる。この間接的な土地利用変化は、温室効果ガスの排出量増加や生態系への悪影響をもたらす可能性があるため、持続可能性を評価する上での重要な要素とされている

栽培のために森林や草地を農地に転換する場合、かえってCO₂排出量が増加しうる。これらの問題から、第1世代バイオ燃料の持続可能性には限界があると考えられている。製造プロセスにおいても、ATJは実証段階の技術であり、触媒の活性・選択性の向上など今後の要素技術の改良が望まれる。

第2世代のバイオ燃料は、非食用原料を用いるため食料競合の問題は回避できるが、原料調達や前処理の高コスト化が課題となっている。木質・草本系バイオマスは、セルロース、リグニン等が強固に結合した複雑な構造を有するため、前処理に多大なエネルギーを要する。また、原料の収集・運搬コストも高く、サプライチェーン全体の最適化が必要とされる。また、ガス化プロセスを用いる場合、合成ガスからの液体燃料合成の効率向上も重要な課題である。

第3世代バイオ燃料は、高い油脂生産性と非可食原料であるという利点を持つが、大規模培養技術の確立と生産コストの低減が課題である。微細藻類の培養には、温度、光、pH、栄養塩類等の環境条件の最適化が重要であり、コンタミネーション（雑菌汚染）対策も必要である。また、培養設備や収穫・抽出設備の設置・運転コストが高いため、大幅なコスト低減が求められている。

これらの技術的・経済的課題に加えて、すべてのバイオ燃料に共通する課題として、持続可能性基準の策定と検証、ライフサイクルでのCO₂削減効果の評価などが挙げられる。バイオ燃料の持続可能性を担保するためには、原料の持続可能な調達、生物多様性の保全、水資源の管理、社会的影響の評価など、多面的な基準設定と検証が不可欠である。

4 液体合成燃料の動向

1) 合成燃料の原料と製造フロー

合成燃料が水素とCO₂から合成される燃料であることは前述した通りであり、原料となるCO₂には、工場や発電所の排ガスから回収（CCU：Carbon Capture and Utilization）したもの、または大気中から直接回収（DAC：Direct Air Capture）したものが用いられる。これらのCO₂と再エネ由来の水素を用いて製造した合成燃料は、特にe-fuelと呼ばれている^{※6}。合成燃料の代表例として挙げられるのは、合成SAF、合成ガソリン等である。

液体合成燃料の製造においても、前章で触れた液体バイオ燃料の製造と同様に、COと水素の合成ガスを経て種々の燃料を合成（FT合成：Fischer-Tropsch合成）するルートが有力視されている（図表4）。原料であるCO₂と水素から合成ガスを製造する際には、逆シフト反応という技術が用いられる。逆シフト反応は、CO₂と水素を高温で反応させ、COと水を生成する吸熱反応である。

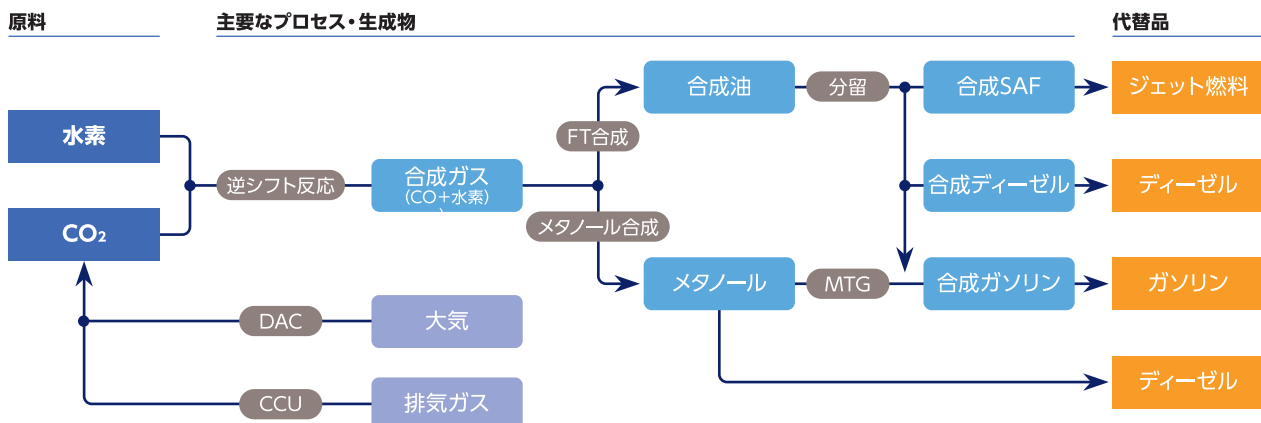
2) 液体合成燃料の普及における課題

合成燃料の普及における最大の課題は、製造コストの高さである。特に、原料である水素の製造コストが大きな影響を与えており、原料調達から製造まですべて国内で行う場合の製造コストは約700円/L、海外で製造し輸入する場合でも約300円/Lと試算されている^{※7}。これは、従来の化石燃料と比較すると数倍のコストであり、合成燃料の競争力を大幅に制約している。水素製造コストの低減に向けては、水電解技術の高効率化、再エネ電力コストの

※6 経済産業省「合成燃料研究会中間取りまとめ」2021年4月

※7 経済産業省「CN燃料普及のあり方について」2023年5月

図表 4 液体合成燃料の主要な製造フロー



出所) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 「グリーンイノベーション基金事業で CO₂ 等を用いた燃料製造技術の開発を加速」(2024 年 3 月) 等をもとに NRI 作成

低減、水素輸送・貯蔵技術の開発などの関連技術の進展が不可欠である。

もう一つの原料である CO₂ については、CO₂ 回収コストの低減だけでなく、国際的な排出コントロールの整備も重要な課題である。合成燃料の原料となる CO₂ を他国から輸入する場合、その排出量をどの国の排出量としてカウントするかといった問題がある。国際的に合意されたルールが不在の状況では、合成燃料の環境価値が適切に評価されない恐れがある。

また、合成燃料の製造・利用に伴うライフサイクル CO₂ 排出量の算定方法や、化石燃料との公平な比較方法なども、国際的な合意が必要である。こうしたルール整備を進め、合成燃料の環境価値を適切に評価・認証することが、普及拡大に向けた重要な基盤となるだろう。

5 液体バイオ燃料・合成燃料の将来展望

前章までに論じてきた液体バイオ燃料・合成燃料の普及時期を予測するには、技術的課題の解決見通しや、社会的受容性の醸成を考慮する必要がある。

また、各燃料の特性や用途に応じて、普及のタイミングや規模は異なると考えられる。図表 5 は、各液体 CN 燃料の普及時期の想定を示したものである。

ガソリン代替燃料としては、第 1 世代のバイオエタノールは既に商業化されており、2030 年代までは堅調な需要が見込まれる。しかし、食料競合や持続可能性の問題から、長期的な成長は限定的であると予想される。一方、非可食原料を利用する第 2 世代のバイオエタノールは、30 年代以降に本格的な導入が進むと考えられる。ただし、電動化の進行によってガソリン自体の需要が頭打ちになる可能性が高いため、40 年以降の普及量は横ばいとなるだろう。また、合成ガソリンの普及は、より付加価値が高い合成 SAF や合成ディーゼルに遅れて進行することが予測される。

ディーゼル代替燃料としては、FAME が既に商業化されているが、品質面の課題から今後の大幅な普及拡大は見込みにくい。一方で、HVO は、高品質なディーゼル代替燃料として、2030 年代に大型車両や船舶分野での普及が期待される。ただし、HVO はバイオ SAF と原料を共有するため、他の手段での代替がより困難であり付加価値が高い SAF

図表 5 主な液体バイオ燃料・合成燃料の普及拡大時期想定

凡例: ↑ 普及拡大 → 供給量横ばい ↓ 供給量低下

代替品	バイオ・合成燃料種	2020年代	2030年代	2040年代	2050年代	評価
ガソリン	第1世代バイオエタノール	↑	→	→	↓	• 既に商業化されているが、食料競合等の問題から長期的な成長は限定的
	第2世代バイオエタノール	—	↑	→	→	• 2030年代以降に普及が本格化するも、電動化進行による需要鈍化もあり伸びは限定的
	合成ガソリン	—	—	—	↑	• より付加価値が高い合成SAFや合成ディーゼルに遅れる形で普及
ディーゼル	FAME	↑	→	→	↓	• 既に商業化されているが、原料の持続可能性等の問題から長期的な成長は限定的
	HVO	↑	↑	→	→	• 需要は伸びるが、原料を共有するバイオSAFの拡大によって原料確保が課題となる可能性あり
	バイオメタノール	—	↑	→	→	• セルロース系原料からの製造技術の確立により、2030年代以降に普及が拡大
	合成ディーゼル	—	—	↑	→	• 合成SAF向けの水素の需給が安定化したのちに普及する見込み
ジェット燃料	第1・2世代バイオSAF	↑	↑	→	→	• 特に2030年代までは航空機の脱炭素手段が限られているため、バイオSAFの普及が急拡大
	第3世代バイオSAF	—	—	↑	↑	• 藻類利用における諸課題の解決時期は2030年後半以降となる見通し
	合成SAF	—	↑	↑	↑	• 水素の製造コストの低下とともに合成燃料のなかではいち早く普及が拡大

出所) NRI 作成

の普及拡大に伴って、原料確保が課題となる可能性がある。バイオメタノールや合成ディーゼルは、30年代後半から40年代にかけて普及が進むと予想されるが、合成ディーゼルについては安価な水素の社会普及が前提条件となる。

ジェット燃料代替燃料では、廃食油等を原料とした第1・2世代のバイオSAFの導入が、実需要の立ち上がる2020年代後半から30年代にかけて本格化すると予想される^{※8}。藻類を原料とした第3世代のバイオSAFは、現状は技術実証段階にあり、30年代後半以降の商業化が見込まれる。合成SAFについては、航空部門での大きな需要の立ち上がりが見込まれるため、水素製造コストの低下に伴って30年代後半から他の合成燃料よりも優先的に普及が進むと考えられる。

ただし、これらの普及見通しは、政策動向や社会情勢によって大きく変動する可能性がある。例えば、

カーボンプライシングの強化や、輸送部門での排出規制の拡大は、これらの燃料の導入を加速する要因となりうる。一方で、電動化技術のブレークスルーや、水素直接利用の進展は、これらの燃料の需要を減退させるリスクがある。液体バイオ燃料・合成燃料の普及を見通し、それによって生じる業界の変化にいち早く対応するためには、技術動向と政策動向を注視し、柔軟な戦略を立案していくことが求められる。

※8 国際民間航空機関 (ICAO) は、航空輸送分野における2024年以降のCO₂排出量を19年のCO₂排出量の85%に抑えることを目標として掲げており、27年からは日本を含むすべてのICAO加盟国に対し、原則としてCO₂排出削減が義務付けられる見込み

6 おわりに

本稿では、CN 社会の実現に向けて、液体バイオ燃料・合成燃料の果たす役割と将来展望について論じてきた。液体燃料は、その高いエネルギー密度、利便性、および既存インフラとの適合性により、運輸部門等において不可欠な役割を担っている。液体バイオ燃料・合成燃料は、この利便性と汎用（はんよう）性を維持しつつ脱炭素化を実現する有力な手段の一つであり、今後の導入拡大が期待される。

しかしながら、液体バイオ燃料・合成燃料の普及拡大には、サプライチェーン全体での協調が不可欠である。原料供給者、燃料製造者、輸送事業者、メーカー、政府などのステークホルダーが一丸となって、他国との連携も深めながら、原料調達の安定化、製造設備への戦略的な投資、必要な規制・支援策の導入などに取り組む必要がある。同時に、電動化や水素利用の進展次第では、これらの燃料の需要が減退するリスクもあることを念頭に置きつつ、柔軟かつ適応力の高い戦略を立てることが肝要である。

2050 年 CN の達成に向けて、液体バイオ燃料・合成燃料の果たす役割は極めて大きい。技術的な課題やコスト面での障壁を乗り越え、これらの燃料の可能性を最大限に引き出すことが、われわれに求められている。産官学が連携し、革新的な技術開発と社会実装に向けた取り組みを加速させることで、液体バイオ燃料・合成燃料が脱炭素化の切り札となることを期待したい。

（監修：稲垣 彰徳）

●…… 筆者
山口 諒（やまぐち りょう）
株式会社 野村総合研究所
サステナビリティ事業コンサルティング部
シニアコンサルタント
専門は、カーボンニュートラル、エネルギー
など
E-mail: r4-yamaguchi@nri.co.jp