



運輸部門の脱炭素化

—排出ネットゼロ社会に向けた自動車・船舶・航空機における燃料転換について—

株式会社H&Sエナジー・コンサルタンツ パートナー

石丸 美奈

目次

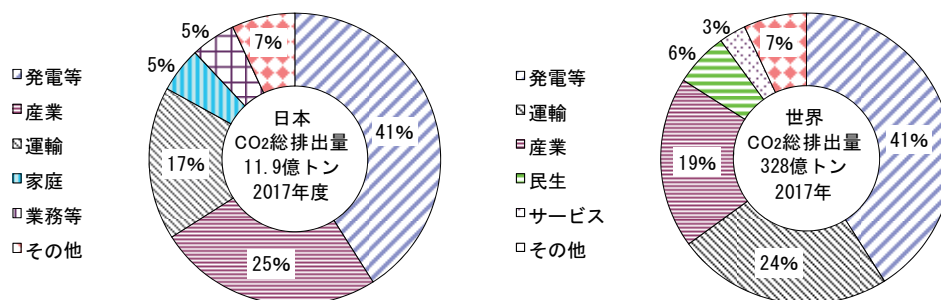
- | | |
|-----------------|-------------|
| 1. はじめに | 5. 船舶の脱炭素化 |
| 2. 運輸部門の脱炭素化の現状 | 6. 航空機の脱炭素化 |
| 3. バイオ燃料とeフューエル | 7. おわりに |
| 4. 自動車の脱炭素化 | |

1. はじめに

先進国の中では遅まきながら、日本政府もようやく本年10月、2050年までに温室効果ガス（GHG）排出ネットゼロの目標を掲げた。2017年度の日本のCO₂排出量（11.9億トン）の部門別内訳は、発電等が41%（4.9億トン）と最も多く、次いで産業部門25%（2.7億トン）、運輸部門が17%（2.1億トン）と続く。一方、世界では、CO₂排出量（328億トン、以下2017年）のうち発電等が41%（136億トン）、次いで運輸部門が24%（80億トン）と、19%

の産業部門（62億トン）を凌ぐ（図表1）。最大の排出量を占める発電部門での再生可能エネルギー（再エネ）導入拡大によるCO₂削減は必須であるが、今後は、削減がより難しい輸送や産業部門での脱炭素化がますます重要となり、現在、利用可能な技術や今後のイノベーションでCO₂を削減していかなければならない。本稿では、運輸部門での代替燃料として、脱炭素化への貢献が期待されるバイオ燃料とeフューエルについて、また、自動車、船舶、航空機における燃料転換の動向につい

（図表1）日本と世界の部門別CO₂排出量



（出所）日本は環境省「2017年度（平成29年度）の温室効果ガス排出量（確報値）について」2019年4月16日 <https://www.env.go.jp/press/111337.pdf>
 世界はIEA “CO₂ Emission from Fuel Combustion Highlights” 2019 <https://webstore.iea.org/co2-emissions-from-fuel-combustion-2019> を基に作成。

て概観する。

2. 運輸部門の脱炭素化の現状

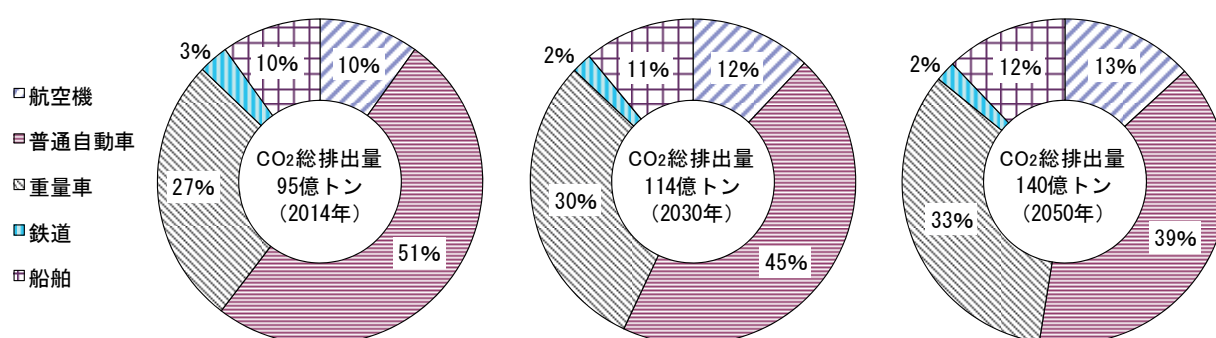
運輸部門では電気自動車（EV¹）の普及や水素燃料電池車（FCEV²）の実用化によるシステム転換（電動化）への努力が進められているが、現在のところ世界の同部門の最終エネルギー消費に占める再エネ電力の割合は0.3%に過ぎない（2017年）³。EVやFCEVは走行中（Tank to Wheel, TTW）のCO₂排出量を0にはできるが、普及がどんなに進んでも、燃料となる電気や水素が製造される過程を含めた全体（Well to Wheel, WTW）でのゼロエミッション化が進展しなければ2050年目標の達成は難しい。

また、運輸部門のCO₂排出量の種別内訳を見てみると、乗用車から排出されるCO₂が全体の半分で最大となっているものの、重量車（トラック、バス、特殊車両など）からの排出は3割、船舶や航空機も各々1割を占めて

いる（図表2）。乗用車と比較して、重量車や船舶（主に国際船舶）、航空機には大出力と長い航続距離が必要とされる。しかし現行のリチウムイオン電池はガソリンと比べて重量当たりのエネルギー密度も体積当たりのエネルギー密度も数十分の一と低い。これを搭載しようとする、電池は非常に重くまた大きなスペースを占めることになり、電動化は困難だ。開発途上の全固体リチウムイオン電池や、さらに革新的な蓄電池⁴、そして燃料電池を含む水素関連技術が確立し、コストが十分下がり、燃料供給の新たなインフラが整うまで、乗用車や小型商用車以外では電動化による排出削減が進まないことになる。

従って、運輸部門の脱炭素化を進めるには、それぞれのモビリティの特性や用途に合わせた対応が必要だ。化石燃料を使用する内燃機関（エンジン）や既存の燃料供給インフラ（主に液体燃料）をそのまま、または最小限の変更で使用できる代替燃料の開発・普及促進も、

（図表2）世界の運輸部門におけるCO₂排出量の種別内訳と2030年、2050年の将来予測



（出所）NEDO「技術戦略研究センターレポート TSC Foresight」Vol.37、2020年7月

<https://www.nedo.go.jp/content/100920836.pdf>

1 本稿ではハイブリット車を含む電気自動車全体をEV（Electric Vehicle）と表記する。

2 FCV（Fuel Cell Vehicle）と表記される場合が多いが、本稿では電動車であることを示すためにFCEV（Fuel Cell Electric Vehicle）と表記する。

3 REN21 “Renewables Global Status Report 2020” June 2020
<https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>

4 硫化物電池、フッ化物電池、亜鉛負極電池など。

部門のシステム転換と同様に不可欠となる。

3. バイオ燃料とeフューエル

代替燃料にはすでに商用化され広く使用されているバイオ燃料と、今後の実用化や商用化が期待されるeフューエルがある。

【バイオ燃料】

バイオ燃料は原料となるバイオマス（植物等）が成長する過程でCO₂を吸収するため、燃焼した際に発生するCO₂をこれと相殺してカーボンニュートラルと見なすことができ、排出削減効果が高い。

代表的なバイオ燃料にはバイオエタノール（以下、エタノール）⁵とバイオディーゼルがあり、化石燃料と混合使用される形ですでに世界の運輸部門の最終消費エネルギーの3%を担っている（2017年）⁶。エタノールはガソリンの代替となるもので、トウモロコシやサトウキビなどを発酵・蒸留して製造される⁷。バイオディーゼルは菜種油などの植物油や廃食用油から作られ、その主成分は脂肪酸メチルエステル（FAME）である⁸。また、近年は、油脂のバイオディーゼル化にあたって、石油精製で使われている水素化処理を施して製造されるHVO（水素化植物油）やHEFA（水素化されたエステル・脂肪酸）の生産が伸びている。HVO/HEFAは既存のディーゼルやジェット燃料と同様の化学構造を持ち、FAMEのように安定性や低温流動性などの面に問題がない。

2019年に世界のバイオ燃料生産は前年比5%増加して1,610億ℓとなり、そのうち70%（1,140億ℓ、前年比2%増）をエタノールが占めた。エタノールの半分は米国、3分の1はブラジルで生産されており、3位の中国（0.3%）を大きく引き離している。なお、米国での年間生産量はこれだけで日本の年間ガソリン需要を賄える水準にある。一方、バイオディーゼル（470億ℓ）は前年比で13%生産量が増え、これまでシェアが1位だった米国（14%）をぬいてインドネシア（17%）がトップとなり、3位はブラジル（12%）となっている。バイオディーゼル中のHVO/HEFA生産量（65億ℓ）は前年に比べて12%増加しており、フィンランド、オランダ、シンガポールに製造が集中しているが、重量車やジェット燃料としての需要増加を見込んだ投資が増えており、特に米国での製造拡大が計画されている。

バイオ燃料生産に係る大きな問題に食料との競合、原材料生産にあたっての環境負荷、土地利用の変更から生じる社会的な影響などがある。第一世代バイオ燃料と称される、食用となる植物を原料とするものについては、2000年代後半にブームが起こった際、食料価格の高騰や生態系の破壊などの悪影響が表面化した⁹。そのため現在は、非可食である植物や木質系（セルロース系）廃棄物、微細藻類などを原料とした次世代バイオ燃料の技術開発と実用化・商用化が進められている。

5 燃料として使用されるエタノールは通常、バイオマス由来のため、以下ではエタノールと表記する。

6 REN21 “Renewables Global Status Report 2020” June 2020
<https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>

7 日本ではエタノールに金属の一部を腐食させる可能性があること、排ガスが光化学スモッグなどの原因になるおそれがあることなどにより、エタノールとイソブテンから合成されるETBE（エチルターシャリーブチルエーテル）がガソリンに混合されている。

8 原料となる油脂とメタノールを反応させる（メチルエステル化）と、FAMEに変換され副産物としてグリセリンが生成する。このFAMEがバイオディーゼル燃料になる。

9 2007年頃からの世界的な食料価格高騰をきっかけとなり、各国でライフサイクル全体におけるCO₂削減効果や持続可能性を考慮した様々な規制が行われている。

【eフューエル】

バイオ燃料に必要となるカーボンニュートラルかつ持続可能な原料には限りがあり、将来的な供給量に課題が残る。そこで長期的に重要となるのがeフューエル¹⁰だ。eフューエルとは再エネ電力による水電解でできる水素（グリーン水素またはe水素）と、鉄鋼、セメント、化学工場などの産業プロセスから排出されるCO₂や、大気中から直接回収したCO₂（Direct Air Capture、DAC）を原料に製造する合成燃料（炭素を含まないeアンモニアも含む）を意味する。基本構造も基本特

性も現行の化石燃料と変わらないので、ガソリンやディーゼル、ガス、軽油などと同じように内燃機関で使用でき、重量車、船舶、航空機などの脱炭素化にも貢献できる（図表3）。加えてCO₂削減が困難な産業部門から発生するカーボンのリサイクルにも役立つ。

デメリットは高い製造コストで、現在は1ℓあたり最大7ユーロ（850円）程度かかる。合成技術の改良、太陽光や風力など燃料コストが不要な再エネ電力の大量導入による電気代の低下、既存施設を利用した生産規模の拡大などで2050年には税前で1～3ユーロ/ℓ

（図表3）

eフューエルと各燃料との比較

	運輸部門	供給インフラ	貯蔵	必要な投資	GHG削減率
化石燃料	全て	既存設備	容易	小	—
電気	乗用車・重量車	新規設備	困難	大	高
バイオ燃料	全て（但し供給に制約、需要に上限あり）	既存設備	容易	中	高
eフューエル*	全て	既存設備	容易	大	高

* eフューエルはグリーン水素を含む。

各eフューエルの化石燃料代替の可能性

	eフューエル	燃料代替の可能性*				貯蔵	新規インフラ
		乗用車	重量車	船舶	航空機		
気体	eメタン(CH ₄)	△	○	○		中	不要
	e水素(H ₂)	○	○	△		難	要
液体	eアンモニア(NH ₃)	△	△	◎		容易	要
	eメタノール(CH ₃ OH)	○	△	△		容易	不要
	eDME/eOME**	△	○	○		容易	要
	eガソリン	△				容易	不要
	eディーゼル	△	◎			容易	不要
	eジェット燃料				◎	容易	不要

* ◎は可能性大、○は補助的役割、△役割は小、ブランクはなし
 ** DME (Dimethyl ether) とOME (Polyoxymethylene dimethyl ethers) は代表的な合成燃料
 (出所) Yugo, Marta and Alba Soler “A look into the role of e-fuels in the transport system in Europe (2030–2050) : literature review”
 Concawe Review Vol.28 No. 1、October 2019を基に作成。
<https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/E-fuels-article.pdf>

10 Power to X (PTX)、Power to Liquids (PTL)、Power to Gas (PTG)、合成燃料 (Synthetic fuels) とも呼ばれる。但し、合成燃料は再エネ水素（グリーン水素）やリサイクルカーボンを利用するものには限られない。

(120～360円)程度になると予想されているが、大規模投資が必要となる。また、WTWベースで比較した場合、BEV(バッテリー電気自動車)のエネルギー効率の方が、エンジン車でeフューエルを使用したケースよりも4～6倍高い¹¹。いずれにせよ、大量の再生電力による安価な水素の利用が前提条件となるため、本格的な普及は当分先になる¹²が、近年は欧州の自動車関連会社でeフューエル開発促進の動きが強まっており、日本の自動車会社もこれに追随している¹³。

4. 自動車の脱炭素化

自動車は構造によって①内燃機関(ICEエンジン)を備え、ガソリンやディーゼルなどで走行する車(以下、エンジン車)、②エンジンが主体でこれを電気モーターで補助するハイブリッド車(HEV)、③HEVのバッテリー容量を増加し充電機能を備えたプラグインハイブリッド車(PHEV)、④100%バッテリーで走行するバッテリー電気自動車(BEV)、⑤主に水素を燃料とする燃料電池車(FCEV)に大別される。各国政府の支援でエンジン車から電気自動車(EV)への転換が進められているが、2019年の世界の自動車販売に占めるEVの割合は2.6%で、保有台数は全体の約1%にすぎない¹⁴。

エンジン車のCO₂排出量は燃料の消費量に

比例するため、エンジン効率の改善や車体の軽量化、抵抗の低減といった技術の積み上げによる燃費向上が排出削減につながるが、これには限界がある。このため欧州や米国カリフォルニア州等の先進地域、中国などは内燃機関の新車販売を2030～2050年頃までに禁止するという方向性を示している¹⁵。

しかし、BEVは重量車には向かず、FCEVの普及はまだハードルが高い。また供給される電力の電源構成で再生エネの導入が進み、化石燃料による発電比率が下がらなければBEVであっても大幅な排出削減にはならない。人口増や経済発展により今後、新車販売台数が増加するのは主として新興国や発展途上国であるが、こうした国々では価格が安く、インフラも整い、使い勝手のよいエンジン車やHEVへの需要が今後も根強い。また、先進国に比べて、電源構成では化石燃料による発電比率が高い場合が多いため、BEVの普及が進んでも十分なCO₂削減効果が得られない。

国際エネルギー機関(IEA)は2030年の世界の自動車保有台数に占めるEV(HEVは除く)の割合を7%～12%強のレンジと予測¹⁶しており、90%以上の車には依然としてエンジンに対応した液体燃料が必要となるので、バイオ燃料やeフューエルによりこれをカーボンニュートラルにしてゆくことはCO₂排出量削減への大きな貢献となる。重量車は長期的

11 Yugo, Marta and Alba Solert “A look into the role of e-fuels in the transport system in Europe (2030–2050) : literature review” *Concawe Review* Vol.28 No.1, October 2019

12 日本は2030年ごろに30円/Nm³程度、将来的に20円/Nm³程度の水素価格実現を目指しており、後者はLNG価格10米ドル/MMBtu(百万Btu)の熱量等価での水素コスト13.3円/Nm³に環境価値が含まれた水準と想定されている(水素・燃料電池戦略協議会「水素・燃料電池戦略ロードマップ～水素社会実現に向けた産学官のアクションプラン～」2019年3月12日 <https://www.meti.go.jp/press/2018/03/20190312001/20190312001-1.pdf>)。

13 欧州では先行するAudiに続きボルシェ、ポッシュなど。日本ではトヨタ、日産、ホンダなど。

14 ここでのEVは③のPHEVと④のBEVの合計。IEA “Global EV Outlook 2020 : Entering the decade of electric drive?” June 2020 <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>

15 但し、内燃機関を持つハイブリッド車(HEV/PHEV)がどのような取り扱いになるのかは必ずしも明確ではない。加州ではすでに2018年からHEVがゼロエミッション車とは見なされなくなっており、英国は禁止対象にHEVを含める意向だが、中国はHEVをBEVへの転換過程と捉え推進する姿勢を示している。

16 IEA “Global EV Outlook 2020 : Entering the decade of electric drive?” June 2020

にはFCEVへの転換が進むと考えられるが、当面はバイオディーゼル燃料の使用が、その後はeフューエルが有効な排出削減手段となる。

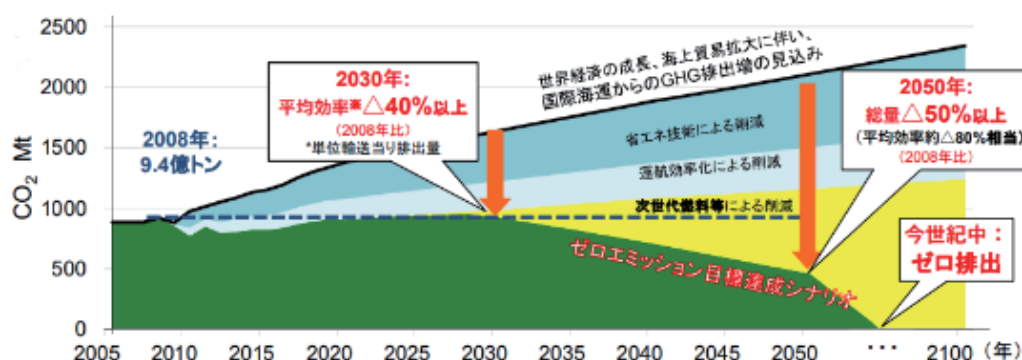
5. 船舶の脱炭素化

海運セクターにおけるGHG削減の枠組みは内航分野と外航分野に分かれる。内航からの排出は各国での排出量にカウントされ、それぞれが独自に削減努力を行う。しかし、外航での排出量は帰属を決定するのが困難なため、海事に関する国連の専門機関である国際海事機関（IMO）の下で対策が進められている。IMOでは2018年に、GHG排出に関して、2030年までに海運全体の燃費効率を40%以上、2050年には70%改善するとともに、2050年には総排出量を50%削減し（いずれも2008年比）21世紀中のなるべく早い時期に排出ゼロ（phase out）を目指すことで合意している。ハード面では新造船の燃費規制強化（2013

年開始¹⁷）、ソフト面では燃費実績報告制度の義務化（2019年から）で、運航データの「見える化」により省エネ運航の促進を図る方策などが導入されている。こうした省エネ技術や運航効率の改善だけでは今世紀中にGHG排出ゼロの目標達成が難しい部分を担うのが代替燃料になる（図表4）。

海事関係者は、2050年のIMO目標達成のための代替燃料として、現在のエンジン機関がそのまま使えるアンモニア（NH₃）に注目している。アンモニアは水素と窒素の化合物で水素同様カーボンフリー燃料であるが、水素よりも液体貯蔵し易い¹⁸。長年、肥料として生産されており、国際的に流通している。コスト面から原料には天然ガスを用いるのが一般的だが、今後は製造のプロセスで排出されるCO₂を回収・貯留（CCS）するブルーアンモニアや、再エネ由来の水素によるeアンモニアの利用が考えられる¹⁹。

（図表4）国際海事機関（IMO）のゼロエミッション目標達成に向けたシナリオ



（出所）国際海運GHGゼロエミッションプロジェクト「国際海運のゼロエミッションに向けたロードマップ」2020年3月を加工。

https://www.mlit.go.jp/maritime/GHG_roadmap.html

17 2013年に1トンの貨物を1マイル輸送する際に新造船が排出したCO₂の量を基準値として、ここからの削減を段階的に強化するEEDI規制が導入されている。

18 -253℃を保つ必要のある液化水素に比べて-33℃の常圧下で液化し、8.5気圧に加圧すれば常温でも液体なので扱い易い。

19 但し、アンモニアには毒性と強い臭気があり、CO₂の約300倍の温室効果がある亜酸化窒素（N₂O）発生の可能性もあるため、取扱いに注意が必要となる。

しかし、アンモニアを燃料とする船舶はまだ実用化²⁰されていないため、当面は従来の重油に比べてCO₂排出量が少ないLNG（液化天然ガス）への燃料転換を進め、すでに実用化されているLNG燃料船の技術や供給インフラを使って、中長期的にLNGとほぼ同等に使用することが可能な液化バイオメタン（バイオLNG）や液化合成メタン（eLNG）の使用を拡大してゆくシナリオも想定されている²¹。また、こうした今後の不確定要因に対処できるよう、二種類の燃料が使用可能で、新たな燃料用に必要となる設備が後付けできる、柔軟な船舶設計も提案されている（図表5）。

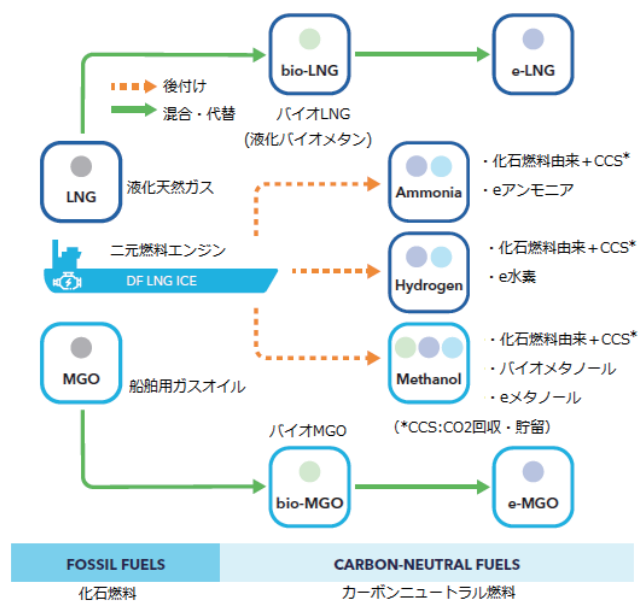
なお、小型のフェリーや観光船などでは既にバッテリー推進船（BEV船）が実用化されている。特にノルウェーでは国内電力の93%が水力発電により供給されていることもあり、フィヨルド観光船や貨客フェリーなどの電動化が進んでいる。

6. 航空機の脱炭素化

航空セクターも海運セクターと同様に、国際航空からのGHG排出については国連の専門機関である国際民間航空機関（International Civil Aviation Organization、ICAO）の下で対策が進められている。ICAOでは燃料効率を年平均2%改善し（2021～50年までの間）、2020年以降は国際航空における総排出量を増加させないことを決定し、2016年には市場メカニズムを活用した地球温暖化に対する自

主的取組（Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation、CORSIA）の導入が合意された。2021年からはCORSIAの運用が始まる予定で、国際航空便を運航している各社は、燃費効率の高い航空機導入・運航方法の改善やバイオ燃料の導入、そしてオフセットクレジットの利用²²により、排出量を基準値内に収める必要が生じる²³。また、国際民間航空の業界団体である国際航空運送協会（International Air Transport Association、IATA）は2050年にCO₂排出量50%削減（2005年比）の目標を掲げている。

（図表5）今後の脱炭素技術・燃料に対応できる柔軟な船舶設計の例



（出所）DNV.GL “Maritime Forecast to 2050:Energy Transition Outlook 2020” September 2020を基に作成。

<https://eto.dnvgl.com/2020/Maritime/forecast>

20 実用化は2028年以降と想定されている。

21 国際海運GHGゼロエミッションプロジェクト、2020年

22 CORSIAが適格と認める6つの排出枠発行制度のうち、2016年から5年の間に開始した排出削減プロジェクトからの排出枠を購入することで超過した排出分をオフセット（相殺）する。

23 基準値は各社の2019年のCO₂排出量。2021～2026年は国ごとの自主参加、2027～2035年までは小島嶼諸国、後発開発途上国、内陸発展途上国などを除き義務化。

航空機の場合は電動化が重量車や船舶よりもさらに難しいのでバイオジェット燃料やeフューエルの利用が不可避となる。航空機に搭載できるバイオジェット燃料は、世界最大級の民間規格制定機関である米国ASTM Internationalが定める国際規格ASTM D7566に準拠して製造されたものでなくてはならず、2020年5月の段階で7つの変換プロセスが認証されているが²⁴、商用段階にあるのは廃食用油や植物油を原料として水素化処理を行うHEFA製造プロセス（ASTM D7566のAnnex2）によるものだけである。セルロース系バイオマスを原料としてガス化FT合成²⁵を行うプロセス（Annex1）とエタノールなどのアルコールから製造するプロセス（Annex5）²⁶は商用化一步手前の段階にある。光合成をおこないながら成長する過程で細胞内に油脂を作り出す微細藻類を使ったバイオジェット燃料は、日本で2030年に既存のジェット燃料と同等レベル（現在の1,600円/ℓから100～200円/ℓ）までのコスト低減²⁷を目指しており、ユーグレナ社はミドリムシを原料にAnnex6の、またIHI社はボツリオコカスを原料にAnnex7のプロセス²⁸で研究開発を進めている。

排出規制が目前に迫っていることからバイオジェット燃料への需要は高まっているが、現在、こうした持続可能な航空燃料

（Sustainable Aviation Fuels、SAF）²⁹を量産しているのはフィンランドに本社を置くネステ社と米ワールドエナジー社の2社のみで、IATAによると、2020年のSAF生産見通しは4万kℓと世界のジェット燃料需要のわずか0.015%でしかない。新型コロナウイルスの流行で、世界の航空業界は一時的に旅客事業が9割減になるなど大打撃を受け、また原油価格も下落している状況下、バイオジェット燃料の開発速度が鈍化する可能性もあるが、圧倒的な需要超過の状況であり、長期的には引き続きSAF生産は拡大すると考えられる。

7. おわりに

輸送部門の電動化に不可欠な蓄電池や燃料電池の技術革新と低価格化、新規インフラ整備、そして電力部門の脱炭素化にはまだ長い時間がかかり、多額の投資も必要になる。一方、ほぼ既存のシステム内で使用できる、カーボンニュートラルで持続可能な代替燃料は、電動化が困難なモビリティ・モードの低炭素化に寄与し、特に新興国や途上国では今後も使用され続けると予想されるエンジン車やHEVなどのCO₂排出を抑制できる。過渡期にあるモビリティのシステム転換を補完するとともに、新ビジネス創出のチャンスを秘める次世代燃料の今後に期待がかかる。

- 24 代替航空燃料の変換プロセスの承認制度であるため、原材料はバイオマス由来ではないものも認められる。
- 25 Fischer-Tropsch（フィッシャー・トロプシュ）合成では一酸化炭素と水素の混合ガスから触媒反応を通じて液体炭化水素を合成する。石油の代替となり、分留・精製すればガソリン、ケロシン、ディーゼル、潤滑油などが得られる。
- 26 昨年6月に、全日空は、米ランザテック社が生産するエタノールを原料としたバイオジェット燃料（但し、バイオマス由来ではなく、製鉄所や製油所などからの排ガスを利用して生産したもの）を2021年より購入すると発表している。また今年10月には、Annex2のプロセスで廃食用油や動植物性油脂からバイオジェット燃料を製造しているネステ社から購入した7,000kℓ分が羽田空港に到着しており、今後の長期契約について協議することに基本合意している。
- 27 経済産業省「カーボンリサイクル技術ロードマップ」2019年6月
<https://www.meti.go.jp/press/2019/06/20190607002/20190607002-1.pdf>
- 28 Annex7はIHI社が日本法人の申請者として2020年5月に初めて規格を取得したもの。IHI社プレスリリース2020年6月8日
https://www.ihl.co.jp/ihl/all_news/2020/other/2020-6-08/index.html
- 29 ライフサイクルでCO₂の排出量が少ない持続可能な供給源から製造されるジェット燃料。