

Deloitte.

デロイトトーマツ



Quest Vol.12

低炭素燃料： ネットゼロへのラストマイル 空と海の脱炭素化における 合成燃料の役割

2024年11月



MAKING AN
IMPACT THAT
MATTERS
since 1845

目次

用語集	03
エグゼクティブサマリー	04
1. ネットゼロ達成には大量の低炭素燃料が必要である	06
2. ラストマイルの脱炭素化：海運と空運	09
2.1 空運の脱炭素化	10
2.2 海運の脱炭素化	13
2.3 空運・海運の脱炭素化に関するデロイトの見通し	15
3. 合成燃料の脱炭素化のポテンシャルを解き放つ	16
3.1 克服されていない重要な技術的障壁	18
3.2 合成燃料のコスト高への対応	24
3.3 供給と需要をつなぐ貿易の役割	27
4. 行動の必要性	29
4.1 低炭素燃料の普及に向けた今後の課題	30
4.2 進むべき道	31
付録	33
付録1：HyPEモデルの更新	33
付録2：空運・海運の効率改善の算定	34
付録3：バイオ燃料を供給するための持続可能な原料の利用可能性に関する計算	35
文末脚注	36
日本語訳版の刊行にあたって	38
著者	39
問い合わせ先	40
Deloitte Center for Sustainable Progressについて	41
日本語訳版問合せ先	42
Quest バックナンバー、Web ページ	43

用語集

略語	意味
CAPEX	資本的支出
C ₁₂ H ₂₆	ケロシン
CH ₃ OH	メタノール
CCUS	二酸化炭素回収・有効利用・貯留
CO ₂	二酸化炭素
DAC	直接空気回収
EU	欧州連合
EJ	エクサジュール (10 ¹⁸ ジュールに相当)
FAO	国連食糧農業機関
FOGS	脂肪、油、グリース
GHG	温室効果ガス
GtCO ₂	CO ₂ 換算1ギガトン (10億トン)
GW	ギガワット (10 ⁹ ワットに相当)
HEFA	水素化処理エステル・脂肪酸
HFO	重質燃料油
H ₂	水素
HyPE	Hydrogen Pathway Explorer
ICCT	国際クリーン輸送協議会
IEA	国際エネルギー機関
IMO	国際海事機関
IPCC	気候変動に関する政府間パネル
IRENA	国際再生可能エネルギー機関
ITF	国際交通フォーラム
kt	キロトン
kW	キロワット

略語	意味
L-DAC	液体直接空気回収
MJ	メガジュール
MSW	都市固形廃棄物
MtCO ₂	CO ₂ 換算100万トン
MtH ₂ eq	水素相当量100万トン
MWh	メガワット時
NH ₃	アンモニア
NZE	ネットゼロエミッション
OECD	経済協力開発機構
OPEX	運用費用
RTKeq	有償トンキロ換算
S-DAC	固体直接空気回収
SAF	持続可能な航空燃料
t.km	トンキロ
TRL	技術成熟度
TWh	テラワット時 (10 ¹² ワット時に相当)
US	米国
WTO	世界貿易機関

エグゼクティブサマリー

2050年までに温室効果ガス（GHG）排出量実質ゼロを達成するには、現在の化石燃料中心のモデルから、効率的で再生可能性の高い電化されたエネルギーシステムに、社会を根本的に変える必要がある。

クリーン水素により、製鋼や化学といったGHG削減が難しい分野での電化を補完することができる。しかし、空運や海運の脱炭素化には、水素や電気よりもエネルギー密度の高い**低炭素燃料**（バイオ燃料や合成燃料など）が必要である。

バイオ燃料は、既存の燃焼エンジンや燃料インフラにドロップイン燃料として手軽に使用することができ、短期的な排出量の大幅削減を可能にする。しかし、持続可能なバイオマス製造のために限られた原料を求めて激しい競争がセクター横断的に起こることにより、バイオ燃料の大規模導入が妨げられることが予想される。したがって、長期的には、アンモニア、e-メタノール、e-ケロシンなどの**合成燃料**が低炭素燃料の主要な供給源になると予想される。

デロイト グローバルの予測において、データに基づくモデルベースの定量分析を活用して、**空運と海運における脱炭素化の重要な転換要素としての合成燃料**の普及可能性について探求した。この見通しによると、空運の二酸化炭素（CO₂）排出量は2030年まで変化しないが、2050年までに約75%削減される。海運については、2050年までにほぼネットゼロとなり、95%の排出量削減を達成する。このような排出量削減は、主に効率化対策と低炭素燃料（特に合成燃料）を取り込むことによって推進される。合成燃料は、現在の混合燃料にはほとんど含まれておらず、2030年には消費される26エクサジュール（EJ）のうち1.6EJを供給するに過ぎないことから、わずかな役割しか果たさないだろう。そのような状況ではあるが、デロイトの見通しでは、合成燃料は2050年までに空運と海運の主要なエネルギー源となり、燃料消費量のうち16EJ近くを占めるようになる。

このような水準の合成燃料供給を達成するには、約1億5,000万トンの持続可能な水素と7億トンのカーボンニュートラルなCO₂が必要である。クリーン水素セクターはまだ初期段階にあり、CO₂回収技術の開発もまだ大規模に行われていないため、これは産業的にも技術的にも大きな課題となっている。

さらに、水素製造、燃料合成、直接空気回収を合わせると、2050年までに最大1万テラワット時（TWh）のクリーン電力供給が必要であり、これは2023年における世界の発電量の3分の1に相当する。この量は、現在世界で製造されている再生可能エネルギーの発電量を超えており、再生可能エネルギー発電容量は、これまでの進歩をはるかに超える、大幅な拡大が必要である。

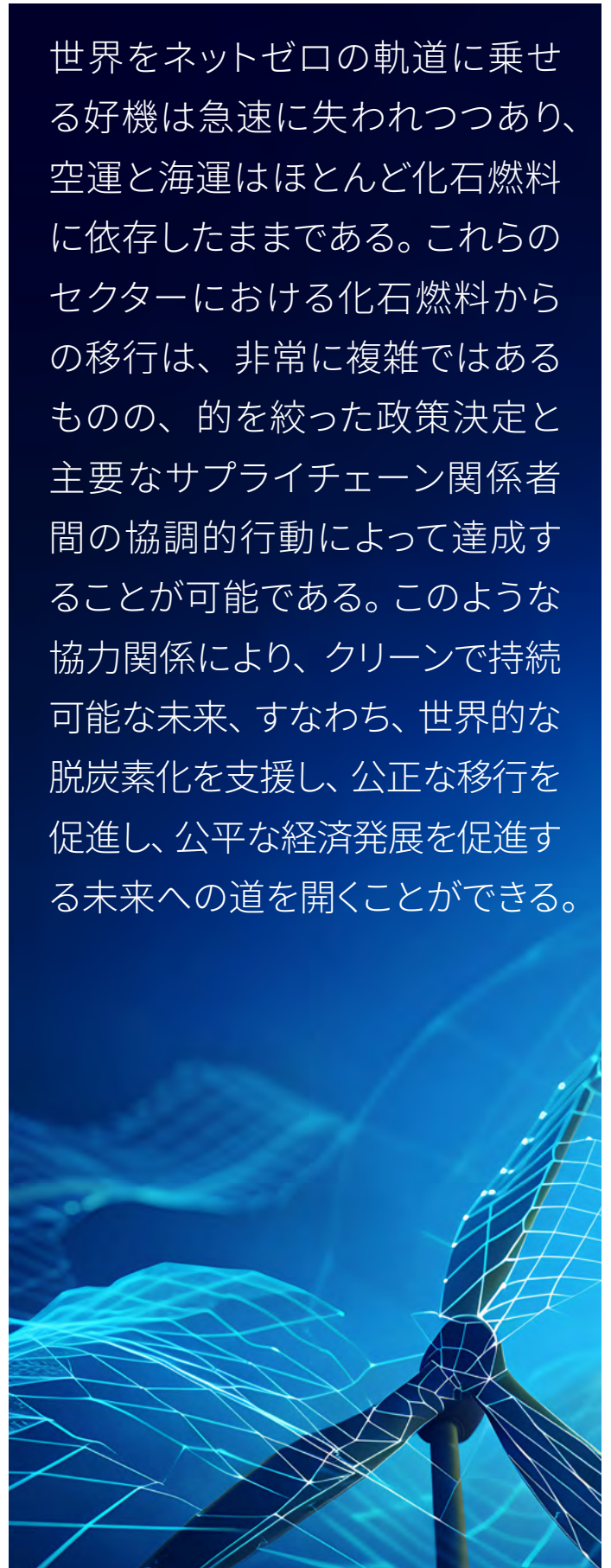
合成燃料は空運と海運の脱炭素化の鍵を握っているが、まだ導入の初期段階にあり、規制の枠組みがほとんど存在せず、化石燃料に比べてコストが著しく高い。本来国際的な空運・海運セクターにおいて必要な合成燃料を開発するためには、**世界的に調和のとれた規制の枠組みが極めて重要**である。しかし、公的支援がなければ、低コストのCO₂原料の入手可能性が限られていること、プロセスに固有のエネルギー効率の低さ、クリーン水素をめぐるセクター間の競争により、合成燃料は従来の化石燃料の2倍から10倍も高価なままとなるだろう。合成燃料の供給を前述の水準にまで引き上げるには、2050年までに年間平均約1,300億米ドルという多額の投資が必要となる。これは、世界の化石燃料投資（2024年には1兆1,000億米ドル）に比べればごく少額にすぎないが、空運と海運における燃料への総支出に匹敵する額である。この領域の経済競争力を高めるために重要かつ必要な方策は、世界規模の貿易である。**世界規模の貿易**は、最もコストのかからない資源のある場所を、再生可能でカーボンニュートラルなCO₂の資源が限られている需要の中心地と結ぶことで、需要と供給の**地理的不均衡を緩和**し、全体的な経済効率を高め、経済発展を促進することができる。

合成燃料のコスト競争力は、空運と海運の脱炭素化における広範な技術的課題の一部にすぎない。空運の脱炭素化ではインフラの大規模な改造やエンジンの改造を必要としない一方、海運の脱炭素化ではe-メタノールとアンモニアからなる**マルチ燃料の未来**が示唆されている。これには、化石燃料からの移行中に既存のインフラを使用することと、新しい燃料補給、エンジン技術、給油インフラを開発することの両方が必要となる。したがって、脱炭素化に関係する技術的課題は、燃料供給にとどまらない。

要約すると、空運・海運における化石燃料からの移行には、空運・海運のバリューチェーンにおける各参加者による、以下のような協調的かつ意欲的な取り組みが必要になるであろう。

- 政策立案者**は、開始条件、必要な規制の枠組み、継続的な推進力を生み出すうえで極めて重要である。国別およびセクター別の戦略を通じて可視性を高め、混合義務化などの方法を通じて需要を創出し、低炭素燃料への経済的支援を提供することでサプライチェーン関係者の経済的ハードルを下げ、オフテイクを可能にする必要がある。義務化と経済的支援を継続的に進化させることが、長期的な移行を確実にする鍵になるであろう。
- 国際組織**は、共通のルールセットを確立することによって、協調的な世界的移行を支援する役割を担う。国際組織は強固な認証によってブックアンドクレーム方式を可能にすることで、合成燃料の価値の創造、ひいては世界的な普及を支援することができる。また、統一した共通の定義により、カーボンリーケージや裁定取引の回避を支援することができる。
- 燃料供給者**は、合成燃料の需要増に対応するため、初期投資と上流の関係者とのパートナーシップにより、低コストで持続可能なエネルギー原料、特にクリーン水素とカーボンニュートラルなCO₂を積極的に確保する必要があるであろう。合成燃料のバリューチェーンの構築段階では、バイオ燃料を混合することによって、技術の向上と必要なインフラの開発を支援することができる。
- 航空機製造業者および造船業者**は、持続可能性のニーズに応えるために、自社の提供内容を適応させる必要がある。つまり、航空機のエンジンについては高混合率の合成燃料で動くようにし、船舶については新しい燃料、特にアンモニアやe-メタノールに対応できるようにするということである。さらに、研究開発に投資することにより効率化対策を策定し、それを製造プロセスに統合して、燃料コストとCO₂排出量の両方を削減すべきである。
- 空港および港湾当局**は、必要な燃料補給インフラを整備し、継続的な燃料供給を確保することによって、合成燃料を導入する基盤を築くうえで重要な役割を果たしている。空港については特定のインフラを新たに開発する必要はないが、港湾についてはマルチ燃料に対応できるインフラにする必要がある。
- 航空会社および海運会社**は、上流から最終消費者までをつなぐ移行の中心に位置している。持続可能な輸送や移動の選択肢を宣伝することで、技術導入や低炭素燃料のオフテイクを開始し、全てのサプライチェーン関係者の間で協調的な進展をもたらすことができる。自社の活動に運航効率化対策を導入すれば、短期間で大幅なコスト削減と排出削減を直ちに実現することができる。

世界をネットゼロの軌道に乗せる好機は急速に失われつつあり、空運と海運はほとんど化石燃料に依存したままである。これらのセクターにおける化石燃料からの移行は、非常に複雑ではあるものの、的を絞った政策決定と主要なサプライチェーン関係者間の協調的行動によって達成することが可能である。このような協力関係により、クリーンで持続可能な未来、すなわち、世界的な脱炭素化を支援し、公正な移行を促進し、公平な経済発展を促進する未来への道を開くことができる。



1. ネットゼロ達成には 大量の低炭素燃料が 必要である

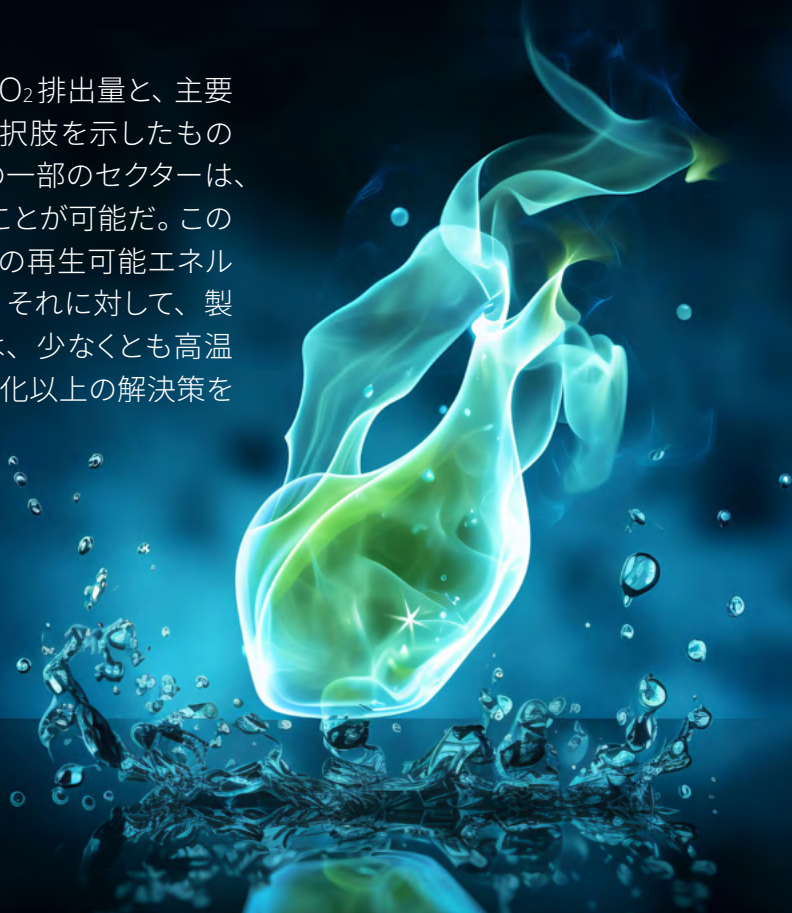
地球温暖化を1.5°Cに抑えるためには、遅くとも2050年までに温室効果ガス（GHG）の排出量を実質ゼロにする必要がある¹。

エネルギー消費と産業プロセスが世界のGHG排出量の80%超を占めていることを考えると²、排出量を実質ゼロにするにはエネルギーシステム全体の完全な脱炭素化が必要になる。したがって、エネルギーシステムの脱炭素化における基本的な要件は、現在の化石燃料中心のモデルから、再生可能性の高い電化されたエネルギーシステムへの移行である³。脱炭素化に関する既存の文献は、主要な技術的解決策として、電化、大規模な再生可能エネルギー開発、エネルギー効率の改善に重点を置いている⁴。

図1は、世界のエネルギー関連のCO₂排出量と、主要経済セクターの主な脱炭素化の選択肢を示したものである。建物や軽量道路輸送などの一部のセクターは、脱炭素化をほぼ完全に電化に頼ることが可能だ。この電力は、水力、風力、太陽光などの再生可能エネルギー源から全て得ることができる⁵。それに対して、製鋼やセメント製造のような重工業は、少なくとも高温加熱と工業原料の需要に対して、電化以上の解決策を必要とする^{3,6}。

また、特に空運・海運における重量輸送の用途のほとんどは、高いエネルギー密度を必要とするため、電化が困難である^{6,7,8}。

直接電化を補完する水素は、クリーン資源から製造された場合（低炭素電力や排出対策がなされた化石燃料を用いた電気分解）、大幅な排出削減を実現することができる。例えば、主な製鋼における排出削減手段として使用したり、他の分子（合成燃料や化学製品など）を製造するための原料として、また熱や電気を製造するためのエネルギー源として使用したりすることができる。



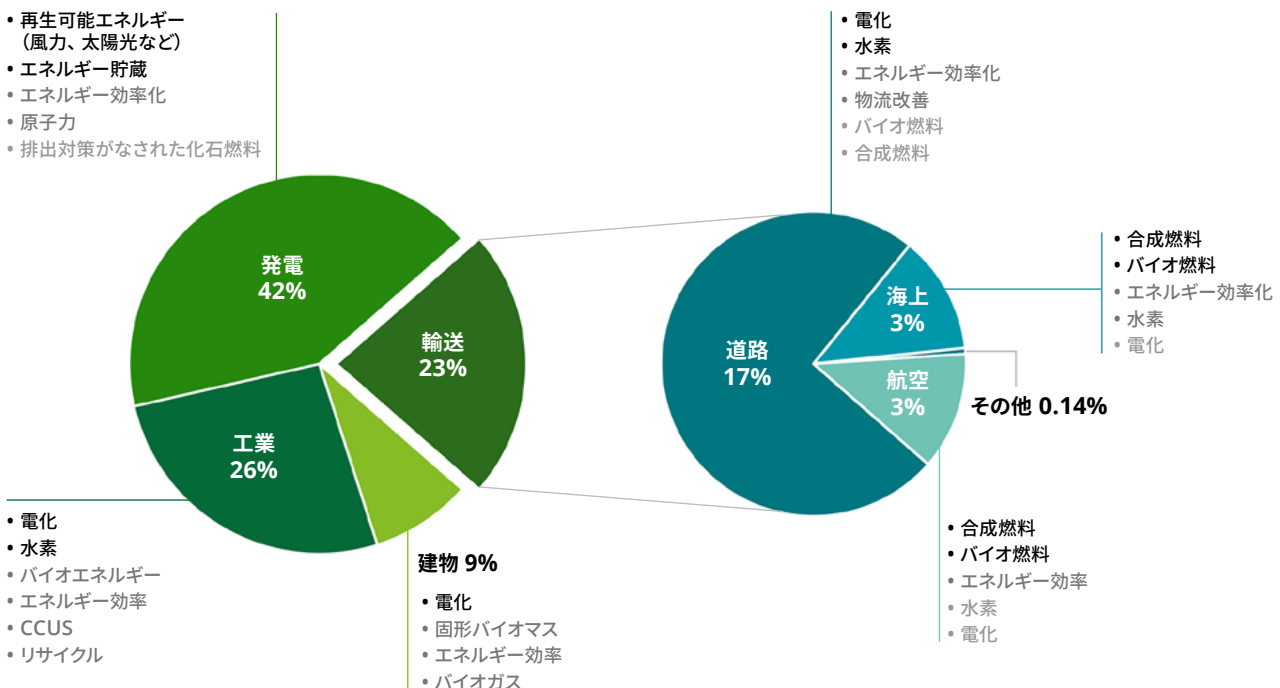
クリーン水素は、バイオマスやバイオガスと並んで、重工業において重要な脱炭素化の可能性を秘めている。また、大型道路輸送の脱炭素化に貢献し、電化の限界を克服することができる。しかし、エネルギー密度が低いため、ほとんどの機器が低容量の燃料貯蔵タンクに高いエネルギー密度を必要とする航空燃料または船舶燃料としてはあまり適していない。したがって、これらの大型輸送セクターの脱炭素化は、化石燃料と同様の特性を持ちつつも、低炭素原料から製造される低炭素燃料、すなわちバイオ燃料や合成燃料に依存することになる。

空運・海運共に、最も「CO₂排出削減が難しい」セクターのうちの2つであり、それぞれの年間排出量は約10億トンである（1年あたり1GtCO₂^{11、12}であり、世界のCO₂排出量の約6%に相当する¹³）。GHG排出の重要な発生源である空運・海運の脱炭素化は特に困難だ。製鉄や化学などの一部の産業では、クリーンエネルギーが豊富な地域に製造拠点を移し¹⁴、最終製品を輸入することで排出量を管理することが可能である¹⁵。しかし、空運業や海運業では、航空機や船舶が世界中を航行し、GHGを直接大気中に排出するという産業の性質上、排出を他の場所に移すことはできない。したがって、他の産業におけるサプライチェーンの最適化とは異なり、空運・海運セクターは排出に正面から取り組むべきである。そのためには、航空機や船舶の効率性の向上、物流の最適化、そして最も重要なこととして、従来の化石燃料をバイオ燃料や合成燃料などのよりクリーンな代替燃料に置き換えることなど、多面的なアプローチが必要となる。

バイオディーゼル、バイオケロシン、バイオエタノールなどのバイオ燃料は、植物バイオマス、農業残渣、さらには藻類などの有機物質由来する再生可能燃料である¹⁶。このような燃料の燃焼で放出されるCO₂は、バイオマスの成長過程でバイオマスに吸収されるか、または自然に排出されるはずだったものである¹⁷。燃料製造過程で他の排出が発生しなければ、バイオ燃料はカーボンニュートラルとみなすことができる。このような閉鎖炭素循環は、大気中のCO₂の純増加を軽減するのに役立つ。バイオ燃料は持続可能な代替燃料として魅力的な選択肢になる。とはいえ、持続可能なバイオ燃料の利用可能性が限られていることから、特に空運・海運において、バイオ燃料を補完する他の燃料の必要性が高まっている¹⁸。

合成燃料とは、水素を原料とする化学反応により製造される液体または気体の燃料を指す。使用される原料（水素を含む）とその製造のためのエネルギーが低炭素であれば、これらの燃料は従来の石油製品のクリーンな代替品と考えることができ、輸送セクターにおけるCO₂排出量を削減できる可能性がある。合成燃料のうち、アンモニア、e-メタノール、e-ケロシンは、空運と海運における脱炭素化にとって最も有望なソリューションであると広く考えられている^{19、20}。アンモニアは、ハーバー・ボッシュ反応によって水素と大気中の窒素から生成することができる（図2）²¹。e-メタノールとe-ケロシンは、それぞれメタノール合成およびフィッシャー・トロプシュ反応によりCO₂および水素から合成される²²。

図1. 主要経済セクターにおけるエネルギー燃焼による世界のCO₂排出量と、各セクターで利用可能な脱炭素戦略



出所：デロイト³、国際エネルギー機関 (IEA)⁹、Our World in Data¹⁰に基づくデロイトの分析

アンモニアは炭素を含まない分子であるが、e-メタノールやe-ケロシンなどの合成炭化水素の燃焼にはCO₂排出が伴い、製造に使用されたCO₂が放出される。このCO₂が生物起源である場合²³、またはDAC（直接空気回収）などの化学的プロセスを用いて大気から直接回収される場合は、低炭素、さらにはカーボンニュートラルとみなすことができる。そのような場合、燃料燃焼から生じるGHG排出量は、炭素循環の一部として、回収されたCO₂または生物起源CO₂によって相殺される。

つまり、低炭素燃料（バイオ燃料や合成燃料など）は、その高いエネルギー密度によって電化と水素を補完し、最も削減が難しいセクターの脱炭素化に不可欠なのである。

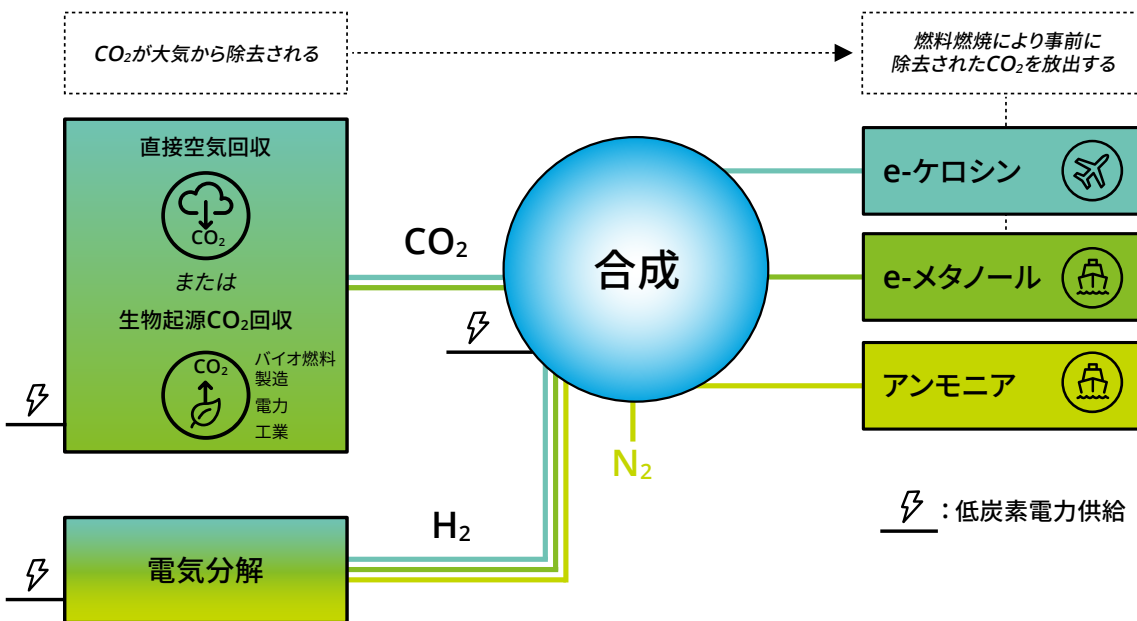
しかし、将来の低炭素燃料市場とその出現は、主要な技術的選択、燃料とエンジンの組み合わせの選択肢、これらの燃料とその原料の調達にまつわる不確実性をはらんでいる。このような燃料は輸送が比較的容易であるため、将来のエネルギー取引の流れに大きな影響を与えるとともに形を変える可能性があり、その全体の可能性を最大化するための供給ルートについて将来的な評価が必要であることは明らかである。

本レポートでは、低炭素燃料に関するデロイトの見通しと、ネットゼロのシナリオにおける空運・海運の脱炭素化に向けた低炭素燃料の役割を紹介する。

また、本レポートでは、データに基づくモデルベースのアプローチを活用して、低炭素燃料を開発するための科学的なビジョンを提供している。分析にはデロイトのHydrogen Pathway Explorer（付録1参照）を利用しているが、これは学術的なピアレビューを通じて検証され、信頼度の高い科学雑誌に掲載された、水素および低炭素燃料の新興市場に関する技術経済モデルである^{24, 25, 26}。デロイトのシナリオは、とりわけ国際エネルギー機関²⁷および気候変動に関する政府間パネル（IPCC）¹の長期的展望に基づいており、地球温暖化を1.5°Cに抑えるというパリ協定の目標と完全に整合している。このシナリオでは、効率的な金融セクターに支えられた良好な地政学的環境を想定しており、140を超える国々が自国に課したネットゼロ目標を達成するために断固とした政策的対応がとられることを見込んでいる。

このような背景から、この見通しでは、低炭素燃料が普及し、カーボンニュートラルの達成に不可欠な要素となるためには何が必要か説明することを目的としている。そのため、このシナリオは、官民セクターにおける戦略的意思決定のための「北極星」の役割を果たす。また、低炭素燃料市場の確立の進捗をモニタリングし、指導者が対処すべき規制、経済、技術におけるギャップを特定することによっても、このシナリオを役立てることができる。ただし、このシナリオを最も可能性の高い将来の結果とみなすべきではない。

図2. 低炭素合成燃料製造経路の概要



出所：デロイト⁶および国際交通フォーラム¹⁹に基づくデロイトの分析

2. ラストマイルの脱炭素化： 海運と空運

空運と海運の脱炭素化には、類似した戦略と同一の手段を使用することができる。

まず、需要の潜在的な増加を制限するためには、消費者の行動変容²⁹とともに、GHG排出量の少ない輸送手段を利用するモーダルシフトが必要である²⁸。次に、物流面と運航面での両方の効率改善、および技術的（物理的）な効率改善により、燃料消費をさらに抑制することができる。

効率改善と行動変容の両面での対策により、燃料の大幅な節約が可能のため、炭素排出削減に貢献できるクイックウィンと考えられている。しかし、CO₂排出を完全にゼロにすることはできないため、カーボンニュートラルを達成するためには、従来の化石燃料を低炭素の代替燃料に置き換える必要がある。



2.1 空運の脱炭素化

飛行機での移動はほとんどが旅客輸送であり、貨物は航空交通の約20%を占めている³⁰。これは有償トンキロ換算（RTKeq）で測定される³¹。空運セクターは経済成長と空運にかかる費用の低下に牽引されて、近年急速に拡大している（2010年から2019年の間に旅客輸送が約70%拡大、貨物輸送が40%拡大）³⁰。モーダルシフトなどの行動対策やエネルギー充足対策の実施により航空需要の増加を補えないと予想されるため、この拡大傾向は続くと考えられる。総航空交通量は2023年から2050年の間に2.5倍の増加および4%の年平均成長率が予想されている³²。これは主に、新興国を中心とした世界的な人口増加と経済成長、およびビジネス、観光、国際協力による世界的な相互関連性の増加によるものである。

技術開発と運航上の対策から得られる効率性

2022年の航空機の平均燃料消費量は12.1MJ/RTKeqであり、2000年代初めの水準と比較してほぼ半減している³³。これは主に、数十年にわたる燃費改善の結果である（1960年から2019年まで平均年1%）³⁴。新しい航空機は既存のフリートよりも平均で約15%効率であるため、短期的には、最新世代の航空機技術を段階的にフリートに導入・統合することによって効率性が向上する³⁵。新しい航空機設計プロジェクトの数が少ないことを考慮すると、2030年半ばまでは、納入される航空機の効率性について目に見える大きな変化はない可能性が高い。したがって、**デロイトの分析では、2022年から2035年までに予想される効率改善率は、1年あたり1.1%という結果になった**（付録2参照）。

長期的には、航空力学（ブレンデッドウィングボディ、アクティブフローコントロールなど）、ジェットエンジン（オープンローター技術など）、先進複合材料を利用した軽量化に関する現在の研究を科学的に進歩させることで、次世代型航空機の効率を現在のものより30%向上させることができる³⁶。このような技術が徐々にフリートに統合されれば、2035年から2050年にかけて、年率1.5%の技術効率改善が見込まれる。

これと並行して、ペイロードの最大化³⁷や航路の最適化³⁸などの運航上の対策に関連した効率を改善することにより、2050年まで毎年さらに0.45%の燃料消費量を削減できる（付録2参照）。これらを技術関連の効率性向上と合わせると、**この見通しにおける航空機の平均的な効率性向上は、2022年から2035年にかけて年間1.6%、2035年以降は年間2%近くになる可能性がある**。したがって、2035年および2050年の平均的な航空機の燃料消費量は、2022年の同等の航空機と比較して、それぞれ18%減および39%減になると考えられる。

低炭素燃料の必要性

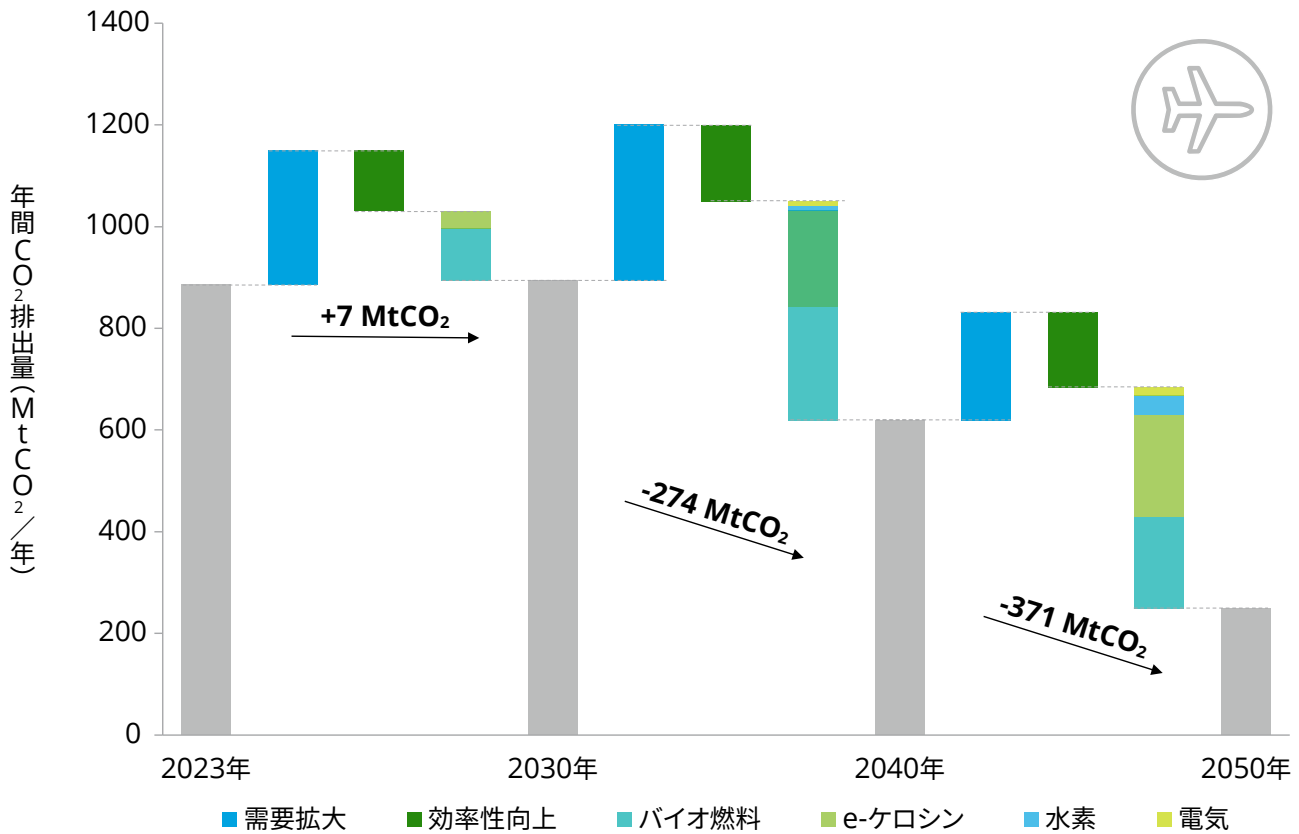
航空需要の拡大が燃料効率の向上を上回るため、燃料の脱炭素化が進まない限り、空運によるGHG排出量は増加することになる。

化石由来ケロシンのジェット燃料は、現在、航空エネルギー需要のほぼ全ての供給源であり、大量のGHG排出の原因となっている³⁴。カーボンニュートラルの達成は化石燃料からの移行を意味するが³、航空業界も例外ではない。空運における実行可能な代替燃料の選択肢は2つある。1つは、バッテリーや水素など、航空機の設計や推進技術の大幅な変更を必要とする燃料の採用である。もう1つはドロップイン燃料の使用に焦点を当てるものであり、従来の燃料をバイオ燃料または合成代替燃料に置き換えることが必要となる。

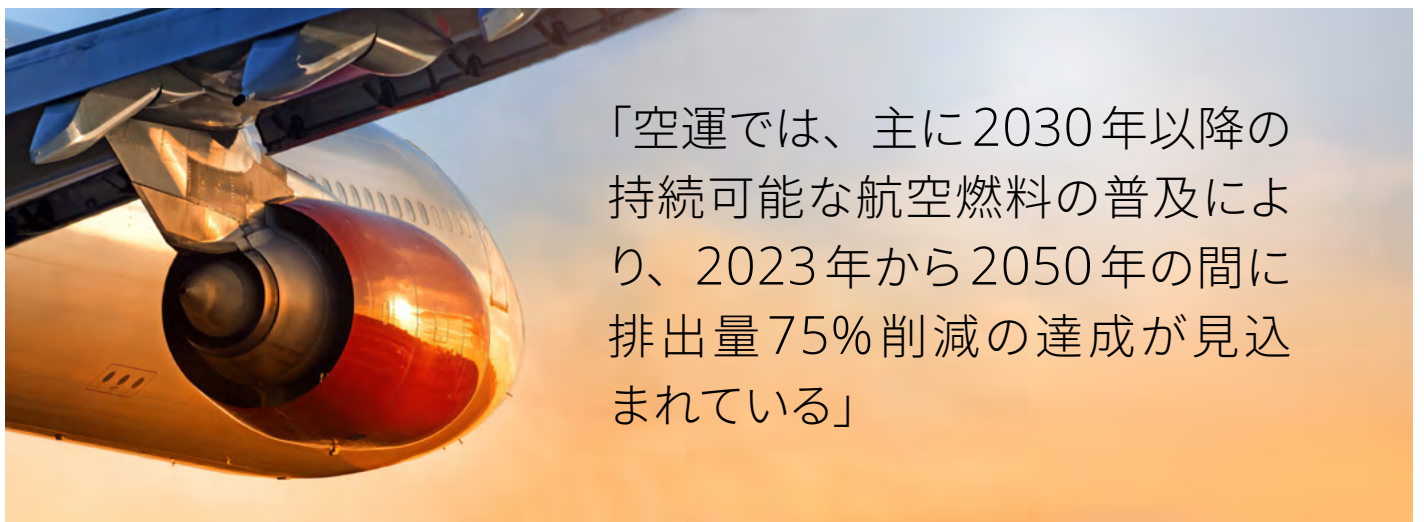
水素とバッテリーを動力とする飛行機は、軽量で短距離の航空交通にしか適合しないため、化石燃料に代わる範囲はごくわずかである³⁹。そのため、空運セクターにおける化石燃料からの移行は、従来のケロシンベースのジェット燃料と化学的にも物理的にも非常に類似した特性を有する持続可能な航空燃料（SAF）の使用に主に依存している⁴⁰。この燃料については、既存のインフラおよびエンジンに注入することにより、従来の燃料のドロップイン代替燃料として容易に使用することができる³⁹。

低炭素航空燃料はまだ開発の初期段階にあり、デロイトの見通しでは、2030年代に増加を始める。2030年には化石燃料は依然として混合燃料の約90%（13.2EJ）を占めるが、2050年には約20%（3.7EJ）に減少する。水素と電力の直接利用については、ほとんどの用途との適合性に限りがあるため、地域が限定されており、2050年の最終的な航空エネルギー消費量に占める割合はそれぞれ7%と3%にすぎない。**SAFが航空エネルギー消費量に占める割合は、2040年には43%、2050年には70%となり、空運における脱炭素化を実現する鍵となる**。様々な低炭素燃料の中で、バイオケロシンは最も早く開発され、2030年よりも前に1.2EJを超える。しかし、その普及は投入されるバイオマス原料の利用可能性により制限される（コラム1参照）。そのため、2050年までにe-ケロシンが主要な供給源となり、2050年には供給される航空燃料の6.8EJ（40%近く）を占めるようになる。その結果、空運セクターの排出量は2030年まで変化はなく、2050年には240MtCO₂に減少すると予測されている。これは現在の排出水準と比較して75%の減少に相当する（図3）⁴¹。

図3. 2022年から2050年までの空運におけるCO₂排出量の推移と様々な排出削減策の影響



出所：付録2記載の効率改善とセクション2.3記載のデロイトのネットゼロシナリオに基づくデロイトの分析



コラム1：バイオ燃料の製造と可能性

バイオ燃料は化学的に従来の化石燃料と類似しており、既存のジェットエンジンや燃料インフラにドロップイン燃料として使用することができる。そのため、**バイオ燃料は道路運送、空運、海運を含む運輸セクターの脱炭素化に大きく貢献することが見込まれる**。バイオ燃料プロセスの中には、既にかなり成熟し、エネルギーシステムに組み込まれているものもある⁴²。2022年には、バイオ燃料供給量は4.3EJに達し、運輸セクターのエネルギー消費量の3.5%を占めている。現在の製造量（バイオディーゼルとバイオエタノール）のほとんどは道路運送セクターを対象としているが、ネットゼロシナリオでは、バイオ燃料の需要は2030年までに倍増し、空運や海運などの他の運輸セグメントにも拡大するだろう²⁷。

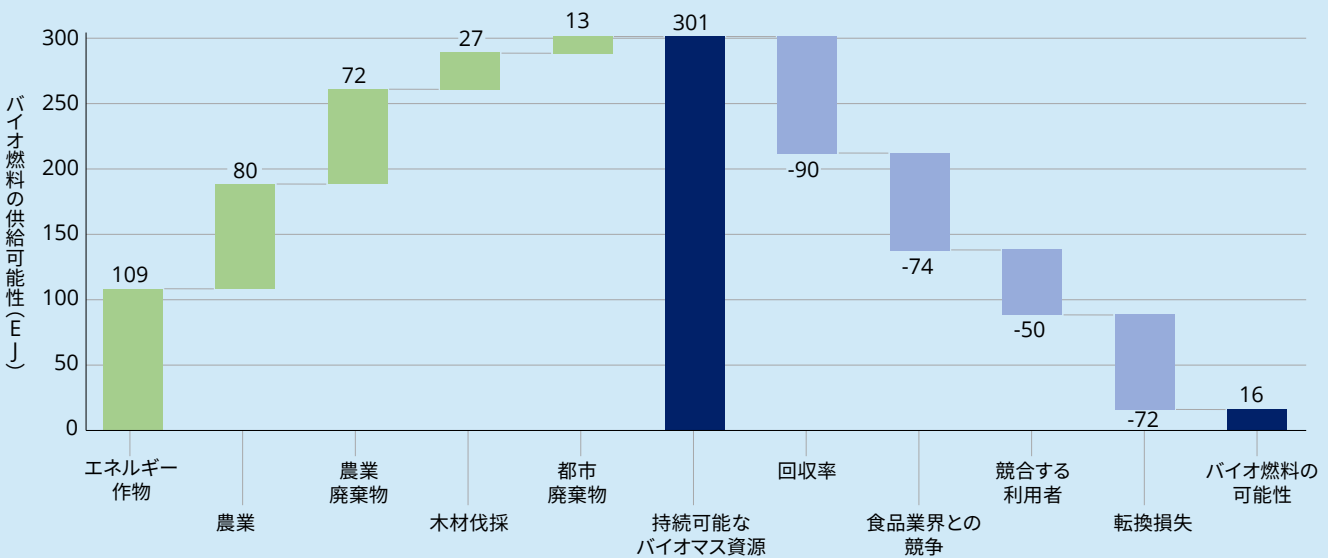
しかし、バイオ燃料の導入には下記のような課題があり、普及が制限され、大型輸送セクターで脱炭素化を達成するために利用される低炭素燃料として唯一の選択肢となることが難しくなっている。

- バイオ燃料製造は、原料を農業用途から転換させる可能性があり、食糧供給に支障をきたす恐れがある^{43, 44}。持続可能性を促進するため、バイオ燃料の利用は、持続可能で食料セクターと競合しない原料に限定すべきである。そのため多くの規制が食用油や原料（サトウキビ、大豆、ヤシなど）からのバイオ燃料製造を制限しており、コスト競争力のあるバイオ燃料供給の可能性を大きく制限している。
- 土地利用の変化（森林伐採など）や原料栽培のための追加的エネルギー消費（使用される肥料など）、燃料合成は、バイオ燃料の環境ライフサイクルアセスメントに大きな影響を与え、カーボンニュートラルに適合するバイオ燃料の利用可能量を減少させる可能性がある^{45, 46}。

バイオ燃料製造に使用される生物原料は主に以下の5つのカテゴリに分類できる。

- エネルギー作物
- 農業残渣
- 農業廃棄物
- 森林残留物
- 都市固形廃棄物 (MSW)

様々なバイオエネルギーを製造するための持続可能なバイオマスのポテンシャルは、約300EJに達すると推定されている（下図参照）。脂肪、油、グリース (FOGS) の入手は、利用可能性・回収率が理由で制限される可能性がある。IRENAによると、使用済み食用油の潜在量は世界全体で約0.8EJに達しているが、回収されているのはわずか0.2EJである⁴⁵。また、利用可能であるにもかかわらず、生物由来資源のMSWは半分しかないと推定されており、原料の質を高めるためには高度な処理を行う必要がある⁴⁶。したがって、他のエネルギー利用との競争、食料セクター、回収の限界、転換損失を考慮すると、運輸セクターでは約16EJのバイオ燃料が利用可能と推定されるが（付録3参照）、これはIEAのネットゼロシナリオで2050年までに予測される運輸需要の20%を占めるにすぎない。このため、バイオ燃料はGHG排出量を削減するうえでかなり有望ではあるものの、運輸セクター、特に空運と海運の排出削減を最大化するためには、合成燃料で補完する必要があるのである。



出所：付録3に詳述されている方法論に基づくデロイトの分析

2.2 海運の脱炭素化

海運は世界規模の貿易において重要な役割を果たしており、世界の貨物輸送量に占める割合は80%を超えている⁴⁷。海運需要は経済成長とグローバル化に牽引されて、2050年まで着実に成長することが見込まれ、年間平均成長率はt.km単位で約2%になると予想されている⁴⁸。海運セクターには多種多様なユースケースとその基盤となるセグメントがあり、それぞれに独自の船舶設計要件と形態、航路特性、脱炭素化の課題がある。しかし、排出量の約75%は、タンカー、ドライバルク船、一般貨物船、コンテナ船による長距離貨物輸送に起因している⁴⁹。空運と同様に、海運の脱炭素化は、効率化対策、消費者側の行動変容、よりクリーンなエネルギー源への切り替えに依存している。

技術開発と運航上の対策から得られる効率性

海運については、(物流の最適化により) 運搬船1隻あたりの貨物量が極めて多く、比較的低速であるため、他の貨物輸送と比較して輸送貨物1t.kmあたりのエネルギー消費量が約0.1MJ/t.kmと非常に低く⁵⁰、効率性はトラック輸送の約10倍⁵¹、空運の約100倍である³³。しかしながら海運の効率化にはまだ改善の余地があり、国際海事機関は意欲的な効率基準であるエネルギー効率設計指標を設定しており、2025年以降に市場に投入される全ての新しい船舶については、2000年から2010年の間に納入された船舶と比較して30%の効率向上が求められている⁵²。

エネルギー効率を改善する取り組みは、主に流体力学の最適化(船体設計、空気潤滑など)と推進効率の改善(長期的にはエンジンの排熱回収や風力補助推進など)に重点が置かれている。しかし、船舶の寿命は30年超と長いため、稼働中のフリートにおける最新の技術改良の導入は徐々に、ゆっくりと行われる。フリートの更新と新しい船舶の追加により、2050年までに技術的効率が年間約0.7%改善される(付録2参照)。

短期的には、海運のエネルギー効率改善の最大のポテンシャルは、運航上の対策にある⁵³。デジタル化と先進的なソフトウェア開発により、ペイロード、航路設定、速度を最適化して全体的なエネルギー消費を削減することが可能であるため、各船舶で最大38%の効率改善につながっている⁵⁴。**技術的な効率化対策と運航効率化対策の両方をまとめると、海運のエネルギー強度は2022年から2030年の間に13%低下し、2050年には0.06MJ/t.kmを下回り、平均的なフリートの効率性は現在の水準と比較して3分の1改善されると予想される。**

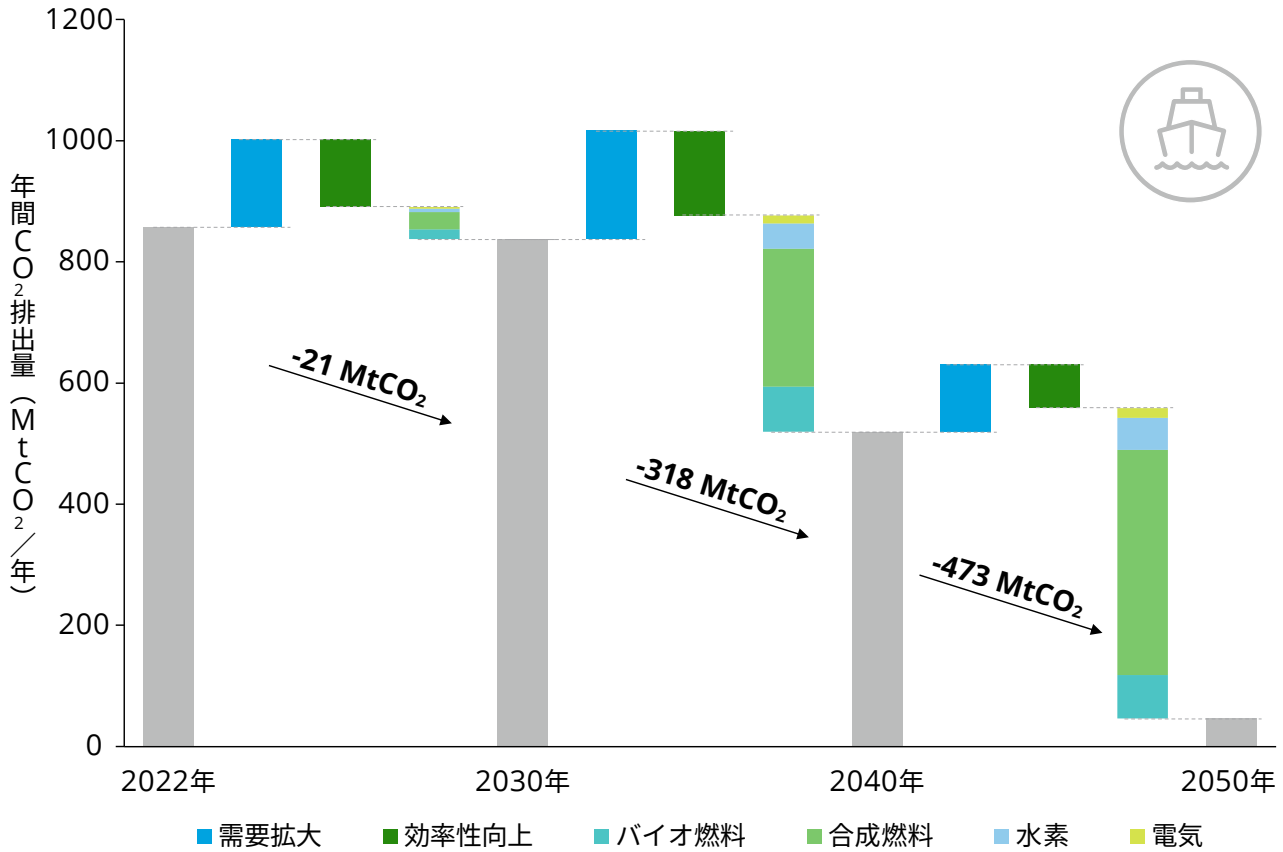
低炭素燃料の必要性

空運と同様に、海運における技術的改善および運航上の改善により予想される効率性向上については、需要の増加のほうが上回る可能性が高い。したがって、このセクターにおける脱炭素化には、クリーンなエネルギー源への移行が必要となる。一部の船舶に対しては電気と水素で動力を供給することができるが、国際輸送に特有の長距離移動には、エネルギー密度が高く、長期にわたって優れた貯蔵能力を有する液体燃料が必要である。電化に適しているのは、フェリーや沿岸船など、港で頻繁に充電できる小型船のみである。水素は、バッテリーと比較して重量エネルギー密度が高いにもかかわらず体積エネルギー密度が低く、液化した状態での貯蔵コストが高いため、長距離航海には実用的ではない。

したがって、デロイトの見通しでは、2050年までに海運セクターのエネルギー消費のうち、電力が0.4EJ(燃料混合の3%)、水素が1.3EJ(10%)を占めると予測されている。液体バイオ燃料は、既存のエンジンやインフラと互換性があり、海上での利用が実現可能な選択肢である。2030年までには、バイオ燃料は主に化石燃料との混合により、海運燃料供給の6%(0.6EJ)を占めるようになる。しかし、持続可能なバイオマスをめぐるセクター横断的競争が激しく、大規模な導入には限界がある(コラム1参照)。海運におけるバイオ燃料利用の拡大は2030年以降鈍化し、2050年までに海運セクターの混合燃料に占める割合は13%(1.7EJ)になる。

海運セクターで燃料を脱炭素化するために最有力となる選択肢は、合成液体燃料、特にe-メタノールとアンモニアである。この2つの合計が2050年までに海運燃料消費の8.9EJ(混合燃料の70%)を占め、600MtCO₂を超える排出削減となる(図4)。アンモニアもe-メタノールもドロップイン燃料ではないため、導入には新しい推進エンジンとともに専用インフラとサプライチェーンの開発が必要となる。したがって、混合燃料に取り入れるには、長期的な計画と海運業エコシステム全体にわたる協調的な投資が必要である。海運業界が最終的にアンモニアとe-メタノールのどちらを優勢とするか、あるいはよりバランスのとれたマルチ燃料アプローチに落ち着くかは、まだ不明である(詳細な比較についてはセクション3.1のコラム3を参照)。こうした不透明な環境は、座礁資産への懸念からインフラ投資を抑制するリスクがある。

図4. 2022年から2050年までの海運によるCO₂排出量の推移と様々な排出削減策の影響



出所：付録2記載の効率改善とデロイトのネットゼロシナリオに基づくデロイトの分析

「海運では2050年までにネットゼロをほぼ達成するが、これは2040年までに海運の混合燃料に重要な割合を占めるようになる合成燃料の効果によるところが大きい。2050年にはアンモニアとe-メタノールだけで海運の混合燃料の70%を占めるようになる」



2.3 空運・海運の脱炭素化に関する デロイトの見通し

デロイトの見通しでは、空運のCO₂排出量は2030年まで停滞し、主に効率化対策（排出量30%削減）と低炭素燃料の利用（同65%削減）により、2050年までに排出量の約75%が削減される見込みである。これにより、このセクターの年間CO₂排出量は2050年までに220MtCO₂に減少する。海運では2050年までにネットゼロをほぼ達成し、その時点での残余排出量は約45MtCO₂である。両セクターの残余排出量は、全ての国が2050年までにネットゼロを達成するという目標を持っているわけではないという事実に起因する。例えば、世界最大のCO₂排出国である中国と第3位のインドは、それぞれ2060年と2070年までにネットゼロを達成することを目指している⁵⁵。さらに、ネットゼロの世界的かつセクター横断的な性質を考えると、両セクターの排出量を削減するのは最も困難であり、直接空気回収や炭素回収・貯留を伴うバイオエネルギーなど、他セクターからのネガティブエミッションで相殺する必要がある。

空運と海運の長期的な脱炭素化には合成燃料が不可欠だ。先進技術と運航上の改善により効率を上げることで、燃料消費の拡大を遅らせることはできるが、バイオ燃料のポテンシャルはこれらのセクターの燃料需要の大部分をカバーするには不十分である。合成燃料は現在の混合燃料にはほとんど用いられておらず、2030年に果たす役割はわずかである（消費される26EJのうち1.6EJの供給）が、2050年までには空運・海運の主要なエネルギー源となり、燃料消費の16EJ近くを占めるようになるであろう（図5）。このような水準の合成燃料製造には150Mtを超えるクリーン水素と700MtCO₂近くのDAC由来CO₂または生物起源CO₂が必要である。この点については、クリーン水素セクターはまだ初期段階にあり、CO₂回収技術もまだ産業規模では開発されていないため、産業的にも技術的にも大きな課題となっている。

図5. 空運・海運セクターの低炭素燃料需要に関するデロイトの見通し

燃料の種類	燃料	空運での需要 (EJ)				海運での需要 (EJ)			
		2023年	2030年	2040年	2050年	2022年	2030年	2040年	2050年
バイオ燃料	船舶用バイオ燃料	-	-	-	-	0.0	0.6	1.3	1.7
	バイオケロシン	0.0	1.2	3.9	6.1	-	-	-	-
合成燃料	アンモニア/e-メタノール	-	-	-	-	0.0	1.2	3.9	8.9
	e-ケロシン	0.0	0.4	3.3	6.8	-	-	-	-
化石燃料	ケロシン	13.1	13.2	9.1	3.7	-	-	-	-
	船舶用燃料油	-	-	-	-	9.4	9.1	5.7	0.5

出所：セクション2.1および2.2で推計した空運と海運における需要の推移、付録2の効率性改善の予測、トップダウンの資源配分に基づくデロイトの分析

「デロイトのシナリオでは、空運・海運の需要増加を補うバイオ燃料と効率化対策により、空運・海運によるCO₂排出は、2030年までに停滞する。合成燃料は現在、空運と海運の混合燃料には用いられていないが、2050年には60%近くを占め、脱炭素化を実現する重要な鍵となる」

3. 合成燃料の脱炭素化のポテンシャルを解き放つ

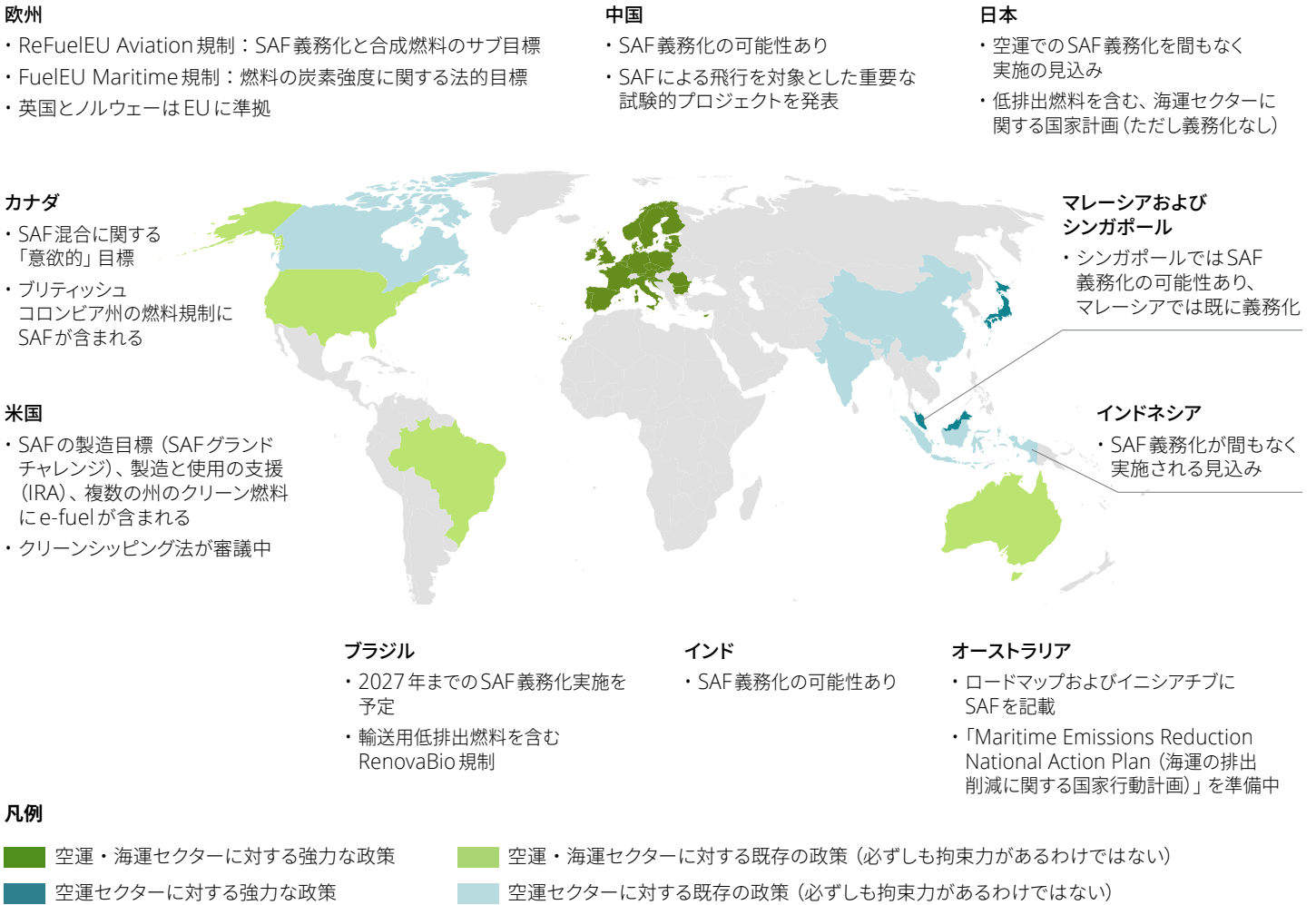
低炭素燃料、特に合成燃料は、まだ市場の初期段階にあり、規制の枠組みが存在しないか不安定な状態にある（図6参照）。国際機関によって複数のネットゼロ目標が発表されているにもかかわらず⁵⁶、世界レベルで低炭素燃料の製造または使用に関して法的拘束力のある目標は存在しない。しかし、各国レベルでは規制を導入する国が増えている。

例えば、EUの規制では、船舶運航者には燃料の炭素強度を基準値以下にすること、航空燃料については厳格なSAF混合義務を遵守することが求められている⁵⁷。

既存の規制の枠組みでパイロットプロジェクトが開始されたが、市場は依然として大きな不確実性に直面している。2024年1月の時点で、世界で発表された230件の合成燃料製造プロジェクトのうち、最終的な投資決定段階に達したのはわずか15%であった⁵⁸。



図6. 海運・空運における脱炭素化の政策環境に関するグローバルマップ



出所：IEA Policy database⁵⁹、国際交通フォーラム⁶⁰、世界貿易機関（WTO）⁶¹、および地域と国の規制に基づくデロイトの分析

「第一歩として、本質的に国際的な空運・海運セクターを世界規模で取り込むためには、世界的に調和のとれた規制や認証の枠組みが不可欠である」

3.1 克服されていない重要な技術的障壁

合成燃料の製造プロセスはまだ大規模に展開されておらず、クリーンな水素および、炭化水素の場合は持続可能なCO₂の利用可能性に依存している。電気分解による水素製造は技術的成熟度が高く、大きな可能性を秘めているが、貯蔵と輸送に関連する課題が、広範な導入と拡大を妨げている⁶。CO₂のポイント回収は長い間産業規模で展開されてきたが、特にDACなどの他の炭素除去技術は初期の開発段階にあるため大きな不確実性を抱えており、その結果、持続可能なCO₂の十分な供給を確保できるかには疑問が残る。このように合成燃料製造の技術的成熟度には幅があるため、全ての合成燃料が既存のエンジンでの使用に対して認証されているわけではない。

認証取得には何年もかかるため、未認証の合成燃料に対しては投資家も潜在的なオフテイカーもコミットメントを先送りする可能性がある。また、アンモニアやe-メタノールなどの一部の合成燃料については、特に船舶におけるエンジンなど、対応する下流技術もまた開発初期段階にあるため、不確実性を増幅させている（図7）。そのため、海運と空運のバリューチェーン全体に重大な技術的リスク（業績不振、コスト超過、建設遅延など）が生じ、財務コストが増大し、投資決定が遅れる可能性がある⁶²。さらに、アンモニアやe-メタノールなどのドロップイン特性を持たない燃料の場合、燃料供給、インフラ開発、適合エンジン技術の間の相互依存的な導入スケジュール（「鶏が先か卵が先か」の3重のジレンマ）が、既存の課題をさらに悪化させ、関連するリスクプレミアムが上昇する。

図7. 空運・海運における脱炭素化に向けた様々な技術の技術成熟度 (TRL)

カテゴリ	サブカテゴリ	主なソリューション	TRL	説明
燃料製造	合成燃料製造	e-ケロシン製造	6	フィッシャー・トロプシュ合成 (H ₂ とCO ₂ を使用) により製造
		e-メタノール製造	7	H ₂ とCO ₂ を使用して製造
		アンモニア製造	8	ハーバー・ボッシュ法 (H ₂ と窒素を使用) により製造
原料	H ₂ 製造	電気分解	9	グリーン水素：再生可能エネルギーを利用した電気分解
		CO ₂ 回収		
	CO ₂ 回収	固体直接空気回収	7	固体吸収材を用いた直接空気回収 (低温)
		液体直接空気回収	6	水溶液を用いた直接空気回収 (高温)
		持続可能な生物起源CO ₂	11	ポイント回収 (高濃度源) による持続可能なCO ₂
エンジン技術	空運	電動航空機	5	バッテリー電動航空機・ハイブリッド電動航空機
		水素を燃料とする航空機	5	燃料電池または直接水素燃焼
		ケロシンを燃料とする航空機	11	商用エンジン
	海運	水素燃料船	4-5	水素を燃料とする燃焼エンジン
		アンモニア燃料船	6	アンモニアを燃料とする燃焼エンジン
		メタノール燃料船	9	液化メタノールを燃料とする燃焼エンジン
		バイオガス燃料船	9-10	液化バイオガスを燃料とする燃焼エンジン
	電動船	8	船内バッテリーによる電動船	

出所：IEA Clean Technology Database⁶³に基づくデロイトの分析



合成燃料製造のための持続可能なCO₂調達

合成ケロシンおよびメタノールの製造には、大量の持続可能なCO₂が必要であり、そのCO₂の供給源はこれらの燃料の総コストの重要な部分を占めるため、燃料の価格競争力に大きな影響を及ぼす³⁹。しかしながら、課題は経済的なものだけではない。CO₂の回収経路はこれらの燃料とネットゼロ経済との適合性を確保するうえで極めて重要であるため、低コストで持続可能なCO₂の利用可能性と地理的分布が決め手となる。化石資源から回収されたCO₂は、リサイクルされれば、技術の拡大と必要なインフラの開発に利益をもたらさう。ただしこのCO₂は炭素循環の中でカーボンニュートラルではないため、持続可能な方法による合成燃料の製造に使用することはできない。したがって、本調査では、生物起源CO₂および直接空気回収により回収されたCO₂に由来する合成燃料に焦点を当てる。これにより、ネットゼロの目標に合わせたクローズドカーボンニュートラルサイクルの評価が可能になる。

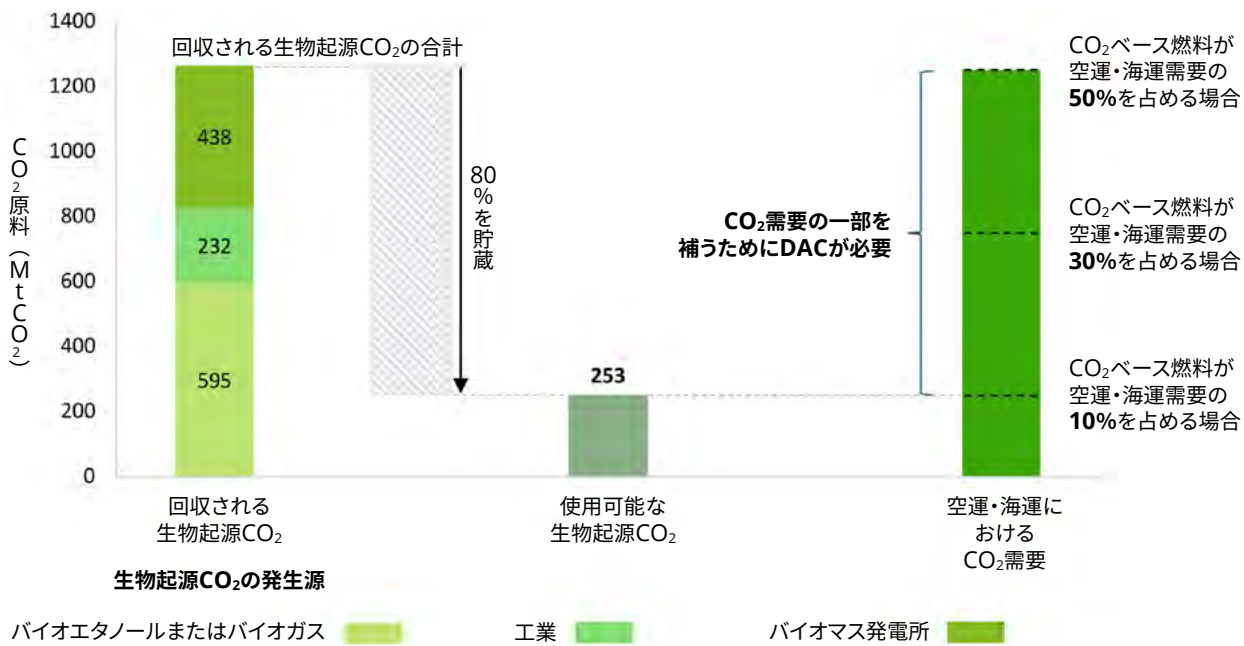
生物起源CO₂とは、動物の消化や植物の呼吸など、自然で生物学的なプロセスを通じて隔離される炭素を指す。生物起源CO₂は自然界での炭素循環の一部であるため、大気中に放出されても人為的CO₂の排出量を増加させることにはならない。生物起源CO₂のうち、主な2つの供給源は、バイオエネルギーから回収されたCO₂（例えば、特に産業セクターや電力セクターにおけるバイオエネルギーの燃焼時）およびプロセスの副産物によるCO₂の隔離である。現在、年間約2MtCO₂の生物起源CO₂が隔離され、利用されているが、その90%は副産物としてバイオエタノール設備から発生するものである³⁹。バイオガスをバイオメタンに改良することによって生じる生物起源CO₂も有望な供給源ではあるが、現在のところわずかしかない状態が続いている³⁹。CO₂がこれらのプロセスのほぼ唯一の副産物であり（副産物中の濃度は99%）、その精製と回収にかかるコストが最小であることを考えると、このような生物起源CO₂はCO₂の最も経済的な発生源の1つである（1tCO₂あたり約30米ドル）⁶⁴。

生物起源CO₂のポテンシャルは世界中に遍在しており、中長期的な利用可能性には大きな不確実性が伴う。さらに、生物起源CO₂は、最も排出削減が困難なセクターにおいて避けられないGHG排出を相殺するためのネガティブエミッションと⁶⁵、炭素ベースの合成燃料製造の両方に必要とされている。それにもかかわらず、利用可能な生物起源CO₂の量は、ネガティブエミッションと合成燃料製造の両方に必要な水準をはるかに下回る状態が続いている。

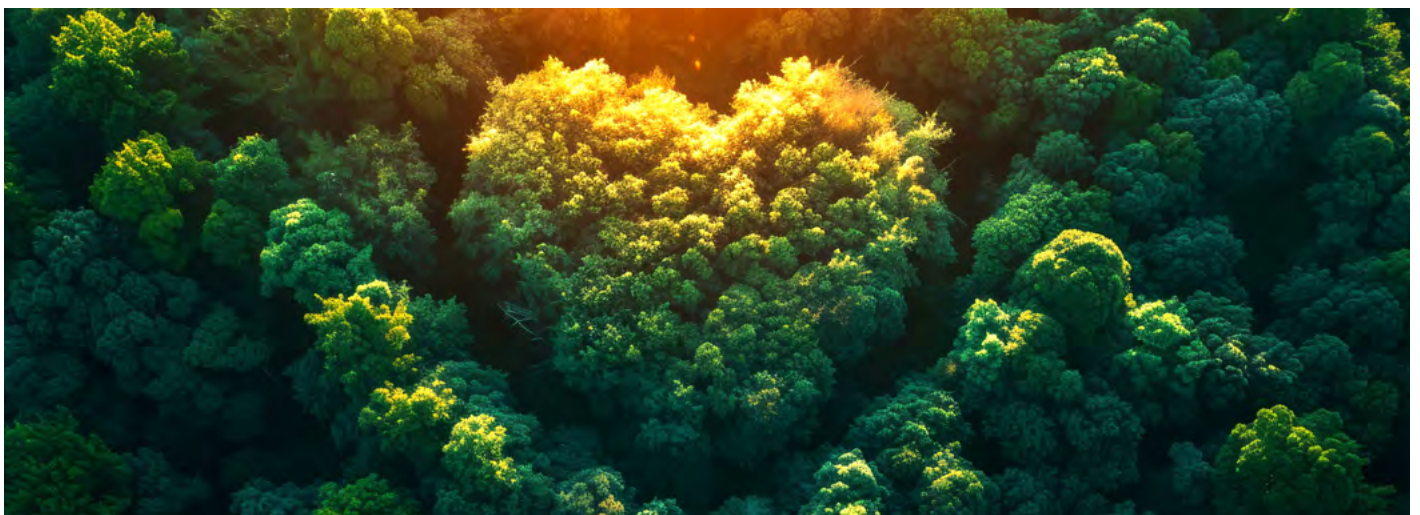
図8は、利用可能な生物起源CO₂量と、空運・海運におけるCO₂貯蔵および合成燃料の需要量を示している。生物起源CO₂をめぐる競争を考慮すると、空運・海運セクターで合成燃料の大幅な普及を達成するためには、特にDAC（直接空気回収）を含む、他の低炭素CO₂の供給源が必要になる可能性が高い。

生物起源CO₂とは異なり、DACは理論的に低炭素CO₂供給の可能性が無限であり、補完的な供給オプションとなっている。しかし、DACはまだ新興技術であり、現在のコストは1tCO₂あたり1,000米ドルを超えている⁶⁷。長期的に大幅なコスト削減を行っても、生物起源CO₂と競合できるようになる可能性は低く、少なくとも5倍を超えるコストがかかると予想される（コラム2参照）。したがって、DACについては、生物起源CO₂を補完するものとして、または生物起源CO₂が利用できない場合にのみ検討すべきである。

図8. 2050年の空運・海運セクターの予想需要と比較したCO₂原料の利用可能性



出所：様々な発生源から回収されるCO₂に関して、IEAのネットゼロシナリオの数値²⁷および「World Energy Outlook 2023」⁶⁶に基づいて実施したデロイトの分析



コラム2：直接空気回収によるCO₂原料供給

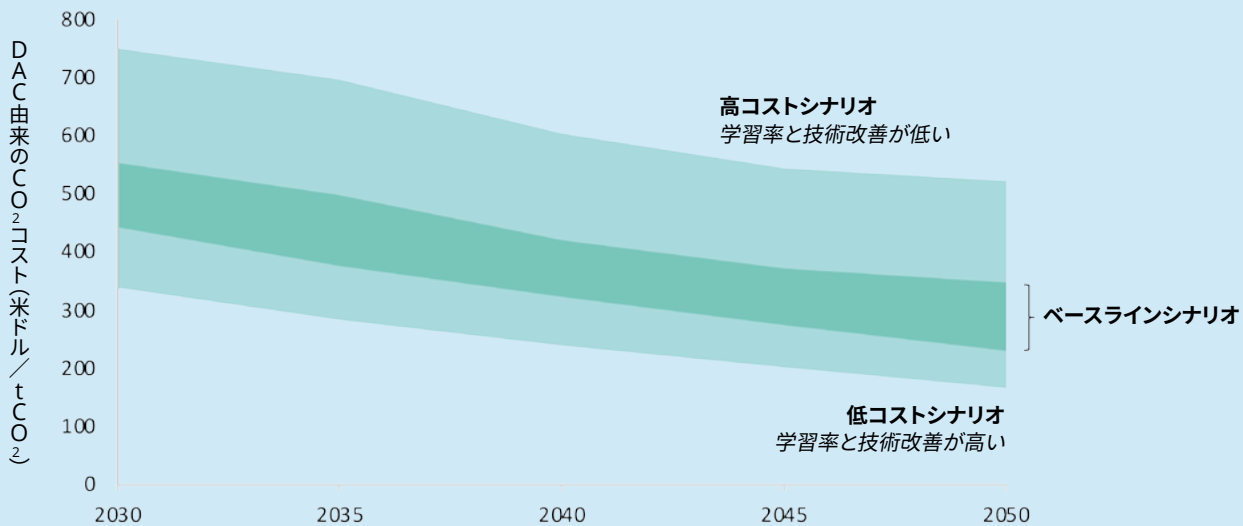
大気から直接空気を回収する方法 (DAC) は、合成燃料を製造するための低炭素CO₂の有望な供給源である。これには無限の可能性があり、プロセスに電力を供給するための十分な低炭素電力がある限り、工業施設から独立して設置できるからである。しかし、DACはまだ新しい技術であり、大規模に展開するには依然としてかなりの技術開発が必要である。現在、30近くのDAC施設が稼働しており、そのほとんどが米国、欧州、カナダにある。これらの施設で2023年に回収されたCO₂は合計で10ktに相当する⁶⁸。

現在のDAC技術は、主にCarbon Engineering社が開発した液体吸収材（液体DACまたはL-DAC）と、主にClimeworks社が開発した固体吸収材（固体DACまたはS-DAC）の2つの方法に依存している。それぞれに独特な特徴があり、主な違いの1つとして、L-DACはプロセスに必要な温度が最高で900°Cであるのに対し、S-DACは120°C以下であるということが挙げられる^{69, 70}。再生可能技術による低温熱供給は、高温熱供給と比較して多くの供給可能性があることから、再生可能エネルギーが中心となっている低炭素エネルギーシステムにおいては、S-DACのほうが適していると考えられる。したがって、本分析では、ヒートポンプによって熱が供給されるS-DACの使用に焦点を当てる。

この技術はまだ発展途上で大規模なものではないため、コストと開発には大きな不確実性を伴う⁷¹。この技術にかかる一夜費用（金利抜き建設コスト）（CAPEX）の高さのほかに、主要なコストドライバーの1つがエネルギーコストである。この技術については、大気中のCO₂濃度が生物起源の発生源または工業施設などの他の発生源と比較して低い（0.04%）⁷²ことを考慮すると、回収プロセスにおいて多くのエネルギーを必要とし、全体的な運転コスト（OPEX）が高くなる。

これらの要素に関連する不確実性は大きいですが、DAC由来の低炭素CO₂の供給コストは、規模の経済、技術革新、エネルギーコストの低下により、今後数十年で低下することが予想される⁶⁷。技術経済の不確実性と地域差（主に電力コストと資本コストの差）の両方から生じる予想コストの範囲を下図に示す。デロイトのシナリオでは、DACの平均コストは、2030年1tCO₂あたり約500米ドルから、2050年までには1tCO₂あたり300米ドル強まで低下すると予測されている。最も楽観的なコスト低下シナリオにおいても、2050年時点でのコストは1tCO₂あたり200米ドルを上回り、これは2050年における合成炭化水素コストの約3分の1から半分を占めることになる（セクション3.2参照）。

直接空気回収コストの推移と不確実性（固体DAC）



出所：IEA⁷⁰、IEAGHG⁷³、TNO⁷⁴のデータに基づくデロイトの分析

DACの今後の開発を取り巻くコストの不確実性も、移行に関する将来の見通しに影響を及ぼす。現在、e-メタノールは、アンモニアと比較して成熟度が高く、常温で保管できるため、海運にとって有望な合成燃料の選択肢と考えられている。新たに建造中の船舶の10%近くはメタノールを燃料として運航するように設計されているが、建造中または運航中のアンモニア燃料船の数はごくわずかに留まっている⁷⁵。

しかし、e-メタノール製造に使用されるCO₂がDAC由来の場合には、かなり高額になる（コラム3参照）。したがって、水素のコストのみに依存し、不確実性の高いDAC技術開発の影響を受けにくい**アンモニアも海運セクターにとって有望な長期的燃料の選択肢である。**

コラム3：e-メタノールかアンモニアか：主な競争要因は何か

長期的な気候目標を達成するためには、海運セクターの合成燃料への移行は不可避であるが、将来の燃料ミックスの構成は大きな不確実性があり、e-メタノールとアンモニアの両方が有力な選択肢と考えられている。

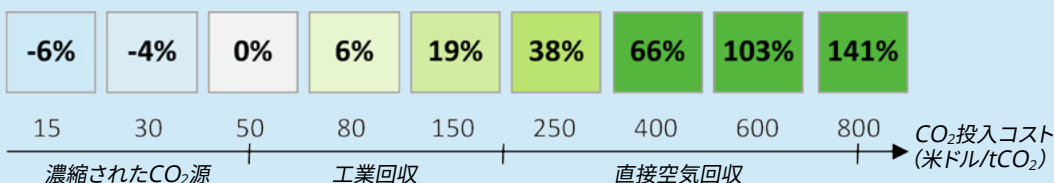
近い将来、e-メタノールは、その技術的成熟度からアンモニアよりも早期に使用されるようになると想定される。メタノールは常温常圧で保管できるため、既存のインフラやオペレーションプロセスへの改修が最小限で済む。**海運におけるメタノールの広範な使用は既に道が開かれている。**メタノールの船舶燃料としての使用は2020年にIMOで承認され、約20隻の船舶が既にメタノールを燃料としており、120を超える港湾がそれに対応できる燃料補給インフラを提案している⁷⁶。一方でアンモニアを海運で展開するには複数の技術的障壁がある。アンモニアエンジンはまだ商用化されていないことに加え、アンモニア分子の毒性や低温要件が燃料補給や保管における新たな課題となっている。

メタノール船は、環境的移行を管理するうえで、フリートの運航者に高い柔軟性を提供する。化石由来のメタノールを船舶燃料として使用する場合であっても、従来の船舶燃料と比較してGHG排出量を削減するものであるため、この選択肢はe-メタノールが不足する可能性に対してのリスク分散となる。また、船舶が化石燃料から合成燃料へ徐々に移行する機会となるため、移行をより良く管理することが可能になる。e-メタノールを燃料とする船舶への投資を好む傾向は、現行の船舶受注記録から確認できる（下図参照）。船主はメタノールのソリューションに優先的に投資しており、アンモニア船26隻に対して240隻を超える発注が登録されている。**この販売数から、メタノールがアンモニアよりも短期的に有利であることが確認できる。**

造船業者はまた、オプション付きの船舶、すなわち代替燃料用に容易に改造できるよう特別に設計された従来型エンジンを装備した船舶を商品化している。このカテゴリでは272隻の「アンモニア対応」船が発注され、「メタノール対応」船の注文数（353隻）に続いた⁷⁵。このことは、e-メタノールとアンモニアの中期的な競争について、どちらのソリューションを支持するかについて業界のコンセンサスが得られておらず、非常に不安定な状況であることを示唆している。しかし長期的には、カーボンニュートラルなCO₂を手頃な価格で入手できるかどうかの懸念から、e-メタノールに関する見通しは不透明である。

e-メタノールがアンモニアとの競争でコスト競争力を維持できるのは、低コストの生物起源CO₂から製造される場合のみであり、供給源に制約があれば、アンモニアの展開が強く支持されることになるだろう。下図は、投入されるCO₂のコストに応じたe-メタノールとアンモニアの相対コストを示している。

メタノールとアンモニアのコスト差

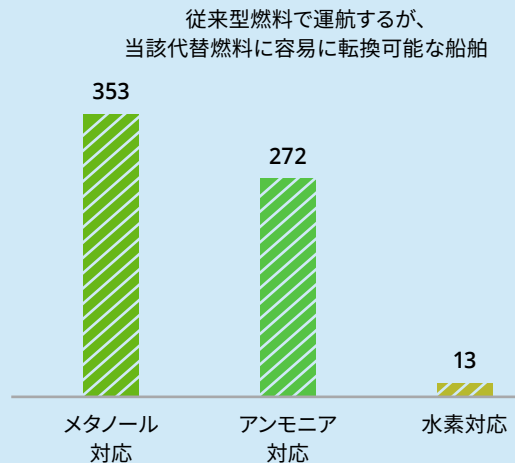
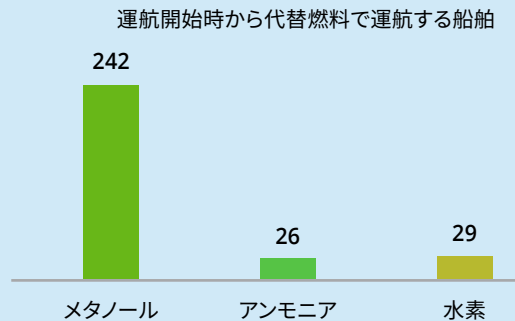


出所：HyPEの結果に基づくデロイトの分析

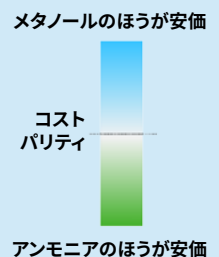
DAC由来のCO₂に依存する場合、e-メタノールはアンモニアの2倍を超える製造コストがかかる可能性がある。**したがって、生物起源CO₂の利用可能性では化学物質や燃料の製造に予想されるCO₂需要を満たすには不十分であると考えられ（図8）、海運におけるe-メタノールの可能性は依然として限定的である。**

e-メタノールの取り扱いに関連する技術的な制約はアンモニアより少ない。そのため、メタノール船への投資とオペレーションにかかるコストはアンモニアベースの選択肢よりもやや低い水準にある。しかし、コスト差は非常に大きく、DAC由来のe-メタノールは、総所有コストの枠組みの中で評価した場合でも、アンモニアよりもかなり高額になる³⁹。

現行の受注記録における水素ベース代替燃料船（2024年7月現在）



出所：Clarksons Research社の調査⁷⁵に基づくデロイトの分析

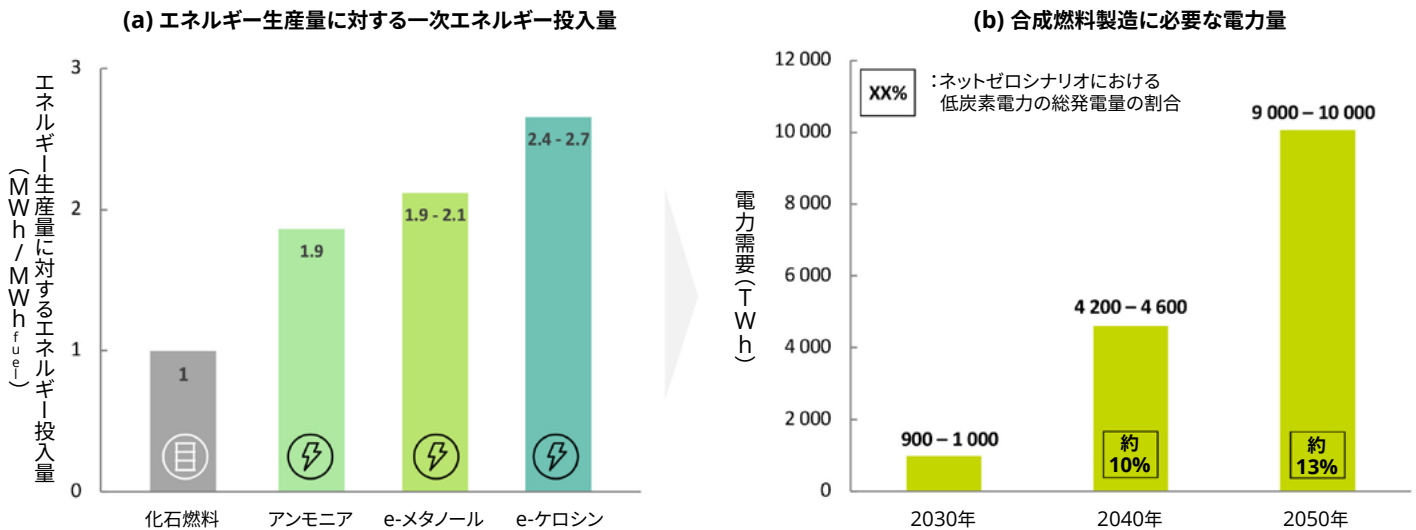


合成燃料製造のエネルギーへの影響

合成燃料は非常に大量の一次エネルギー投入量を必要とする。水素製造、燃料合成、DACはいずれもエネルギー集約度の高いプロセスであり、合成燃料製造には、製造される燃料の最終エネルギー含有量の1.9倍から2.7倍に相当する一次電力投入が必要である（図9 (a)）。合成燃料が空運・海運セクターにとって脱炭素化を実行できる選択肢となるにつれ、クリーン電力供給能力の拡大が必要となる。しかし、広範な電化がエネルギー転換の主要な部分であることを考えると、ネットゼロの将来において大幅に増加すると予想されるクリーン電力需要全体のうち、合成燃料は対応可能な割合に収まる（最大13%）と予想される（図9 (b)）。

合成燃料の製造を拡大するうえでのインフラ面の課題は、発電能力の拡大にとどまらない。e-ケロシンは既存のインフラを通じて貯蔵、輸送、燃料供給を行うことができるが、**合成燃料を導入するには**、水素の製造と流通、CO₂の回収と輸送、e-メタノールとアンモニアの貯蔵と燃料供給施設の新設など、**総合的なインフラ整備が同時に必要となる**。

図9. 合成燃料製造に必要なエネルギー（2030年・2040年・2050年）



出所：デンマークエネルギー庁⁷⁷、Global CCS Institute⁷⁸、IEA²⁷に基づくデロイトの分析。この範囲は、生物起源CO₂による製造とDAC由来CO₂による製造のエネルギー強度の差に相当する。総電力需要は、セクション2.3で説明したデロイトの見通しに基づいている。

「合成燃料の脱炭素化のポテンシャルを引き出すには、再生可能エネルギーの発電容量の大幅な拡大が不可欠であり、2050年までに発電量を年間1万TWhに引き上げる必要がある。これは現在の世界の再生可能エネルギー発電量を上回り、過去20年間の進歩を凌ぐものである」

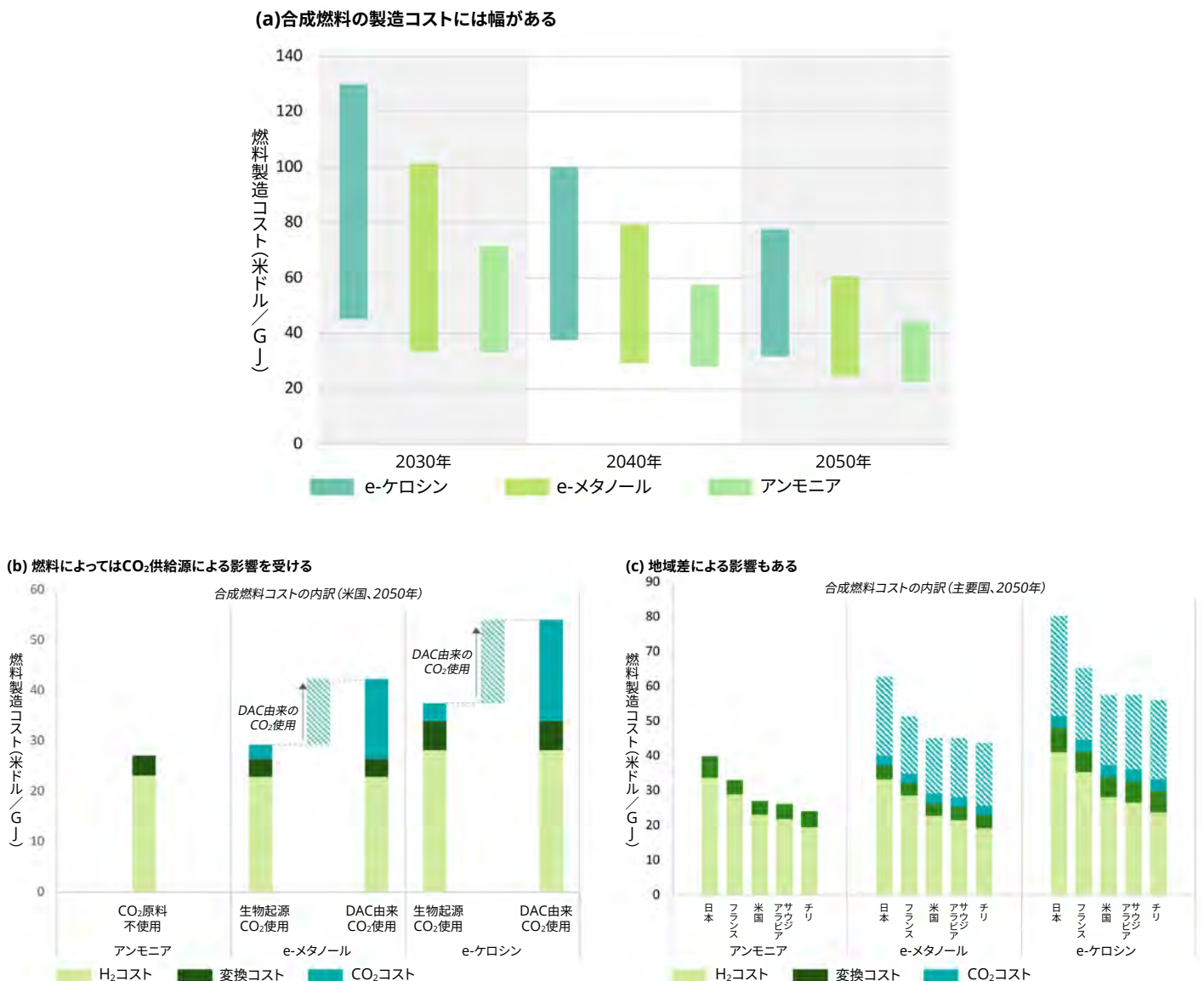
3.2 合成燃料のコスト高への対応

燃料コストは、空運においても海運においても主要なコスト構成要素であるため、合成燃料のコスト競争力はその普及を妨げる大きな障壁となっている（図10 (a)）。アンモニア製造は原料として水素のみを必要とするため、そのコストのほとんどは水素の製造コストにより決まる。一方で、e-メタノールやe-ケロシンなどの合成炭化水素はCO₂を必要とし、そのコストは低炭素CO₂の供給源の影響を非常に受けやすい。生物起源CO₂の代わりにDAC由来のCO₂を使用すると、e-メタノールの製造コストが45%、e-ケロシンの製造コストが44%上昇する可能性がある（図10 (b)）。

資源は世界中で均等に分布しているものではなく、天然資源（クリーン水素、生物起源CO₂など）の利用可能性、技術コスト、資金調達条件の地域差がコストの差につながっている（図10 (c)）。特に、主要なコストドライバーの1つであるグリーン水素のLCOH*は、低炭素電力供給のコストと利用共有可能性（つまり、再生可能エネルギーの源の質）に大きく左右される。そのため、合成燃料の製造コストは地域によって大きく異なる。ただし、更なる知見の蓄積、技術開発、規模の経済により、合成燃料の主なコストドライバーは今後数十年で大幅に低下し、競争力が高まると予想される。

* LCOH : Levelized cost of Green Hydrogen

図10. 合成燃料の製造コストの差（技術別・地域別・年度別）



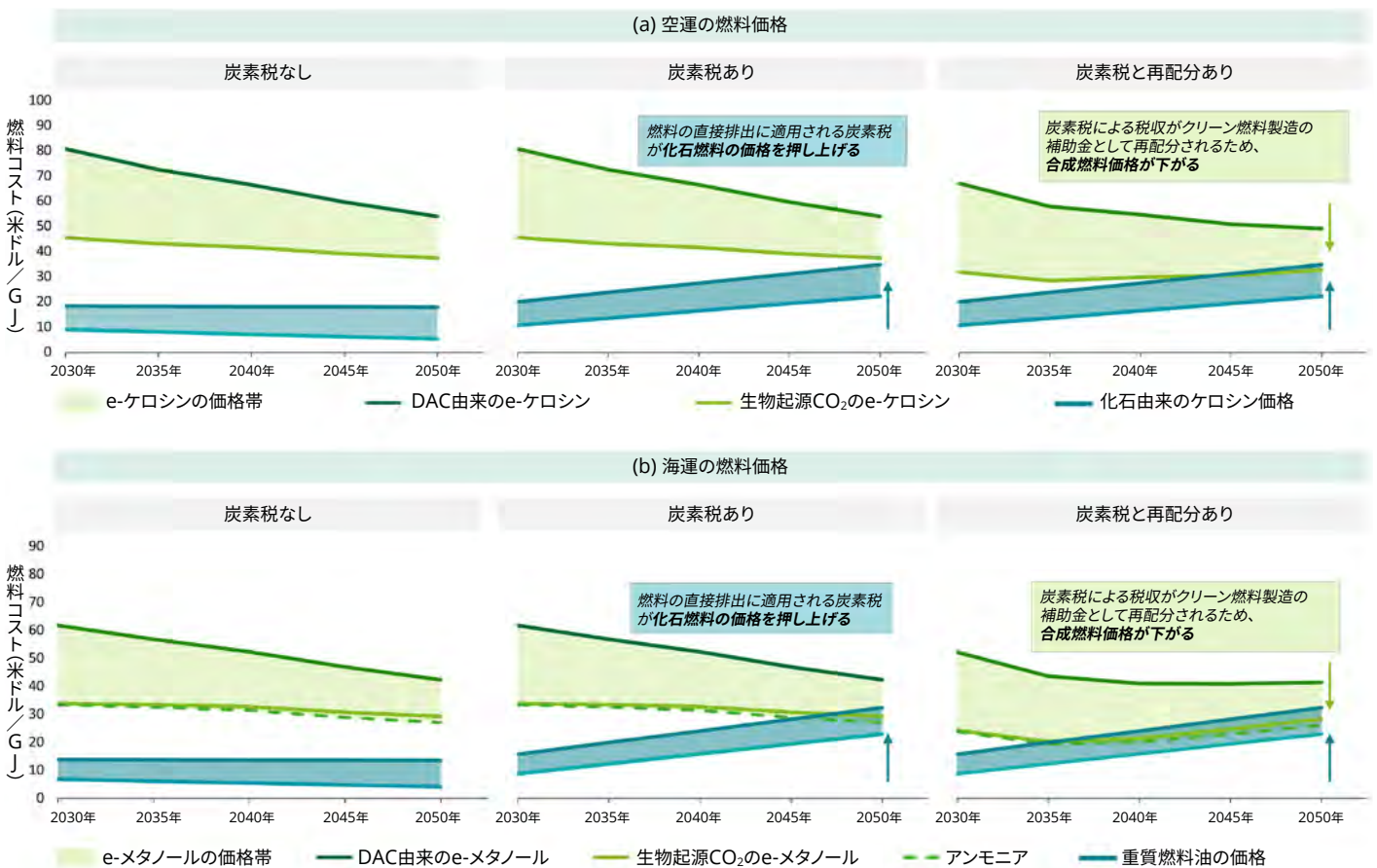
出所：技術経済モデルおよびHyPEの結果に基づくデロイトの分析

合成燃料は従来の化石燃料に比べて著しく高額である。地理的要因とCO₂の供給源にもよるが、合成燃料の製造には、空運と海運の両方で、化石燃料の平均価格の2倍から10倍のコストがかかる可能性がある(図11左側)。合成燃料のコスト低下が予想されてはいるものの、大規模な政策介入がなければ、この価格差は長期的にみても持続する可能性が高い。

化石燃料の価格に炭素価格の要素が加わることにより⁷⁹、海運セクターにおいてのみ、2045年以降に初めて合成燃料の製造コストが化石燃料の価格と交差する(図11中央)。炭素価格から得られた収入を合成燃料の製造補助に充てるといった支援的な仕組みを導入することで、合成燃料の製造コストは時間の経過とともに低下し、かつ安定化すると考えらえる。

短期的(コスト格差が最も大きくなる期間)には、炭素収入は限られた数の合成燃料プロジェクトに集中するだろう。逆に、長期的にみれば、炭素価格は上昇するが、化石燃料の使用が減少するため、炭素価格が適用される排出量は少なくなる。このような支援制度はコスト格差を減らし、合成燃料への移行を加速させるだろう。一部のケースにおいては、早ければ海運では2035年、空運では2045年にコスト競争力を達成できる可能性がある(図11右側)。しかし、低コストのCO₂原料の入手可能性が限られていることと、クリーン水素と持続可能なCO₂の両方をめぐるセクター間の競争により、合成燃料供給の大部分(特にe-ケロシンとe-メタノール)は、長期的にみても従来の化石燃料よりも高額な状態が続くであろう。

図11. 海運と空運における化石燃料と合成燃料にかかる燃料コスト差の経時的変化



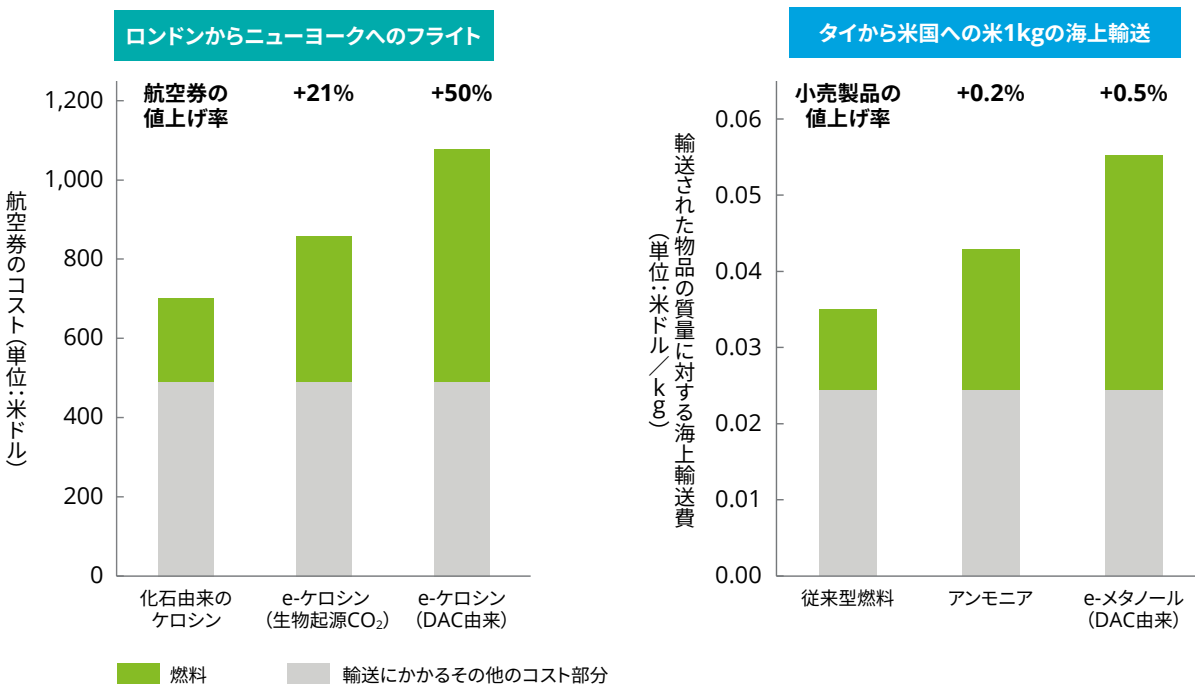
出所:技術経済モデルとHyPEの結果に基づくデロイトの分析。化石燃料の価格帯はIEAのデータ³⁹に基づいており、原油価格のトレンドはネットゼロシナリオと公表政策シナリオに基づいている⁶⁶。炭素税: IEAのネットゼロシナリオに沿って、2030年の25米ドル/tCO₂から2050年には250米ドル/tCO₂まで直線的に上昇する。合成燃料の価格は米国のモデルコストに基づいている。

合成燃料の製造には、化石燃料と比較して、追加的な投資コストが必要であるが、その規模は限定的である。空運・海運業界向けに16EJの低炭素燃料を製造するサプライチェーンを構築するには、変換プラントに加えて、容量2,500GWの風力発電と太陽光発電、2,000GWの水電解装置、700MtのカーボンニュートラルなCO₂の開発が必要となる。合計すると、2050年までに必要となる投資総額は3兆2,000億米ドルに達する。この投資ニーズは年間で1,300億米ドル未満であり、ひとたび化石燃料業界と同じ供給量になれば、現在の航空燃料・海上輸送燃料に対する支出と同程度になり⁸⁰、化石燃料業界への現在の投資（2024年には1兆1,000億米ドルと見込まれている⁸¹）のごく一部にとどまる。

海運会社や航空会社の利益率が限られていることを考えると、低炭素燃料への切り替えにかかる追加コストは最終消費者に転嫁される可能性が高い。それにもかかわらず、空運・海運セクターにおける合成燃料導入が与える影響には大きなばらつきがある（図12）。燃料費は、航空旅行運賃の重要な部分を占め、航空券価格の約25%から30%を占めている⁸²。

化石由来のケロシンをe-ケロシンに35米ドル/GJで置き換えると⁸³、ロンドンからニューヨークまでの7時間の飛行コストは150米ドル以上増加する可能性がある⁸⁴。もしe-ケロシン製造のためのCO₂がDAC由来であれば、コスト増は2倍以上となり、航空券の代金に約380米ドルが加算されることになる。ただし、合成燃料の導入は非常に緩やかであり、継続的な製造コストの低下が同時に起こると予想される。これは、短期的にも長期的にも、消費者と航空会社への経済的影響を緩和するのに役立つだろう。対照的に、海運セクターでは、海上輸送される商品の最終価格のうち輸送コストが占める割合が小さいため、最終消費者は燃料価格変動の影響をほとんど受けない。したがって、アンモニアやe-メタノールへの切り替えによるコスト増は、最終消費者にとっては目立つものではない。例えば、タイから米国への米1キログラムの輸送コストは約3.5米セントであるが⁸⁵、たとえ燃料を従来の2倍の価格のものに転換したとしても、追加コストの上昇幅は1%未満である。（図12）。まとめると、運輸セクター間で影響は大きく異なり、海運セクターは空運セクターと比較してコスト上昇分を最終消費者に転嫁しやすいということになる。

図12. 空運・海運において合成燃料に切り替えることによる輸送コストおよび最終製品への影響



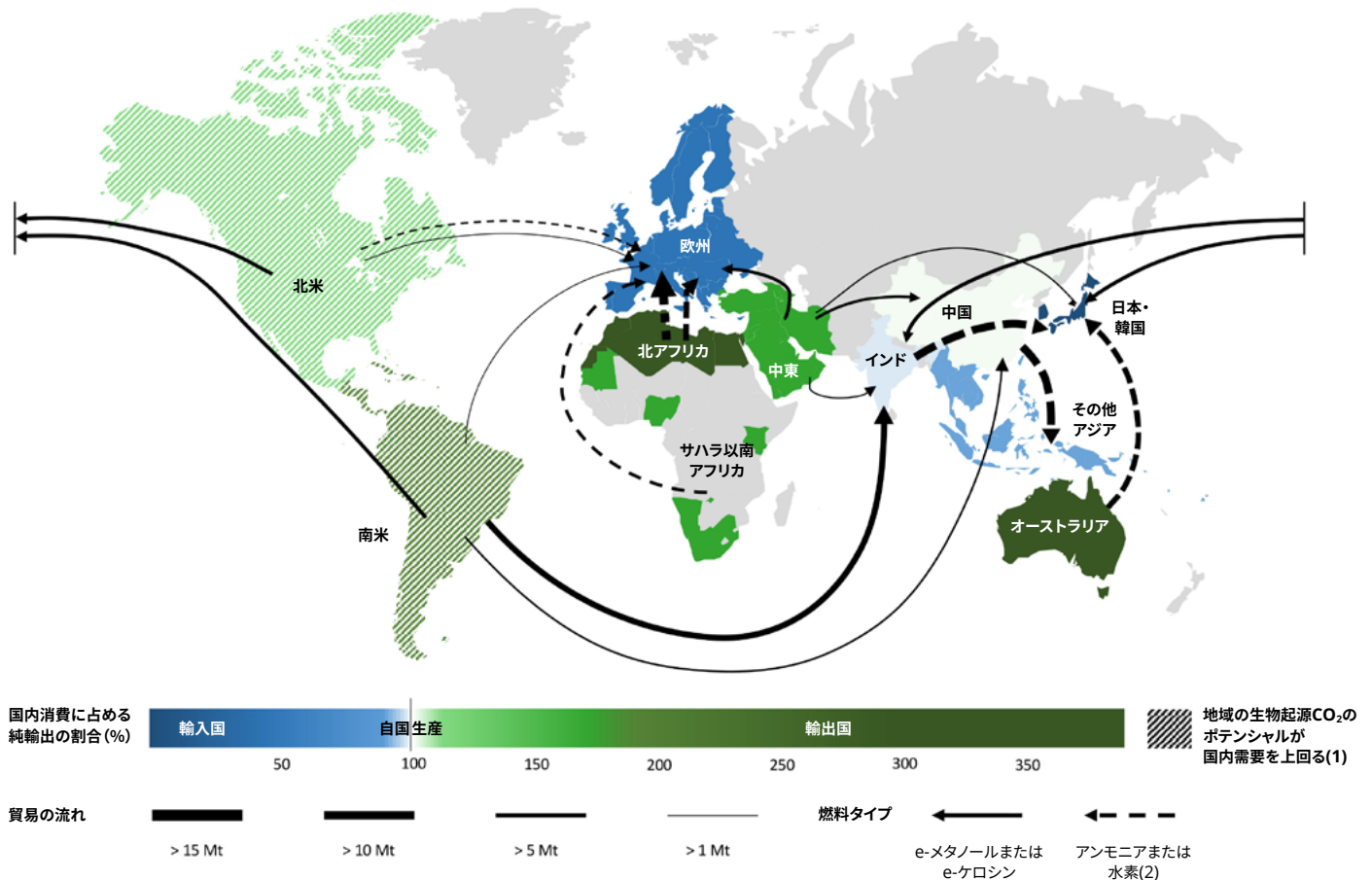
出所：HyPEモデルに基づくデロイトの分析。モデル化された合成燃料のコストは、米国における2040年の平均製造コストに相当する。

3.3 需要と供給をつなぐ貿易の役割

最も有利な生産拠点は必ずしも需要拠点の近くにあるとは限らない。合成燃料の輸送コストは製造コストに比べて低いため、**世界規模の貿易によってコストを削減し、地域間の不均衡を緩和することができる**⁶。北米や南米のように、再生可能エネルギー源や生物起源CO₂が豊富な地域は、合成燃料、特に最終製品の価値が高く輸送コストが低いe-ケロシンの主要製造国になるのに有利な立場にある（図13）。これらの地域のCO₂のポテンシャルの大きさは、当該燃料の製造において競争上の優位性をもたらす。

一方、北アフリカやサハラ以南アフリカのように、再生可能エネルギーは豊富であるものの生物起源CO₂が限られている地域は、CO₂成分を含まない合成燃料として、アンモニアの製造と輸出に主に焦点を当てることが最も適している。このような地域では生物起源CO₂が不足しているため、炭素ベースの合成燃料の輸出には制約がある。それでも、その優れた再生可能資源により、自国をアンモニアの主要輸出国として位置づけることができる。

図13. 2050年における最終用途分子別水素誘導体の貿易に関するグローバルマップ



(1) 生物起源CO₂の利用可能性は、地域レベルで評価される。
 (2) アンモニアは、水素を長距離輸送するためのキャリアとして使用することができる。北アフリカから欧州への水素の2番目の矢印は、パイプラインで輸送される純水素である。

出所：HyPEモデルの結果に基づくデロイトの分析

インフラの利用可能性は、合成燃料の貿易に関するキードライバーである。中東は、生物起源CO₂の大きなポテンシャルがないにもかかわらず、e-メタノール輸出の最有力候補として浮上している。これは、既存の輸出インフラに支えられ、低炭素水素の豊富なポテンシャルと、DACを展開する経済的能力を兼ね備えているためである。この地域は欧州のような主要な需要拠点に地理的に近いという利点を生かし、e-メタノールを輸出するのに有利な位置にある。e-メタノールはe-ケロシンより輸送コストは高いが、短距離輸送では依然として経済的に実行可能な選択肢である。ヨーロッパ、日本、韓国など、需要拠点となる可能性の高い他の地域とは異なり、中国とインドには再生可能エネルギーの大きなポテンシャルがある。それにもかかわらず、十分な生物起源CO₂がないため、輸入と輸出の両方を行う可能性が高い。すなわち、大量のe-メタノールとe-ケロシンを輸入し、アンモニアと水素を輸出することで、バランスのとれたほぼ自立可能なエネルギー経済を達成することになるだろう。

合成燃料の戦略的な国際貿易は、地域の特性や資源保有量、インフラの利用可能性、経済力によって推進され、需要と供給のバランスをとるうえで極めて重要である。この複雑な貿易ネットワークによって、地域の不均衡を緩和するだけでなく、資源配分を最適化することによって全体的な経済効率を高めることもできるのである。

世界がネットゼロの未来に向かうなかで、合成燃料の国際貿易は、全ての参加国にとって、エネルギー安全保障、経済的な実行可能性、環境の持続可能性を確保するうえで極めて重要になるだろう。



4. 行動の必要性

空運・海運の脱炭素化には大量の合成燃料製造が必要であり、デロイトの見通しでは、2030年までに1.6EJ、2050年までに16EJ近くに達する。後者の数値は、150Mt以上のクリーン水素と、700MtCO₂近いDAC由来および生物起源CO₂に相当する。加えて、水素製造、燃料合成、直接空気回収を合わせると、使用する低炭素CO₂の供給源にもよるが、2050年までに9,000TWhから10,000TWhのクリーン電力供給（2023年の世界総発電量の3分の1）が必要となる。

このような水準のクリーン電力供給を達成することは大きな課題であり、現在の世界の再生可能エネルギー電力供給を1,000TWh超上回っている⁸⁶。したがって、合成燃料の脱炭素化のポテンシャルを引き出すためには、過去20年の進歩を上回るような再生可能エネルギー電力容量の大幅拡大が不可欠である⁸⁶。

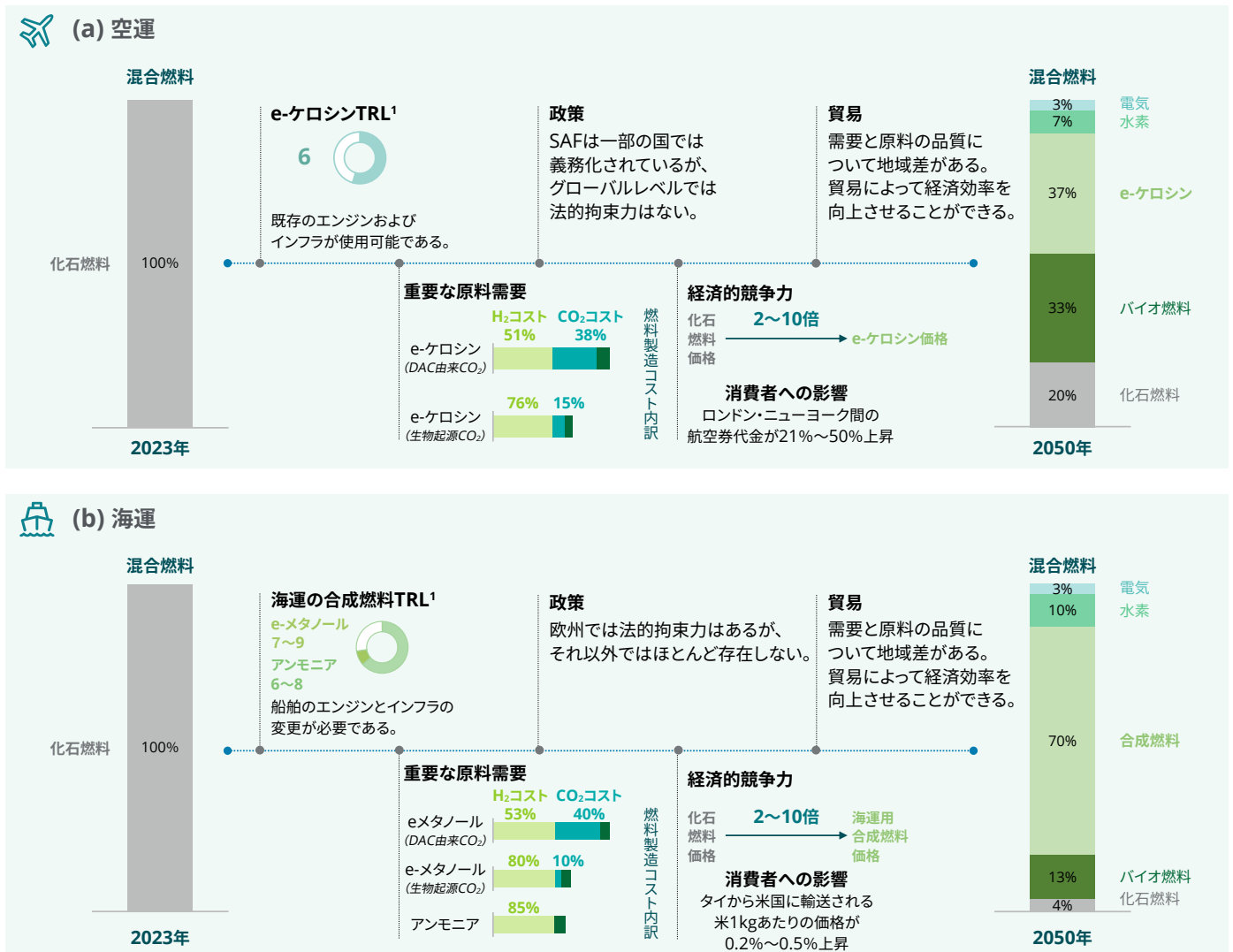


4.1 低炭素燃料の普及に向けた今後の課題

現在、空運と海運は主に化石燃料に依存している。合成燃料が脱炭素化の鍵を握っているが、技術準備レベルが比較的低く、製造コストも高いため、急速な普及が妨げられている。空運に関しては、既存のインフラや航空機技術はe-ケロシンにほぼ適応可能だが、その製造はまだ初期段階にある(図14(a))。逆に、アンモニアとe-メタノールはより成熟していると考えられるが、燃料供給のインフラストラクチャと同様に、新しい燃料補給技術とエンジン技術の開発が必要である(図14(b))。

こうした本来国際的なセクターが効果的に脱炭素化を進めていくためには、地域や国の政策だけでなく、世界的に調和のとれた規制の枠組みが不可欠である。つまるところ、現在の化石燃料中心の空運・海運セクターからの移行には、政策立案者、国際機関、燃料供給業者、製造業者、港湾・空港当局、航空会社、海運会社など、これらのセクターに関わる全てのステークホルダーによる協動的で意欲的な取り組みが必要なのである。

図14. 空運・海運の脱炭素化—ニーズと手段の概要



¹ TRL=技術成熟度

出所：前セクションまでの所見に基づくデロイトによる総括

4.2 進むべき道

政策立案による地域市場創生の基盤構築

政策立案者は低炭素燃料への効果的な移行のための条件、規制環境、継続的な推進力を創出するうえで中心的な役割を果たす。エネルギーおよび気候に関する戦略やセクター別ロードマップなどの明確な戦略を策定し、産業界が必要としている可視性を提供することで、投資に伴う不確実性やリスクに対処できるようにすべきである。割当量や混合義務などの有効な規制手段を実施することによって、これらの燃料のオフテイクと漸進的な規模拡大を開始することができ、サプライチェーンの全ての関係者を動員して、化石燃料よりもコストのかかる行動を長期にわたってとらせることができる。経済面では、義務や割当量がオフテイクの導入に不可欠である一方で、長期的には政策立案者が税金と支援制度を導入することでコストギャップを埋めることが可能である。これらの対策だけはコストギャップを完全に克服するには十分ではない可能性があるため、追加的なメカニズム（化石燃料の価格設定など）を導入し、その収益を低炭素燃料に振り向けることで、合成燃料の化石燃料との収支均衡を早期に達成することができるだろう。

世界市場を創造するための共通ルールの確立

業界団体や関連機関などの**国際組織**は、世界中で調整された、カーボンニュートラルへの移行を可能にするための共通規則や基準を定義するうえで中心的役割を果たしている。強固な認証制度は、信頼できる持続可能性の保証を提供することにより、低炭素燃料のバリューチェーン全体にわたる価値創造に役立つ。合成燃料のカーボンフットプリントは、製造経路や地域によって大きく異なる可能性があるため、タクソミー、定義、カーボンプライシングの慣行など、ルールセットや目標を世界中で統一することにより、カーボンリーケージや裁定取引の機会を回避することができるであろう⁸⁷。例えば、持続可能な燃料の定義を世界的に統一することで、海運における環境規制が、企業がコスト最小化戦略の一環として実施してきた「便宜置籍」⁸⁸によって弱体化されてきた歴史的にみられるような規制の乱用防止に役立つであろう⁸⁹。

持続可能な原料の積極的確保

空運セクターの脱炭素化は、ドロップイン燃料の選択肢であるSAFに依存するが、海運セクターでは主にアンモニアとe-メタノールを使用する。これらの燃料は初期の開発段階にあり、サプライチェーンが複雑なため、供給にはかなりのリードタイムがかかる。

燃料供給者は新たなサプライチェーンをゼロから構築することになり、また戦略的拠点に早期に投資し、上流のサプライチェーン関係者とパートナーシップを締結することで、低コストのクリーン水素とCO₂原料を確保する必要がある。

技術的不確実性および市場の不確実性は重大なリスクを伴い、製造および輸送の設備の資金調達コストを増大させ、その開発を妨げる。長期的なオフテイク契約や様々な保証方法（業績、収益など）などのリスク軽減措置により、こうしたリスクの一部を軽減し、投資を可能にし、資金調達コストを削減することができるであろう。最後に、合成燃料サプライチェーンの構築段階では、バイオ燃料の混合は技術のスケールアップと必要なインフラの開発に役立ち、空運・海運の混合燃料において合成燃料が徐々に増加することで、脱炭素化目標の達成に寄与するであろう。

適切なインフラと適応した推進技術

港湾当局および空港は、必要な燃料補給インフラを整備する責任があるため、空運・海運における合成燃料の導入を可能にする主要な要因である。現在の空港インフラは既に最小限の調整で利用可能だが、港湾インフラを低炭素燃料に適応させるには、より大きな課題がある。港湾局は、どの燃料をいつ、どのくらい供給するかを慎重に検討すべきであろう。また、従来の化石燃料船の継続的な燃料補給をサポート可能なマルチ燃料インフラを開発する必要がある一方で、進歩的な海運会社がe-メタノールやアンモニアを燃料とする船舶に燃料を補給できるようにする必要もある。

航空機製造業者および造船業者は、低炭素燃料で運航する船舶と航空機の利用可能性を確保すべきである。空運セクターでは、航空機エンジンが合成燃料とバイオ燃料を高配合した燃料に適合するようになる必要がある。しかし、造船会社にとってはこれまで船舶燃料として使用されてこなかったe-メタノールやアンモニアに対応する船舶を開発する必要があるため、移行はより複雑なものとなる。座礁資産のリスクを軽減するために、**航空会社および海運会社**は移行要件を満たすよう積極的に自社のフリートを適応させる必要がある。例えば、「デュアル燃料」または「合成燃料対応」船舶は、化石燃料と低炭素燃料の両方で運航する柔軟性を提供することにより、または後の段階で低炭素燃料への移行を可能にすることにより、適切な選択肢となり得る。さらに、利用可能な持続可能CO₂とクリーン水素原料が世界中に偏在していることから、固定の港を持つ大規模な海運会社は、燃料調達戦略において地理的特性を考慮することができる。

容易に成果を出せる効率化対策

長期的には、気候目標を達成する唯一の方法は、化石燃料から低炭素燃料に移行することである^{1, 27}。しかし、必要な技術はまだ完全には成熟しておらず、緊急に気候変動に対処するには、迅速な脱炭素化が必要である。効率性の向上により、運航面でも技術面でも、燃料消費を大幅に抑制し、関連するオペレーションコストを削減（競争力の維持）、GHG排出量も削減することができる。**航空会社や海運会社**は、航路の最適化、速度制御、物流の最適化など、最小限の先行投資で済む運航効率化対策に投資することで、このクイックウィンを実現することができるであろう。排出量の削減に加えて、このような対策によって高額な合成燃料の消費を削減することにより、長期的にみても競争力を維持することができる。

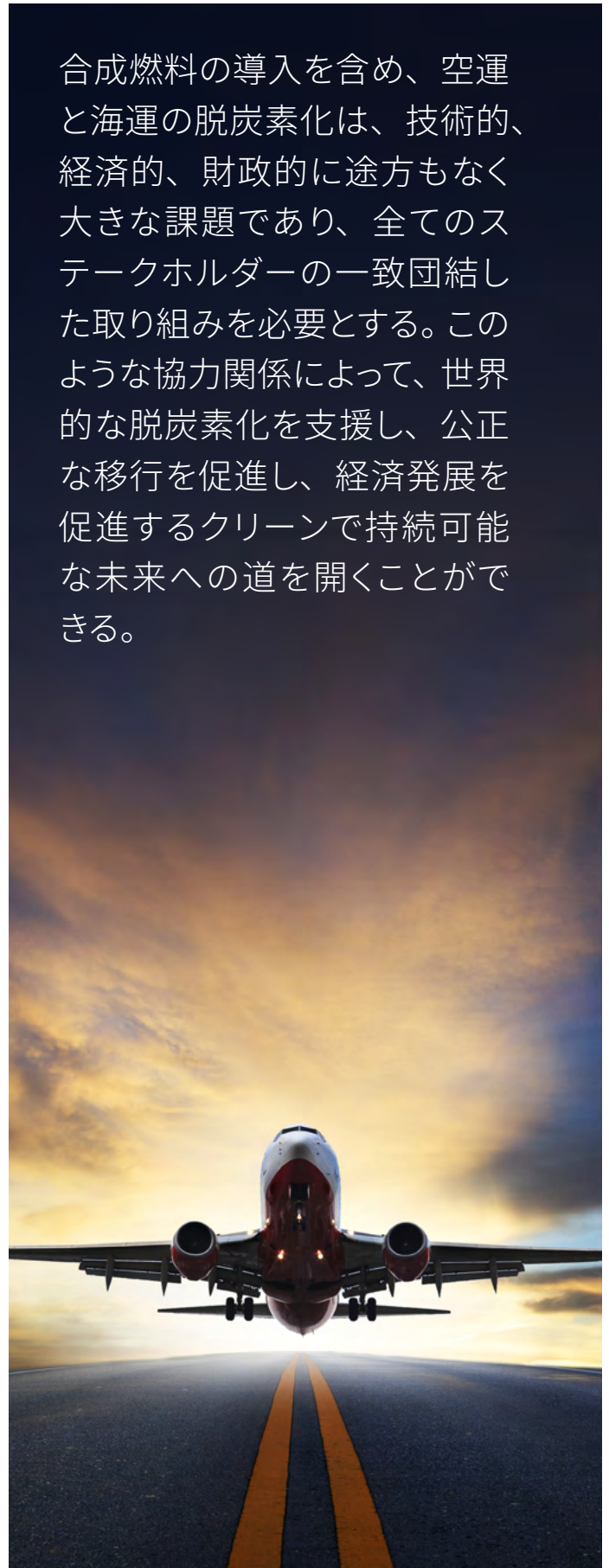
空気力学的・流体力学的な設計の強化、モータリゼーション技術の効率化、車両の軽量化による技術効率の向上には、航空機および船舶の技術に先行投資することが必要である。そのためには、**航空機製造業者**および**造船業者**が研究開発やイノベーションに投資し、将来の混合燃料に効率的に適応させるように設計を適応させることが求められる。

戦略的意思決定と革新的ビジネスモデルによる協調的行動

航空会社と海運会社は、輸送機関の製造業者と燃料供給業者（上流）、港湾と空港（中流）、消費者（下流）を互いに結びつけ、全てのステークホルダーをつなぐという点で中心的な役割を果たしている。また航空会社と海運会社は、持続可能な商業サービスの導入を通じてバリューチェーン全体の変化を刺激するうえで重要な役割を果たしている。空運・海運における「鶏が先か卵が先か」の3重（上流、中流、下流）の問題に対処するには、エコシステム全体にわたって協調的行動をとることが必要である。これには、**燃料供給業者**とその他の上流の**原料製造業者と加工業者、航空機製造業者と造船業者、空港と港湾当局、航空会社と海運会社**の間の戦略的パートナーシップと、**最終顧客**の関与が必要となる。

合成燃料の導入を含め、空運と海運の脱炭素化は、技術的、経済的、財政的に途方もなく大きな課題であり、全てのステークホルダーの一致団結した取り組みを必要とする。この壮大な挑戦は、複雑ではあるが、的を絞った政策立案と主要関係者間の協調的行動を通じて達成可能である。このような協力関係によって、世界的な脱炭素化を支援し、公正な移行を促進し、経済発展を促進するクリーンで持続可能な未来への道を開くことができる。これは特に、重要な再生可能エネルギー資源の恩恵を広く受けているものの必要な低コスト資本へのアクセスが不足していることが多い「グローバルサウス」に当てはまる⁶²。これは、今後何世代にもわたって、回復力があり繁栄する低炭素経済の創出を可能にする一助となるだろう。

合成燃料の導入を含め、空運と海運の脱炭素化は、技術的、経済的、財政的に途方もなく大きな課題であり、全てのステークホルダーの一致団結した取り組みを必要とする。このような協力関係によって、世界的な脱炭素化を支援し、公正な移行を促進し、経済発展を促進するクリーンで持続可能な未来への道を開くことができる。



付録

付録1：HyPEモデルの更新

HyPE (Hydrogen Pathway Explorer) は、水素および水素ベースの合成燃料の供給と取引の最適化に関するデロイトのグローバルモデルである。このモデルは、水素とその派生物である合成燃料 (e-メタノール、アンモニア、e-ケロシン) の需要と供給のバランスをポイントトゥポイントでとり、2025年から2050年までの異なる地域間の輸送を最適化するための費用対効果の高い経路を見出すものである。したがって、その洞察は合成燃料の将来の展望として使用することができる。HyPEモデルの詳細については、クリーン水素に関するデロイトの最新の見通し⁶、および関連する科学出版物を参照されたい²⁵。

本調査では、EUにおける低炭素水素規制の影響に関するデロイトの最新の出版物を含む、前述の調査で使用されたHyPEモデルのデータ⁹⁰を、水素とその派生物の需要データ、検討された技術の基準建設費用、合成燃料製造用のCO₂と電力の調達コストに若干の修正を加えて検討する。図15は、HyPEによるモデリングの実施において入力データとして使用される更新されたコスト値をまとめたものである。

水素開発の動向と最新の公表および見通しを受けて、需要値は2023年の世界クリーン水素見通しの調査に照らして下方修正された。本調査で用いたデロイトによる2024年のシナリオでは、産業セクターにおける純水素の需要は2030年に89Mt、2050年には189Mtに達する。電力セクターでは、2030年までに13MtH_{2eq}、2050年までに62MtH_{2eq}に達する。また、空運・海運セクターにおける需要の軌跡の再計算によると、合成燃料の需要は2030年までに75MtH_{2eq}、2050年までに154MtH_{2eq}に達すると予測されている。全体として、クリーン水素とその派生物の世界的需要は、2030年までには130MtH_{2eq}に、2050年までには480MtH_{2eq}に減少する (デロイトの2023年世界クリーン水素見通しでは、2030年までには170MtH_{2eq}に、2050年までには598MtH_{2eq}と予測されていた)⁶。

図15. 技術コストデータの更新

技術コスト		単位	2030年	2050年
アルカリ性電解槽	CAPEX*	米ドル/kW _e	620 - 960 ⁹¹	400 - 680 ⁷⁷
風力タービン	CAPEX*	米ドル/kW	1050 - 1350 ⁹²	1000 - 1250 ⁹²
太陽光発電	CAPEX*	米ドル/kW	400 - 750 ⁹³	300 - 550 ⁹³
変換コスト				
アンモニア合成	CAPEX	米ドル/[tNH ₃ /年]	878 ⁷⁷	551 ⁷⁷
	固定 OPEX	米ドル/[tNH ₃ /年]	26 ⁷⁷	17 ⁷⁷
	変動 OPEX	米ドル/[tNH ₃]	0.1 ⁷⁷	0.1 ⁷⁷
e-ケロシン合成	CAPEX	米ドル/[tC ₁₂ H ₂₆ /年]	2325 ⁹⁴	1369 ⁹⁴
	固定 OPEX	米ドル/[tC ₁₂ H ₂₆ /年]	93 ⁹⁴	55 ⁹⁴
	変動 OPEX	米ドル/tC ₁₂ H ₂₆	30 ⁹⁴	30 ⁹⁴
e-メタノール合成	CAPEX	米ドル/[tCH ₃ OH/年]	739 ⁷⁷	591 ⁷⁷
	固定 OPEX	米ドル/[tCH ₃ OH/年]	21 ⁷⁷	18 ⁷⁷
CO₂コスト				
DAC	CAPEX DACプラントのみ	米ドル/tCO ₂ /年	585 ⁷³	398 ⁷³
	固定 OPEX DACプラントのみ	米ドル/tCO ₂	24 ⁷³	18 ⁷³
生物起源CO ₂	回収の平準化コスト	米ドル/tCO ₂	30 ⁶⁴	30 ⁶⁴

出所：表に記載されたデータに基づくデロイトの分析

* これらのコストデータには地域差がある。コストデータの単位は全て米ドルである。

付録2：空運・海運の効率改善の算定

デロイトの見通しにおける空運・海運の効率性向上のモデリングには、技術的な効率改善と運航効率改善の両方が含まれており、様々な排出削減策の可能性の文献レビューと、フリート進化のモデリングに基づいている。このシナリオは、かなり保守的なものになるよう意図されている。すなわち、TRLが最も低い技術を除外し、純利益がまだ不確実な場合のポテンシャルの中央値を用いている。

空運では、効率性が異なる様々な世代の航空機がモデル化されている。「前世代」とは、2015年より前に納入された航空機に相当する。現在フリートの約70%を占める「前世代」は、2040年に最後の航空機が引退するまで段階的に廃止されると想定されている。「次世代」とは、現在のフリートの平均効率より16%高いと想定される今日の最高クラスの航空機に相当する。この種の新しい航空機は、2040年まで毎年フリートに加わると想定される。その頃には、新規販売は全て「未来世代」の航空機になっているだろう。この第三世代（未来世代）は2035年頃に市場に投入される予定で、前世代よりも30%効率が向上すると予想されている。デロイトの予測では、フリートの更新と新型機の統合により、フリートの構成は2050年までに60%が「未来世代」、40%が「次世代」となる。

航空機の運航効率の向上については、ICCTの「変革」シナリオ⁹⁵から導き出されたもので、これにはペイロードとトラフィックの効率改善の両方が含まれるが、編隊飛行は含まれない。

海運セクターでは、2025年以降に新たにフリートに加わる船舶は、現在の平均的な船舶よりも20%効率が高いと想定されている。このかなり控えめな仮定は、エネルギー効率設計指標要件⁹⁶に沿ったものであり、様々な技術評価^{8, 48, 53}と一致しており、まだパイロット段階以降に進んでいない技術的ソリューションを開発することなく達成することができるものである⁹⁷。海運セクターでは資産寿命が長い、それはフリートへの展開が漸進的であることを意味する。そのような船舶は、2030年にはフリートの約20%、2040年には57%、2050年には93%を占めるであろう。

海運セクターにおける運航効率性向上のポテンシャルは、合わせて2050年までに19%の燃料消費を削減できると推定されている⁵⁴。海運セクターでの運航効率向上には、主にデジタル化ソリューションの導入など、限られた投資しか必要としない。したがって、デロイトのシナリオでは、2040年までに80%の運航上のエネルギー改善が達成されると想定している。

付録3：バイオ燃料を供給するための持続可能な原料の利用可能性に関する計算

バイオエネルギーを利用するためのバイオマス原料の潜在的供給量については、幅広い推定値がある。この値は様々な仮定により異なる。主要な計量化の仮定には、投入原料としての廃棄物と残留物の経済的可能性、持続可能性要件の遵守、将来の食糧需要に関する不確実性を考慮したエネルギー作物を対象とした土地配分の推定などが含まれる^{43, 45}。持続可能なバイオマスのポテンシャルは、様々な原料カテゴリを考慮し、様々な調査から得られた値に基づいて計算されている。

- a. まず、エネルギー作物から始める。これは主にバイオ燃料やバイオガスの製造、発電のために栽培されているものであり、スイッチグラス、ススキ、ヤナギ類やポプラの木など、バイオマス収量が高く成長速度が速い植物が含まれる²⁷。これらの作物は、食料セクターとの競争を避けるため、汚染された土地や耕作限界地など、食料目的に使用されていない土地で栽培されることが望ましい。エネルギー作物のポテンシャルは、2050年までに7EJから700EJまでになると推定され、本調査では平均値の109EJが考慮されている⁴⁵。
- b. 農作物原料については、生物多様性と水の利用可能性と水質に関する積極的な持続可能性評価を確保しながら、食料の利用可能性を制限したり、土地利用に重大な変化を引き起こしたりすることなく製造が行われる必要がある⁴⁵。IEAでは農作物原料のポテンシャルの範囲を60EJから100EJまでと推定しており、OECDとFAOでは2033年に約80EJになると推定している^{43, 98}。
- c. 農業廃棄物には、トウモロコシ、穀物、米、サトウキビなどの主要作物の収穫時に発生する副産物と、それらを工場で加工する際の残渣が含まれる。農産物は、動物飼料のために、ある程度の資源を確保し、土壌保護のために十分な残渣を維持することによって、バランスを確保する必要がある。IEAによると、農業廃棄物のポテンシャルは、2060年までに46EJから95EJの範囲になると推定されている⁴³。

- d. 木材伐採には持続可能な森林管理計画の範囲内で木質バイオマスが含まれており、土壌の健全性を維持するために保護地域は除外されている²⁷。そのポテンシャルは、IEAによれば、2060年までに15EJから30EJの間になると推定されている⁴³。IRENAによれば、このポテンシャルの範囲は、2050年までに5EJから95EJまでとなる⁴⁵。
- e. 都市廃棄物には、他に有用な用途はないが、収集・管理しなければならない物質が含まれる。都市固形廃棄物（MSW）の生物起源分画のような廃棄物を燃料または原料として利用することは、代替の環境処理オプション（埋め立てに代わるもの）となる。IEAによれば、都市廃棄物のポテンシャルは2060年に10EJから15EJの範囲になると推定される⁴³。

これらの値を合計して持続可能な原料の総利用可能量を算出した後、バイオ燃料製造の可能性を導出するために他の要因を適用する。回収率を一部の都市固形廃棄物、特に使用済み油に適用し、IRENAが行った分析に基づいて平均回収率を26%と推定する⁴⁵。その他の都市固形廃棄物の約半分は有機性廃棄物であり、持続可能でバイオ燃料製造に適していると想定されている²⁷。

農業残渣や森林残留物などの他のカテゴリは、食料・製造・工業などの他セクターとの競争にさらされている。農産物の約8%⁹⁸、エネルギー作物の約11%がバイオ燃料の製造に利用可能と推定されている^{43, 94}。

変換率とは、原料をバイオ燃料に変換する際のエネルギー損失を説明するものである。都市廃棄物の変換は、ガス化／フィッシャー・トロブシュ（50%）と水素化処理エステル・脂肪酸（HEFA）の技術の組み合わせに依存していると考えられ、それぞれの変換率は20%と90%となる。その他の作物は、50%のガス化／フィッシャー・トロブシュと50%のATJ（Alcohol to Jet）技術の組み合わせに依存していると推定され、それぞれ20%と13%のバイオ燃料を産出することとなる²⁷。

文末脚注

1. Intergovernmental Panel on climate Change, "[Global Warming of 1.5°C - Summary for Policymakers](#)", 2018.
2. World Resources Institute, "[4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Countries and Sectors](#)", 2020.
3. Deloitte, "[Financing the Green Energy Transition – A US\\$50 Trillion Catch](#)", November 2023.
4. See for instance Julianne DeAngelo, et al., "[Energy systems in scenarios at net zero CO2 emissions](#)", Nature Communications, 2021, Oytun Babacan, et al., "[Assessing the feasibility of carbon dioxide mitigation options in terms of energy usage](#)", Nature Energy, 2020 and Behrang Shirzadeh et al., "[The impact of methane leakage on the role of natural gas in the European energy transition](#)", Nature Communication, 2023.
5. See for instance Marianne Zeyringer, et al., "[Designing low-carbon power systems for Great Britain in 2050 that are robust to the spatiotemporal and inter-annual variability of weather](#)", Nature Energy, 2018, Behrang Shirzadeh and Philippe Quirion, "[Low-carbon options for the French power sector: What role for renewables, nuclear energy and carbon capture and storage?](#)", Energy Economics, 2021.
6. Deloitte, "[Green Hydrogen: Energizing the Path to Net Zero – Deloitte's 2023 Global Green Hydrogen Outlook](#)", June 2023.
7. Clean air Task Force, "[Decarbonizing Aviation: Enabling Technologies for Net-Zero Future](#)", April 2024.
8. International Renewable Energy Agency, "[A Pathway to Decarbonise the Shipping Sector by 2050](#)", October 2021.
9. International Energy Agency, "[Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer](#)", accessed September 2024.
10. Our World in Data, "Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?", September 2020.
11. Our World in Data, "[What Share of Global CO2 Emissions Come from Aviation](#)", April 2024.
12. World Economic Forum, "[If shipping were a country, it would be the world's sixth-biggest greenhouse gas emitter](#)", April 2018.
13. Transport and Environment, "[Climate Impact of Shipping](#)", accessed September 2024.
14. It is worth mentioning that supply chain optimization through production relocation requires significant capacity building and fundamental investments in trade and production capacities, not only for the industrial processes but also clean energy production.
15. Tao Cao, Masahiro Sugiyama and Yiyi Ju, "[Prospects of regional supply chain relocation for iron & steel industry decarbonization: A case study of Japan and Australia](#)", Resources, Conservation and Recycling, October 2024.
16. European Commission, "[Biofuels](#)", accessed September 2024.
17. Energy Education, "[Biofuel](#)", accessed September 2024.
18. Sustainable Shipping Initiative, "[Availability of sustainable biofuels](#)", June 2021.
19. International Transport Forum, "[The Potential of E-fuels to Decarbonise Ships and Aircraft](#)", January 2023.
20. Synthetic methane (CH₄) can also be a fuel option in the maritime industry in its liquefied form. It is however unlikely to be competitive for economic (its supply chain is more complex and energy-intensive) and environmental (high methane slips increase its GHG footprint) reasons. It is therefore excluded of this analysis.
21. $N_{2(g)} + 3H_{2(g)} \rightleftharpoons 2NH_{3(g)}$
22. $3H_2 + CO_2 \rightleftharpoons CH_3OH + H_2O$ for methanol production, and $nCO_2 + (3n + 1)H_2 \rightarrow C_nH_{2n+2} + 2nH_2O$ (with n between 10 and 15) for synthetic kerosene production.
23. In other words, originally removed from the atmosphere by natural processes and meant to be remitted naturally due to biogenic degradation processes
24. Gondia S. Seck et al., "[Hydrogen and the decarbonization of the energy system in Europe in 2050: A detailed model-based analysis](#)", Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 167, October 2022
25. Behrang Shirzadeh et al., "[Towards a resilient and cost-competitive clean hydrogen economy: the future is green](#)", Energy & Environmental Science Vol. 16(12), 2023.
26. Behrang Shirzadeh et al., "[The impact of methane leakage on the role of natural gas in the European energy transition](#)", Nature Communications Vol. 14, 2023
27. International Energy Agency, "[Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach – 2023 Update](#)", September 2023.
28. Switching from one to another transport mode (e.g., tourists favoring high-speed rail over regional aviation).
29. Demand reduction with new eco-conscious habits (e.g., rise of virtual meetings reducing business travels).
30. ICAO, "[Air Transport Statistical Results](#)", 2019.
31. Assuming 100 kilograms for each passenger, including his/her baggage.
32. Based on [ICCT, ICF, Air Transport Action Group](#).
33. International Energy Agency, "[Energy intensity of commercial passenger aviation in the Net Zero Scenario, 2000-2030](#)", July 2023.
34. Fuel burn has historically been reduced at a compound rate of 1%/year over the period from 1960 to 2019; The International Council on clean Transportation, "[Fuel Burn of the New Commercial Jet Aircraft: 1960 to 2019](#)", White Paper, September 2020.
35. Mission Possible Partnership, "[Making Net-Zero Aviation Possible - An industry-backed, 1.5°C-aligned transition strategy](#)", 2020.
36. Aerospace Industries Association, "[HORIZON 2050 - A Flight Plan for the Future of Sustainable Aviation](#)", April 2022.
37. Using fewer vehicles to carry the same number of passengers or the same weight of products, through enhanced capacity factor and filling rate of vehicles.
38. Optimized fuel loading or congestion management to minimize induced extra fuel consumption.
39. International Energy Agency, "[The Role of E-fuels in Decarbonising Transport](#)", December 2023.
40. International Energy Agency, "[Aviation and Shipping – Net Zero Emissions Guide](#)", September 2023.
41. 2023 aviation CO₂ emissions have been estimated at 886 MtCO₂ based on IATA, "[Industry Statistics – Factsheet](#)", June 2024.
42. International Energy Agency, "[Biofuels](#)", accessed in September 2024.
43. International Energy Agency, "[Advanced Biofuels – Potential for Cost Reduction](#)", 2019.
44. Behrang Shirzadeh and Philippe Quirion, "[The importance of renewable gas in achieving carbon-neutrality: Insights from an energy system optimization model](#)", Energy Volume 255, 2022.

45. International Renewable Energy Agency, "[Reaching zero with renewables: Biojet fuels](#)", 2021.
46. World Economic Forum, "[Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation](#)", November 2020.
47. United Nations Conference on Trade & Development, "[Review of Maritime Transport 2021](#)", 2021.
48. Mission Possible Partnership, "[A Strategy for the Transition to Zero-Emission Shipping](#)", 2022.
49. United Nations Conference on Trade & Development, "[Review of maritime transport 2023](#)", 2023.
50. International Energy Agency, "[Energy intensity of international shipping in Net Zero Scenario, 2015-2030](#)", November 2021.
51. IPCC, "[Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change](#)", 2022.
52. International Maritime Organization, "[Improving the energy efficiency of ships](#)", accessed September 2024.
53. Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping, "[Maritime Decarbonization Strategy 2022](#)", December 2022.
54. Concawe, "[Technological, Operational and Energy Pathways for Maritime Transport to Reduce Emissions Towards 2050](#)", February 2022.
55. Climate Action Tracker, "[Countries](#)", accessed in September 2024.
56. In 2022, ICAO (International Civil Aviation Organization) member states adopted a "[Long-Term Aspirational Goal](#)" to achieve net zero carbon emissions from international aviation by 2050. Similarly, in 2023, IMO (International Maritime Organization) published its "[Revised GHG Emissions Strategy](#)", aiming for net-zero GHG emissions from international shipping by or around 2050.
57. European Parliament, "[Cutting emissions from planes and ships: EU actions explained](#)", accessed in September 2024.
58. International Energy Agency, "[Hydrogen Production and Infrastructure Projects Database](#)" accessed in September 2024.
59. International Energy Agency, "[Policy database](#)", accessed in September 2024.
60. OECD-International Transport Forum, "[Sustainable Aviation Fuels Policy Status Report](#)", July 2023.
61. World Trade Organization, "[Sustainable Aviation Fuels Subsidies meeting report](#)", April 2024.
62. Deloitte, "[Financing the Green Energy Transition – Innovative Financing for a Just Transition](#)", May 2024.
63. International Energy Agency, "[ETP Clean Energy Technology Guide](#)" accessed in September 2024.
64. International Energy Agency, "[CCUS in Clean Energy Transitions – Analysis](#)", September 2020.
65. According to the IEA Net-Zero scenario CO₂ balances (International Energy Agency, "[World Energy Outlook 2023](#)", October 2023) and IEA Net-Zero CO₂ capture projections (International Energy Agency "[CCUS – Analysis](#)", September 2023), most of the CO₂ captured from bioenergy sources will be permanently stored to offset the remaining emissions in 2050 from hard-to-abate sectors. We assume that the biogenic CO₂ used will mainly come from fuel production and fuel transformation (e.g.: biogas upgrading to biomethane).
66. International Energy Agency, "[World Energy Outlook 2023](#)", October 2023.
67. Katrin Siever, Tobias S. Schmidt and Bjarne Steffen, "[Considering technology characteristics to project future costs of direct air capture](#)", Joule Vol. 8(4), 2024.
68. International Energy Agency, "[Direct Air Capture - Energy System](#)", accessed September 2024.
69. Climeworks, "[Industry snapshot: a focus on direct air capture technology](#)", July 2023.
70. International Energy Agency, "[Direct Air Capture: A key technology for net zero](#)", April 2022.
71. In a Horizon 2020 survey, experts provided cost estimates ranging between 130-1500 US\$/tCO₂ in 2030 and 130-880 US\$/tCO₂ in 2050. https://www.negemproject.eu/wp-content/uploads/2023/08/NEGEM_D5.4-Expert-elicitation.pdf
72. CO₂.Earth, "[Daily CO₂](#)", accessed in September 2024.
73. International Energy Agency Greenhouse Gas R&D program, "Global Assessment of Direct Air Capture Costs", December 2021.
74. Dutch Organization for Applied Scientific Research (TNO), "Technology factsheet | Direct Air Capture (DAC) of carbon dioxide", December 2019.
75. Clarksons Research, "[Green Technology Tracker](#)", July 2024.
76. Longspur Research, "[All At Sea – Methanol And Shipping](#)", January 2022.
77. Danish Energy Agency, "Technology data for energy carrier generation and conversion", April 2024.
78. Global CCS Institute, "[State of the art: CCS Technologies 2024](#)", August 2024.
79. Assuming a linear growth from US\$25/tCO₂ in 2030 to US\$200/tCO₂ in 2050.
80. ICAO, "[The cost of achieving net-zero carbon in aviation](#)", September 2022.
81. IEA, "[World Energy Investment 2024](#)", June 2024.
82. Statista, "[Fuel costs of airlines worldwide from 2011 to 2023, with a forecast for 2024, as percentage of expenditure](#)", accessed in September 2024.
83. Synthetic kerosene production cost that can be achieved in 2040 using biogenic CO₂.
84. The additional costs are assumed to be passed completely to the customers.
85. Based on bulk freight rates of US\$35/ton on the NOPAC Far East route, from American Journal of Transportation, "[Signal Ocean: Dry Weekly Market Monitor - Week 38 of 2024](#)", September 2024.
86. EMBER, "[Global Electricity Review 2024](#)", May 2024.
87. International Energy Agency, "[Towards Common Criteria for Sustainable Fuels](#)", September 2024.
88. Flagging refers to the practice of registering a vessel in another nation than the true country of origin to benefit from weak environmental and safety regulations or more lenient tax regimes.
89. Quirin Schiermeier, "[Boom in ships that fly 'fake' flags and trash the environment](#)", Nature News, May 2021.
90. Deloitte, "[Assessing the impact of low-carbon hydrogen regulation in the EU](#)", July 2024.
91. IEA, "[Global Hydrogen Review 2023: Assumption Annex](#)", September 2023.
92. National Renewable Energy Laboratory, "[Annual Technology Baseline](#)", 2023.
93. IRENA, "[Future of solar photovoltaic](#)", 2019.
94. Danish Energy Agency, "[E-kerosene for Commercial Aviation](#)", September 2022.
95. International Council on Clean Transportation, "[Vision 2050](#)", June 2022.
96. The [FED](#) is a binding IMO regulation requiring new ships introduced as of 2025 to be 30% more efficient compared to 2000-2010 levels
97. Especially wind-assisted propulsion systems.
98. OECD/FAO, "[OECD-FAO Agricultural Outlook 2024-2033](#)", 2024.

日本語訳版の刊行にあたって

本レポートは、デロイト グローバルが2024年に執筆したもので、空運・海運における脱炭素化に向けた重要なエネルギー転換要素としての合成燃料に関する見解を紹介したものである。

日本の政策動向

日本においては、2021年6月に2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略¹において、2040年までの商用化目標が掲げられ、達成に向けた取り組みとして、グリーンイノベーション基金等を通じた効率的かつ大規模製造プロセスを確立するための技術開発が推進されてきた。2022年9月には、合成燃料(e-fuel)の導入促進に向けた官民協議会²が設立され、2023年6月の中間とりまとめにおいて、当初の目標を5年以上前倒しする「2030年代前半」を新たな目標³として掲げ、導入に向けた環境整備が進められている。本レポートの中で言及される通り、合成燃料のサプライチェーン構築のためには、安価な水素や持続可能性を有するCO₂、再生可能エネルギーが調達できるような、海外拠点での事業化を先行させる必要がある。非資源国である日本は、合成燃料分野においても、国家間及び事業者間の戦略的なパートナーシップ締結が目指されている状況である。

合成燃料のエネルギー転換における位置づけ

2050年までに温室効果ガス(GHG)排出量実質ゼロを目指すには、化石燃料中心のエネルギーシステムから、効率的かつ再生可能なエネルギーへの転換が進んだ、新しいエネルギーシステムへと、根本的に社会を変えていく必要がある。しかし、特に空運・海運領域や、長距離陸上輸送等の領域では、エネルギー密度の高い低炭素エネルギーの利用が不可欠である。

短期的には、これらの目標達成にむけては、バイオ燃料が有力な選択肢となる。これらバイオ燃料は、既存の燃焼エンジンや燃料インフラが活用可能な為、今後の活用が期待されるエネルギー源である。しかし、限られたバイオマス資源を求めて、激しいセクター間の競争が起きることは必須であり、加えて、バイオマス資源が豊富ではない日本にとっては、グローバルサウスやその他アジア諸国との連携が重要だ。中長期的には、今回取り上げている合成燃料が、産業領域や輸送領域において、重要な選択肢となる。

原料となるCO₂の調達

日本では、経済産業省が2023年6月に公表したカーボンリサイクルロードマップ⁴において、合成燃料の原料となるCO₂の調達については、火力発電所の脱炭素化や、素材産業・石油精製産業といった、電化や水素化等で脱炭素化できず、CO₂排出が避けられない分野を中心とすることが期待されている。すなわち、CO₂の中でもHard to Abate(排出削減が困難)セクターから排出される、産業由来のCO₂を新たな有価物に転換し、社会全体でGHG排出量を抑制することが目指されている。

一方、本レポートでは、カーボンニュートラルとみなすため、主に生物由来CO₂と直接空気回収(DAC)から回収したCO₂の活用を前提として執筆されている。空運や海運の脱炭素化を目指す際には、日本としては、産業由来CO₂の回収・利用を推進し、削減効果を認めてくれるような国、機関、事業者との連携が不可欠となる。欧州の潮流としては、本レポートに記載されているような生物由来CO₂又は直接空気回収(DAC)を想定している点を留意しつつ、日本国内の合成燃料導入の在り方を検討していきたい。

CO₂排出量のコントロール

国際的な社会実装及び普及を進めるには、サプライチェーンの構築のみならず、国際基準となる共通ルールの確立が必要だ。本レポートでも示されるように、信頼性を担保しつつ、持続可能性を保証するためには、強固な認証制度なくして、市場形成は進まない。越境輸送であればなおさら、多国間でこうした認証ルールに関しても、共通認識を形成する必要がある。

日本としては、CO₂調達国とのGHG排出量の計上方法や関連する諸制度を整理し、二国間で共通ルールの構築していく必要がある。空運・海運と異なる産業領域において、適応されるルールが異なる可能性もあり、留意が必要だ。例えば、国際海事機関(IMO)は、2024年3月に船用燃焼ライフサイクルGHG強度ガイドラインを改正し、合成燃料の船上燃焼によるCO₂排出量はゼロとして扱うルールが整備⁵されている。

最後に

本レポートに記載されているように、CO₂由来の合成燃料の普及は、空運・海運における脱炭素化の鍵となることは間違いない。日本政府や関連企業が連携し、新たなサプライチェーンを構築していくためには、関係者間で共通認識をもち、合成燃料の位置づけや特徴を理解したうえで、中長期的に市場を形成していく必要がある。

本レポートでも示されている通り、マルチ燃料の未来が想定されている将来のエネルギーシステムにおいては、的を絞った政策支援と国際的なバリューチェーンプレイヤー間の協調的な行動が不可欠である。加えて、本レポートでも指摘されているように、特に海運分野においては、今後、燃料供給に限らず様々な技術課題を解決していくことが重要だ。特に空運、海運分野の脱炭素化や公正な移行に関心のある、様々なステークホルダーの皆様にとって、有益な情報提供となっていれば幸いである。

1. https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/index.html

2. https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/e_fuel/index.html

3. https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/e_fuel/pdf/2023_chukan_torimatome.pdf

4. https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_recycle_rm/pdf/20230623_01.pdf

5. https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/research/seminar/2024/seminar_005.pdf

著者

Prof. Dr. Bernhard Lorentz

Deloitte Center for Sustainable Progress Founding Chair
Deloitte Germany
+49 15114881437
blorentz@deloitte.de

Geoff Tuff

Sustainability leader for Energy, Resources & Industrials
Deloitte Consulting LLP
+1 6174600647
gtuff@deloitte.com

Dr. Johannes Brauer

Deloitte Economics Institute
Deloitte France

Charbel Bou Issa

Deloitte Economics Institute
Deloitte France

Marc de Froidefond

Deloitte Economics Institute
Deloitte France

Dr. Johannes Trüby

Deloitte Economics Institute
Deloitte France
+33 155616211
jtruby@deloitte.fr

Dr. Behrang Shirizadeh

Deloitte Economics Institute
Deloitte France
+33 670268419
bshirizadeh@deloitte.fr

Aurélien Ailleret

Deloitte Economics Institute
Deloitte France

Augustin Guillon

Deloitte Economics Institute
Deloitte France

問い合わせ先

Jennifer Steinmann

Deloitte Global Sustainability Business leader
jsteinmann@deloitte.com

Prof. Dr. Bernhard Lorentz

Deloitte Center for Sustainable Progress Founding Chair
blorentz@deloitte.de

Geoff Tuff

Sustainability leader for Energy, Resources & Industrials
gtuff@deloitte.com

Dr. Johannes Trüby

Deloitte Economics Institute
jtruby@deloitte.fr

本レポートの作成にご協力いただいた以下の方々に感謝の意を表する。

Adhiraj Sharma, Deloitte India

Anoushka Hooda, Deloitte France

Ashley Pampena, Deloitte Global

Ashish Gupta, Deloitte Global

Blythe Aronowitz, Deloitte Global

Bjoern Mais, Deloitte Germany

Derek Pankratz, Deloitte Services LP

Dr. Freedom-Kai Phillips, Deloitte Global

Kate Hardin, Deloitte Services LP

Kyra Kaszynski, Deloitte Global

Lali Loya, Deloitte Global

Maya Caron, Deloitte Canada

Michelle Varney, Deloitte Global

Nozomu Kokubo Yoshimi, Deloitte Japan

Olivier Jan, Deloitte France

Pradeep Philip, Deloitte Global

Prashanth Nutula, Deloitte India

Rachael Ballard, Deloitte Global

Rebekah Susan Thomas, Deloitte Global

Richard J Bailey, Deloitte Global

Robert Hansor, Deloitte China

SAF+ Consortium

Torben Gehring, Deloitte Germany

Tracey McQueary, Deloitte Global

Utkarsh Shardool Ashar, Deloitte Global

Deloitte Center for Sustainable Progress について

[Deloitte Center for Sustainable Progress](#) (DCSP) は、パリ協定の目標達成に沿って、適応と緩和の活動を推進し、レジリエンスを強化し、脱炭素化の道筋について情報を提供することにより、課題に対処し、機会を特定することに重点を置いている。DCSPは著名なリーダーや革新的な思想家を集めることで効果的で画期的なソリューションを探求し、人類が直面する重要な地球規模の課題に対して行動を起こせるよう協力している。クライアントを対象としたサービスは提供していない。

日本語訳版問合せ先

執筆者



吉見 望

デロイトトーマツ コンサルティング合同会社
ディレクター

日系シンクタンクグループ系調査会社を経て現職。資源・エネルギー業界を中心に、事業戦略立案・実行、新規事業創出などのテーマを手掛ける。2014年よりタイ・インドネシアを拠点に、新興国市場への参入や現地事業推進等に従事したのち、2019年より石油・ガスチームの立ち上げに参画。昨今は、エネルギー企業の中長期ビジョン・計画策定や企業変革案件の他、水素、SAF、CCS等の各種エネルギートランジション案件にも従事している。博士（理学）。



大林 英里香

デロイトトーマツ コンサルティング合同会社
マネジャー

新卒入社後、現職。資源・エネルギー業界および化学業界を中心に、事業戦略立案やDX構想策定などのプロジェクトを経験。昨今はエネルギー企業の中長期ビジョン・計画策定や、水素、SAF、CCS等の新エネルギーに関わる調査・戦略検討、地方自治体における水素利活用に向けたフィージビリティスタディおよび計画策定支援に従事している。



町元 宥達

デロイトトーマツ コンサルティング合同会社
マネジャー

日系総合商社を経て現職。水素・アンモニア・メタノール等を中心に、低炭素エネルギーの導入に関する戦略策定・制度設計および実行支援に従事している。近年では、国内大手企業の水素関連事業戦略に関するコンサルティング業務や、海外の水素関連政策・認証制度等に関するアドバイザリー業務などを担当。前職では本社営業部門及び欧州法人にて、燃料・化学品のトレーディング及び低炭素ケミカル・エネルギー関連の新規事業開発に従事。



三浦 慶人

デロイトトーマツ コンサルティング合同会社
シニアコンサルタント

インドネシア国営石油会社を経て現職。インドネシア官公庁及び日系企業に対し、マーケティング・新規事業開発の経験を有する。入社後は官公庁や地方自治体向けの、環境・エネルギー部門における事業モデル検討、実行支援、調査業務に従事し、近年は、再エネ、水素、CDRにおける国際連携の促進に係る案件や、カーボンリサイクル/CCUに係る技術・製品の環境価値に係る国際連携に関する調査に携わっている。

発行者



森田 哲平

デロイトトーマツ コンサルティング合同会社
執行役員／パートナー

米系総合ファームを経て、現職。主に化学・素材、消費財等の日本企業のグローバル競争力強化に向けて、全社／事業戦略、M&A戦略・PMI、組織機構改革、新規事業戦略、技術マーケティング、デジタル変革、各種コスト削減など幅広い領域における支援を実施。

Quest バックナンバー

バックナンバー送付をご希望の方はご連絡ください。

- Vol.1 COVID-19：エネルギー業界への影響と今後の展望
～コロナ危機がエネルギーの未来（Future of Energy）をどう変えるか？～
- Vol.2 石油・ガス業界におけるエネルギー転換
～石油・ガス企業は低炭素社会に向けて何をすべきか～
- Vol.3 脱炭素化に向けた2030年までの課題“エネルギーの未来”への道筋
- Vol.4 石油メジャーによる脱炭素戦略
～ネットゼロへの移行は存亡の危機か、変革のチャンスか～
- Vol.5 実現可能な水素エコノミーを創造する“Future of Energy”の観点で
- Vol.6 石油・ガス業界 アウトルック2022
- Vol.7 石油・ガス業界 アウトルック2023
- Vol.8 石油・ガス業界 アウトルック2024
- Vol.9 二酸化炭素回収・貯留技術資金調達可能なビジネスモデルの模索
- Vol.10 ビジネスモデルイノベーションを活用したクリーン水素エコノミーの促進
- Vol.11 石油・ガス業界アウトルック2025

Webページ

弊社ECMM（エネルギー、素材化学、鉄鋼領域）ユニット関連のwebページへは下記よりアクセスが可能です。

弊社ECMM（エネルギー、素材化学、鉄鋼領域）ユニットの紹介ページ

<https://www2.deloitte.com/jp/ja/pages/energy-and-resources/topics/energy-chemicals.html>



弊社ECMM（エネルギー、素材化学、鉄鋼領域）ユニットの刊行物の紹介・DLページ

<https://www2.deloitte.com/jp/ja/pages/manufacturing/articles/pr/newsletter-quest.html>



本誌はDeloitte Center for Sustainable Progress（DCSP）が2024年に発表した内容をもとに、デロイトトーマツ コンサルティング合同会社が翻訳したものです。なお、この翻訳文と原文に相違がある場合には、原文の記載事項を優先します。

Deloitte.

デロイト トーマツ

デロイト トーマツ コンサルティング合同会社 ECMMユニット

〒100-8361 東京都千代田区丸の内3-2-3 丸の内二重橋ビルディング
Tel 03-5220-8600 Fax 03-5220-8601
www.deloitte.com/jp/dtc

デロイト トーマツ グループは、日本におけるデロイト アジア パシフィック リミテッドおよびデロイトネットワークのメンバーであるデロイト トーマツ 合同会社ならびにそのグループ法人（有限責任監査法人トーマツ、デロイト トーマツ リスクアドバイザリー合同会社、デロイト トーマツ コンサルティング合同会社、デロイト トーマツ ファイナンシャルアドバイザリー合同会社、デロイト トーマツ 税理士法人、DT 弁護士法人およびデロイト トーマツ グループ 合同会社を含む）の総称です。デロイト トーマツ グループは、日本で最大級のプロフェッショナルグループのひとつであり、各法人がそれぞれの適用法令に従いプロフェッショナルサービスを提供しています。また、国内約30都市に2万人超の専門家を擁し、多国籍企業や主要な日本企業をクライアントとしています。詳細はデロイト トーマツ グループ Web サイト、www.deloitte.com/jp をご覧ください。

Deloitte（デロイト）とは、デロイト トウシュ トーマツ リミテッド（“DTTL”）、そのグローバルネットワーク組織を構成するメンバーファームおよびそれらの関係法人（総称して“デロイトネットワーク”）のひとつまたは複数を含みます。DTTL（または“Deloitte Global”）ならびに各メンバーファームおよび関係法人はそれぞれ法的に独立した別個の組織体であり、第三者に関して相互に義務を課しまたは拘束させることはありません。DTTL および DTTL の各メンバーファームならびに関係法人は、自らの作為および不作為についてのみ責任を負い、互いに他のファームまたは関係法人の作為および不作為について責任を負うものではありません。DTTL はクライアントへのサービス提供を行いません。詳細は www.deloitte.com/jp/about をご覧ください。デロイト アジア パシフィック リミテッドは DTTL のメンバーファームであり、保証有限責任会社です。デロイト アジア パシフィック リミテッドのメンバーおよびそれらの関係法人は、それぞれ法的に独立した別個の組織体であり、アジア パシフィック における 100 を超える都市（オークランド、バンコク、北京、ベンガルール、ハノイ、香港、ジャカルタ、クアラルンプール、マニラ、メルボルン、ムンバイ、ニューデリー、大阪、ソウル、上海、シンガポール、シドニー、台北、東京を含む）にてサービスを提供しています。

Deloitte（デロイト）は、最先端のプロフェッショナルサービスを、Fortune Global 500® の約 9 割の企業や多数のプライベート（非公開）企業を含むクライアントに提供しています。デロイトは、資本市場に対する社会的な信頼を高め、クライアントの変革と繁栄を促進することで、計測可能で継続性のある成果をもたらすプロフェッショナルの集団です。デロイトは、創設以来 180 年の歴史を有し、150 を超える国・地域にわたって活動を展開しています。“Making an impact that matters” をパーパス（存在理由）として標榜するデロイトの約 46 万人の人材の活動の詳細については、www.deloitte.com をご覧ください。

本資料は皆様への情報提供として一般的な情報を掲載するのみであり、デロイト トウシュ トーマツ リミテッド（DTTL）、そのグローバルネットワーク組織を構成するメンバーファームおよびそれらの関係法人（総称して“デロイトネットワーク”）が本資料をもって専門的な助言やサービスを提供するものではありません。皆様の財務または事業に影響を与えるような意思決定または行動をされる前に、適切な専門家にご相談ください。本資料における情報の正確性や完全性に関して、いかなる表明、保証または確約（明示・黙示を問いません）をするものではありません。また DTTL、そのメンバーファーム、関係法人、社員・職員または代理人のいずれも、本資料に依拠した人に関係して直接または間接に発生したいかなる損失および損害に対して責任を負いません。DTTL ならびに各メンバーファームおよび関係法人はそれぞれ法的に独立した別個の組織体です。

Member of
Deloitte Touche Tohmatsu Limited

© 2025. For information, contact Deloitte Tohmatsu Group.



IS 669126 / ISO 27001



BCMS 764479 / ISO 22301

IS/BCMS それぞれの認証範囲はこちらをご覧ください
http://www.bsigroup.com/clientDirectory