

strategy&

Part of the PwC network

再生可能 原料の 航空燃料への 転換

持続可能な航空燃料 (SAF) の
ポテンシャルを最大限に引き出す



日本のお問い合わせ先

PwC Japanグループ

www.pwc.com/jp/ja/contact.html



服部 真

PwCコンサルティング合同会社
Strategy& リーダー／パートナー

磯貝 友紀

PwC Japanグループ
サステナビリティ・センター・オブ・エクセレンス
リード・パートナー
PwCサステナビリティ合同会社

林 素明

PwC Japanグループ
サステナビリティ・センター・オブ・エクセレンス
PwCサステナビリティ合同会社
パートナー

屋敷 信彦

PwCコンサルティング合同会社
パートナー

齋藤 隆弘

PwC Japanグループ
サステナビリティ・センター・オブ・エクセレンス
PwCサステナビリティ合同会社
パートナー

田原 英俊

PwC Japan有限責任監査法人
パートナー

安田 裕規

PwC Japan有限責任監査法人
パートナー

森 隼人

PwCアドバイザリー合同会社
パートナー

松岡 慎一郎

PwCアドバイザリー合同会社
パートナー

高野 公人

PwC税理士法人
パートナー

白土 晴久

PwC税理士法人
パートナー

北村 導人

PwC弁護士法人
パートナー代表

高梨 智範

PwCコンサルティング合同会社
ディレクター

PwC Japanグループは、日本におけるPwCグローバルネットワークのメンバーファームおよびそれらの関連会社（PwC Japan有限責任監査法人、PwCコンサルティング合同会社、PwCアドバイザリー合同会社、PwC税理士法人、PwC弁護士法人を含む）の総称です。各法人は独立した別法人として事業を行っています。複雑化・多様化する企業の経営課題に対し、PwC Japanグループでは、監査およびアシュアランス、コンサルティング、ディールアドバイザリー、税務、そして法務における卓越した専門性を結集し、それらを有機的に協働させる体制を整えています。また、公認会計士、税理士、弁護士、その他専門スタッフ約11,500人を擁するプロフェッショナル・サービス・ネットワークとして、クライアントニーズにより的確に対応したサービスの提供に努めています。

www.pwc.com/jp

執筆者一覧

ドイツ

Dr. Peter Gassmann
Strategy& グローバルリーダー
PwC Strategy& ドイツ

Christian von Tschirschky
欧州エネルギー・公益・
資源部門ヘッド
PwC Strategy& ドイツ

Prof. Dr. Jürgen Peterseim
Fueling our Future Initiative
Lead
PwCドイツ

Dr. Jan H. Wille
PwC EMEA航空宇宙・
防衛部門リーダー
PwC Strategy& ドイツ

Dirk Niemeier
グリーン水素・
代替燃料部門リーダー
PwC Strategy& ドイツ

米国
Scott Thompson
PwC航空宇宙・
防衛部門グローバルリーダー
PwC米国

Dr. Hans-Jörg Kutschera
工業生産ESG部門リーダー
PwC Strategy& ドイツ

このレポートは、PwCの戦略コンサルティングサービスを担うStrategy&と、PwCの業界およびサービスの専門家との協働により制作されました。

私たちは連携して、将来にも効果をもたらす実行可能な戦略を策定することで、組織の変革を支援します。
PwCは、社会における信頼を構築し、重要な課題を解決することをPurpose（存在意義）としています。
私たちは、世界151カ国に及ぶグローバルネットワークに約364,000人のスタッフを擁し、高品質な監査、税務、アドバイザリーサービスを提供しています。
詳細については、www.pwc.comをご覧ください。

執筆者紹介

Dr. Jan H. WilleはPwCの戦略コンサルティングサービスを担うStrategy&のパートナーであり、ハンブルクを拠点に活動している。EMEA（欧州、中東およびアフリカ）におけるPwCの航空宇宙・防衛（A&D）チームのリーダーとして、戦略上の課題解決や大規模なトランスフォーメーションを目指す多くのIT系クライアントをサポートするほか、近年はA&D業界の変革に焦点を当て、より持続可能性に優れたビジネスの実現に向けて業界を支援している。

Dirk NiemeierはStrategy&のグリーン水素・代替燃料部門のディレクターであり、ミュンヘンを拠点に活動している。エネルギーおよび製造分野において、脱炭素に向けたマーケットモデルおよびビジネスモデルの開発、戦略策定、コーポレート・トランスフォーメーション（CX）を目指す多くのクライアントをサポートしている。

Prof. Dr. Jürgen PeterseimはPwCのディレクターであり、ベルリンを拠点に活動している。企業におけるネットゼロ・トランジション戦略およびロードマップの策定を専門とするほか、グリーン水素・代替燃料部門のエキスパートとしてグローバルリードを務めている。

Anna Paulina WentはStrategy&のシニアアソシエイトであり、ウィーンを拠点に活動している。環境・社会・ガバナンス（ESG）を専門とし、航空宇宙分野における持続可能な航空燃料（SAF）に関する豊富な知見を有する。サステナビリティ戦略の策定、組織変革、製造の最適化を目指す多くのクライアントをサポートしている。

Florian SchäferはStrategy&のシニアアソシエイトであり、ハンブルクを拠点に活動している。水素燃料などの持続可能燃料をはじめとするクリーンエネルギーソリューションを専門とする。エネルギー・トランジション戦略の一環として、新たなビジネスモデルの策定を目指すエネルギー分野の多くのクライアントを支援している。

Deniz DilchertはStrategy&のシニアアソシエイトであり、フランクフルトを拠点に活動している。さまざまな規制を踏まえた新たな経営モデルやビジネスケースの策定、投資の意思決定、新たな技術の導入といった領域で多くのクライアントをサポートしている。

本調査には、ウィーンを拠点に活動するStrategy&のアソシエイトであるJonas Brunsも参画している。

SAFの利用拡大に向けたさまざまな課題についてのインタビューにご協力いただいた、NesteとSpark e-Fuelsの両社にも心から感謝を申し上げます。

目次

エグゼクティブサマリー	06
はじめに	07
セクション1	09
現在のSAF市場のダイナミクス：需要と供給	
セクション2	17
SAFのバリューチェーンとコストの配分	
HEFAのバリューチェーン	
PtLのバリューチェーン	
セクション3	21
SAFバリューチェーンの拡大：その障壁と求められるアクション	
HEFAのバリューチェーンを拡大する機会：Neste	
PtLのバリューチェーンを拡大する機会：Spark e-Fuels	
障壁を克服するために求められるアクション	
セクション4	30
SAF市場の発展を支えるビジネス・アーキタイプ（原型）	
まとめ	34
出所	35

持続可能な航空燃料（SAF：Sustainable Aviation Fuel）の普及拡大は、航空業界の脱炭素化を促進する上で最も重要な課題の1つである¹。しかし、現状においてSAFの供給量は十分ではなく、増え続ける需要に応えながら規制目標を達成するためには、大規模な投資を行わなければならない。2050年までのネットゼロ（温室効果ガスの正味排出量ゼロ）の実現に向けて、将来的に約3億2,500万トンのSAF需要が見込まれており、そこではSAF製油所の整備だけでも約1兆ユーロの設備投資が必要となる。

この投資の規模は驚くべきものである。とりわけSAF業界の今後の見通しが不透明な現段階においてはなおさらのことだ。本調査では、SAF業界の主要な関係者とのディスカッションや、フィンランドのNesteおよびドイツのSpark e-Fuelsへの詳細なインタビューをもとに、SAFの普及拡大を阻む障壁を解消するための5つのアクションを明らかにした。

1

実証設備およびプラント開発プロジェクトへの投資：SAF技術を使った航空燃料の大量生産が実現可能であることを実証する。

2

原料の多様化：原料の供給量や価格の変動による影響を軽減する。

3

財務リスクの回避：大規模な投資に伴う財務リスクを回避する。

4

規制の明確化：エコシステムを構成するステークホルダーにSAF市場の健全性を示す。

5

SAFに対する理解の促進：SAFのメリットに対するクライアント企業の理解を高めることで、新たな投資を呼び込む。

SAFの普及拡大を阻む障壁は、さまざまなステークホルダーのうちの単独のグループだけでは解消できない。既存の企業、新興企業など、民間・公共を問わず業界の全てのステークホルダーが一丸となってSAFのポテンシャルを最大限に引き出し、手遅れになる前に環境問題の改善につながる具体的な成果を生み出さなければならない。その中で大きな鍵を握るのは「時間」だ。

¹ 航空業界の脱炭素化を実現する別のアプローチとしては、他の輸送モードへのシフト、技術的なイノベーション、オペレーション効率とインフラの改善、市場ベースのさまざまな措置が考えられる。

はじめに

現在、人間の活動に由来する世界全体のCO₂排出量のうち、約2.5%を航空業界が占めており、CO₂以外の温室効果ガス（GHG）の排出量も含めれば、その割合は約5%に上る。従って、航空業界の脱炭素化は世界のGHG排出量を削減する上で重要な意味を持っている。ただし、そのためには業界のエコシステムを構成する全てのステークホルダーによる積極的な協働が不可欠である。

持続可能な航空燃料（SAF）の利用は、GHG排出量削減を目指す航空業界にとって最も有望なアプローチの1つであり、近年においてSAFの認知度および需要は著しく高まっている。SAFは化石ジェット燃料に代わる持続可能な代替品として、業界のGHG排出量を66～94%削減できると考えられている。再生可能な資源に由来するSAFの生産手法は数種類あるが、中でも最も広く知られているのがHEFA（脂肪酸エステルの水素化）とPtL（パワー・ツー・リキッド）の2つである。

ただし、現時点において将来予測される需要を満たすだけの十分なSAFの供給量は確保されていない。わかりやすい例が、気候変動問題の解決に向けて厳格な目標を掲げるEUだ。EUにおける航空燃料のグリーン化を目指す法案「ReFuelEU Aviation」の補完調査によると、域内の空港を出発地とする全便を対象として、2025年までに燃料の2%を、2030年までに燃料の6%をSAFに置き換える必要があるという。しかしながら、EU域内で過去10年間に締結されたSAFのオフテイク契約（長期供給契約）を全て含めても、2025年の2%目標を辛うじて満たせる程度の供給量にしかならない。また2030年の6%目標を達成するためには、5年間でSAFの生産能力を3倍に引き上げなければならない。さらに、産業分野全体で2050年までにネットゼロ目標を達成するには、2030年に燃料の15%を、2050年に燃料の75%をSAFに置き換える必要がある¹。



航空業界の脱炭素化は、世界全体の温室効果ガス（GHG）排出量を削減する上で重要な意味を持っている。

SAF業界の現状

「SAF業界は今、クリーンなスタートを切るために奮闘しています。健全な収益が得られる市場環境が整わなければ、投資家は動きません。そして積極的な投資がなければ、革新的な技術の開発も、SAFの生産手法の進化も頭打ちになってしまいます」

**Dr. Jan Wille、PwC Strategy& ドイツ
EMEA航空宇宙・防衛部門リーダー**

さらに、グローバルの規制を巡る不透明感や原料の不足といった障壁もある。こうした現状を踏まえながら、SAFの供給量拡大を後押しするには、大胆な投資を基盤としてSAFの技術とバリューチェーンのためのコスト効率に優れたエコシステムを構築しなければならない。

私たちは今回の調査で、SAF市場のダイナミクスがどのように変化しているか、サプライチェーン全体でSAFの普及を阻むどのような障壁が生じているか、さまざまなステークホルダーはこれらの障壁をどのように克服しようとしているか、航空業界にとって最適なエコシステムの構築につながるビジネスモデルとはどのようなものか、といった観点から詳細な分析を行った。また今回の調査結果は、2022年に発行されたレポート「[The real cost of green aviation](#)（航空業界のグリーン化にかかる実質的なコスト）」で明らかにされた知見も参考にしている。

SAFを現在の「あれば助かる」存在から「実用的な主力燃料源」へと格上げするためには、業界を横断した取り組みが不可欠である。例えば、野心的なスタートアップをはじめとする新たなプレーヤーを市場に呼び込み、現実的な価格設定を模索する必要がある。また、SAFの供給量を増やせば需要も拡大し、持続的かつ確実な利益がもたらされるという市場の健全性を、潜在的な投資家たちに示していくことも重要である。



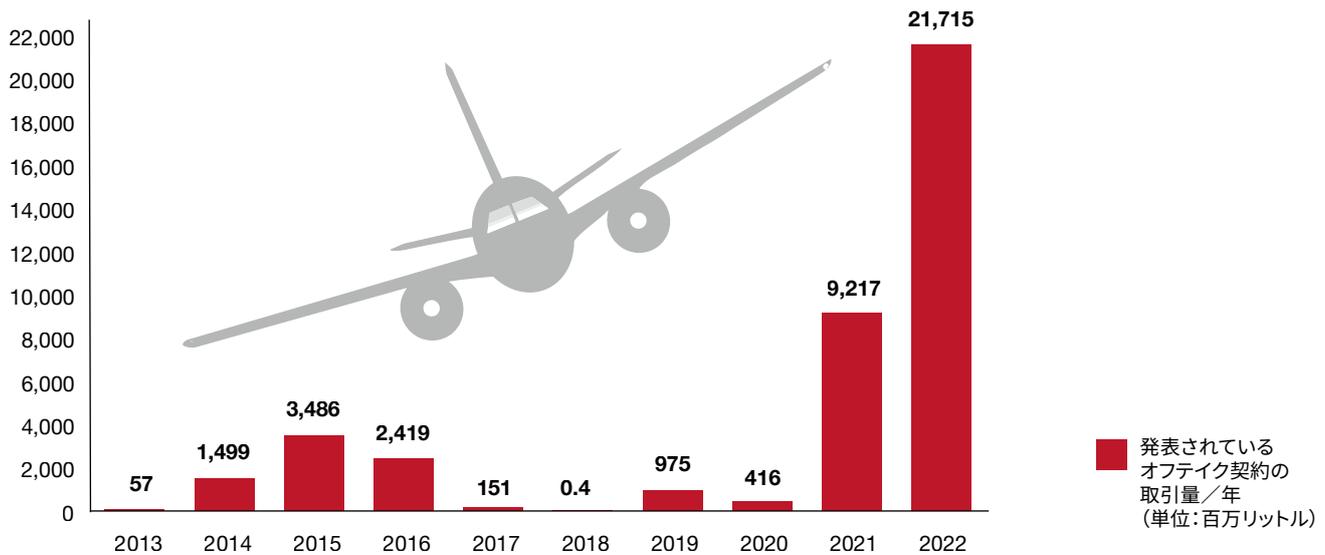
SAFを現在の「あれば助かる」存在から「実用的な主力燃料源」へと格上げするためには、業界を横断した取り組みが不可欠である。

セクション1

現在のSAF市場のダイナミクス：需要と供給

航空業界においてSAFの重要性が高まりつつあることは、SAF関連のプレスリリースの頻度や、発表されるオフテイク契約の内容からも見てとれる。2022年までの時点で、SAFの取引量は全世界で約400億リットルに達し、過去数年間でオフテイク契約に関する発表は急増している（図表1参照）²。

図表1
2022年までのオフテイク契約の取引量／年（単位：百万リットル）



出所：国際民間航空機関（ICAO）、2023

SAFの取引量が拡大する背景には、2050年までにネットゼロ目標の達成を目指す航空業界など、環境目標を踏まえた市場ニーズ³に加えて、世界的な規制強化の影響がある。現在、各国が発表しているSAFへの置き換え目標は、欧州がReFuelEUに準じて2030年までに全便の燃料の6%、英国が2030年までにジェット燃料の10%、インドが2025年までに国内便の燃料の1%、日本が2030年までに国際便の燃料の10%⁴となっている。

² オフテイク契約の取引量について見る場合、年間の生産量や使用量とは一致しない点を念頭に置く必要がある。オフテイク契約は通常、数年間にわたる長期契約となる。例えば、図表1では2019年に契約した全量が同年に記載されているが、実際には、その後数年間にわたって必要に応じてSAFが生産・使用されることになる。

³ 現在、ボランティア（任意）のSAF市場の需要は大きく変動しており、将来的な需要の見通しを立てるのは困難である。企業によってはGHGの排出量を削減するために、出張旅行などでSAFを用いてSBTi目標（科学的根拠に基づく目標）の達成を図るといった例もあるが、この他にもオフィスで再生可能電力を使うなど、より小さなコストで排出量を削減できるさまざまな選択肢がある。

ReFuelEU (EUにおける航空燃料のグリーン化を目指す規制) の目標においては、「再生可能エネルギー指令 (Renewable Energy Directive、現RED III)」に準じて、バイオ燃料および合成航空燃料 (PtL) の混合義務も定められている。欧州議会と欧州評議会の合意書に盛り込まれた置き換え目標には、PtLが占める割合も含まれる (図表2参照)。

図表2
EUにおけるSAF置き換え目標

	2025年	2030年	2032年	2035年	2040年	2045年	2050年
SAFの割合	2%	6%	6%	20%	34%	42%	70%
うちPtL	/	1.2%	2%	5%	10%	15%	35%

出所: 欧州議会 (2023)

これらの規制は順守できなければ大きなペナルティが課されることから、SAFの生産能力の拡大に向けた投資を促進する十分な根拠となる。しかし、SAFへの置き換え目標の割り当てに同意している国もあれば、同意していない国もあり、このことが国際競争に関する新たな不確定要素も生み出している。

世界全体でのSAF需要を把握するために、今回も前回の調査と同様に国際エネルギー機関 (IEA) の「ネットゼロロードマップ」を分析のベースとして用いた。このロードマップは現在、業界を横断したシナリオのモデルとして広く認知されており、世界各国に対してパリ協定で定められたGHGの削減目標の達成に向けた道筋を示している。

2050年までにIEAが掲げるネットゼロロードマップを達成するには、図表3に示すSAFへの置き換え目標の実現が必須となる。

図表3
IEAのネットゼロシナリオ^{vii}に基づく最低限のSAF置き換え目標

	2025年	2030年	2035年	2040年	2050年
SAFの割合	2%	15%	32%	50%	75%
うちPtL	/	2%	7.5%	15%	30%

出所: IEA (2021)

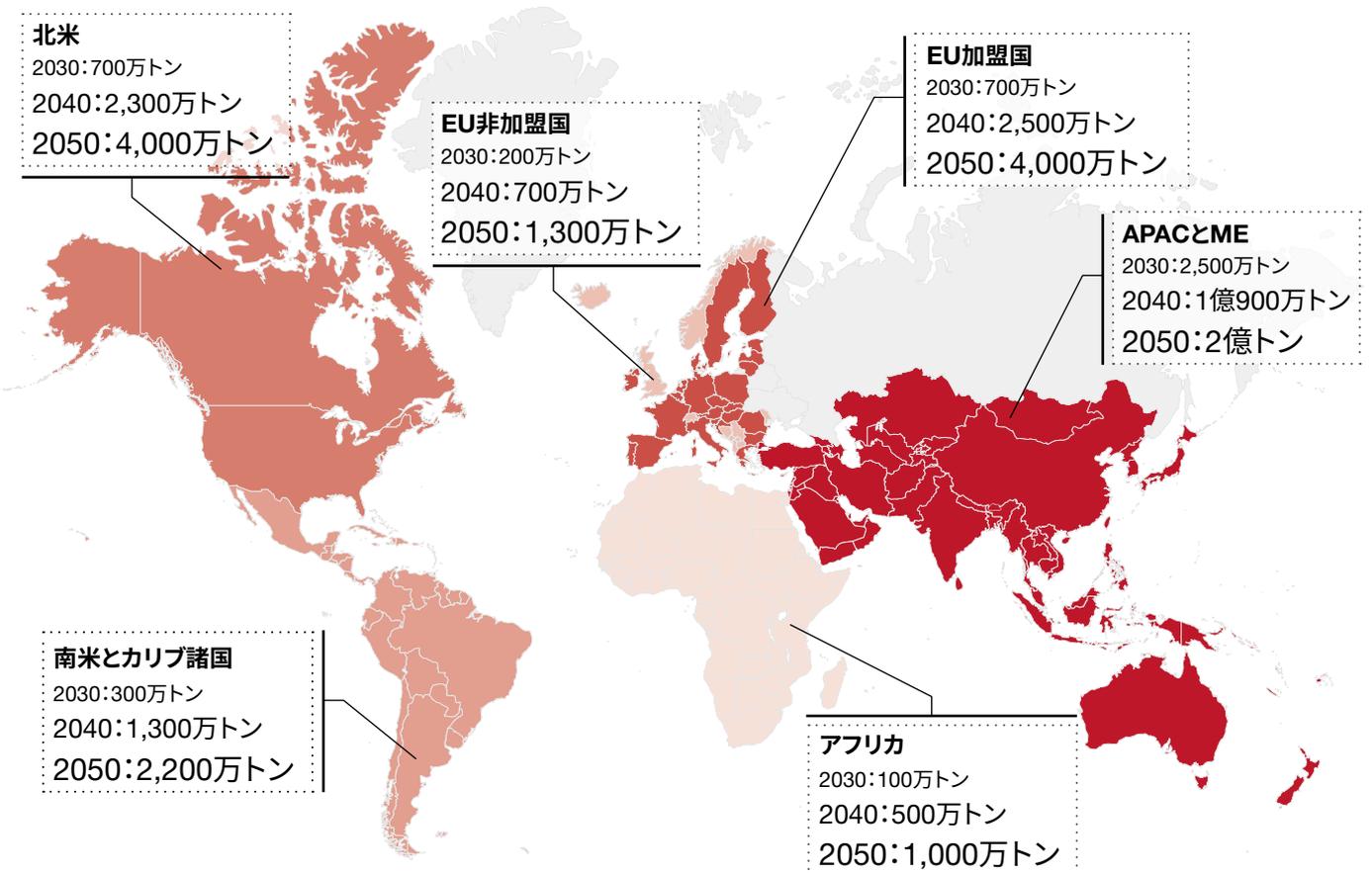
ここで挙げる数値は、少なからぬ不確定要素を含んだ推定に基づいて算出したものであるため、将来において必要となるSAFの規模を知る手がかりに過ぎない。2050年までにIEAが掲げるネットゼロ目標を達成するには、同年までに世界の旅客機のSAF需要が年間で約3億2,500万トンに達する必要があると私たちはみている⁴。なお、消費者主導でSAFの需要が増大すれば、この数値はさらに高くなる可能性もある。

世界全体のSAF需要は、想定される輸送回数に基づいて図表4のように地域別に分けることができる。ここでは、規制に関する不確定要素や違い、地域ごとの生産の前提条件、認証制度の有無、消費者主導による需要の変化といった要因も、地域別のSAFの必要量を大きく左右する点を念頭に置く必要がある。

地域別の推定需要からもわかるように、急成長するアジア太平洋（APAC）および中東（ME）地域がIEAのネットゼロシナリオの目標を達成するには、2050年までに約2億トンという膨大な量のSAFが必要になる。つまり、この地域は極めて大きなSAF需要が見込まれる、最大のSAF市場だということである。

4 これらの数値は、少なからぬ不確定要素を含んだ推定に基づいて算出したものである。そのため正確な数値というわけではなく、あくまで将来の需要の規模を知る手がかりとして提示している。

図表4
IEAのネットゼロシナリオに基づく地域別のSAF需要（数値は四捨五入）¹



¹ 地域別の需要と今後の予測は、輸送回数の推定値に基づいて算出した。長距離便、中距離便、短距離便の違いは考慮していない。

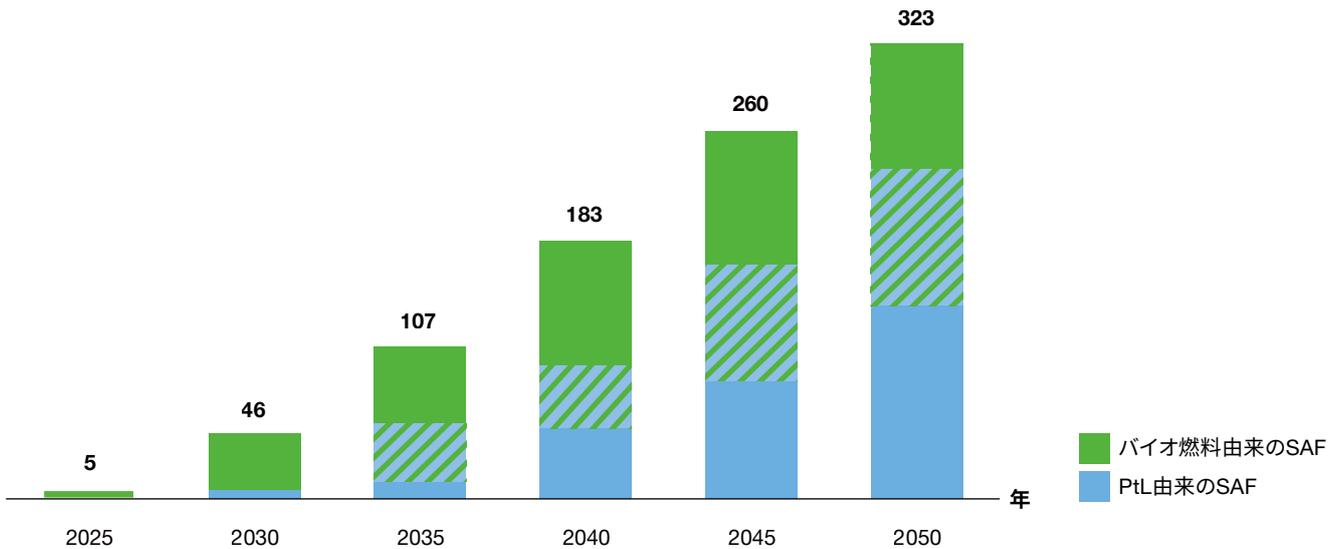
出所：Strategy&分析、Sabre、IHS、Airbus（2023）

APACおよびME地域では現行の規制案に加えて、原料（グリーン水素を生産するためのバイオ燃料および再生可能エネルギー）が豊富にあることから、SAF市場の拡大が経済的なメリットにつながる大きなチャンスが見込まれる。

原料供給の限界、ならびにバイオ燃料の需要競争を考慮しながら、世界全体の需要に応えるために必要なバイオ燃料由来のSAFおよびPtL由来のSAFの供給量の推移を予測した（図表5参照）。SAFの種類別の割合の変化は、最も安価なSAFの最大生産能力をベースとし、さらにIEAのネットゼロシナリオに基づくPtL置き換え目標を踏まえて予測している。

前提条件として、SAFの生産者とオフテイカー（SAFの購入者と消費者）のいずれも、最も安価なSAFを選ぶことでコストの最適化を図るはずである。例えば、PtLがHEFAやABtL（先進バイオ液体燃料）よりも安くなれば（2040年半ばにはそうなるとみられる）、PtLの需要が高まり、反対にHEFAとABtLの需要は低下するということである。

図表5
バイオ燃料由来のSAFとPtL由来のSAFの供給量の推移（単位：百万トン）



出所：Strategy&分析

SAFのタイプ別の割合の変化は、主に2つの理由によるものである。1つ目の理由としては、SAFの生産量の拡大と技術の進化に伴って、電解槽およびCO₂回収プラントの設備投資費が著しく低下することが挙げられる。もう1つの理由は、再生可能電力の生産コストが中欧では70~90ユーロ/MWhであるのに対して、コスト効率の最も良い地域では10~20ユーロ/MWhまで下がると予測されるためだ。従って、PtL由来のSAF生産に利用可能な高品質な再生可能電力が豊富な国は競争優位性が高いと言える。

HEFAおよびABtLによるSAF生産者がこうした変化に対応するには、価格を引き下げる、供給先の業界を見直す（海上輸送や化学業界など）、バイオ燃料由来の生産設備を徐々に拡張して競争力を維持する、既存の生産能力を最大限に活用するといったアプローチが考えられる。

SAFの十分な供給量の確保はこれまでも大きな課題だったが、少なくとも短期的には解決されないとみられる。私たちの推定では、2030年までに100~200のSAF生産施設が整備されれば、IEAのネットゼロシナリオに基づく世界の推定需要に応えることができる。2050年までで見ると、440~940の生産施設が必要となり、その場合、SAF生産者の設備投資費は累積で1兆ユーロに達するだろう。予測される需要レベルに応えるには、SAF生産者は大規模投資を行って供給量を引き上げる必要がある。IATA（国際航空運送協会）の最近の発表によれば、現在フル稼働しているSAF生産施設は11カ所にとどまっており、大規模な投資と供給量の拡大は避けられない課題だ。

“

「長期的に考えたとしても、バイオ燃料由来のSAF、PtL由来のSAFのいずれも、新しい生産施設は現在の製油所よりも著しく規模の小さなものになるだろう」

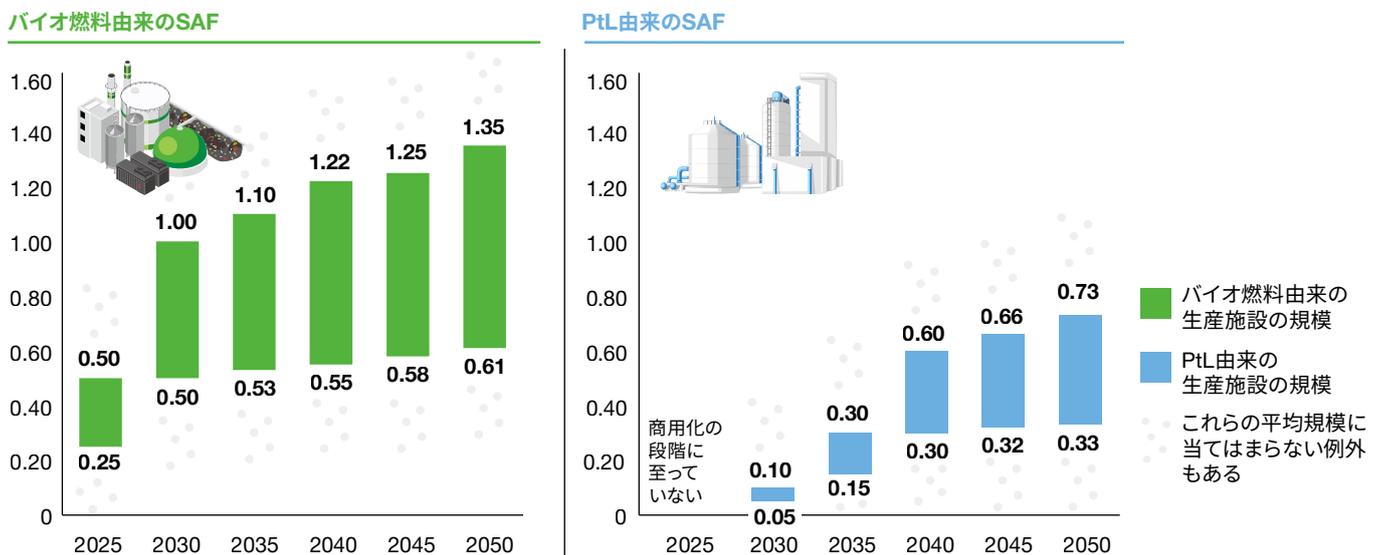
Prof. Dr. Jürgen Peterseim
Fueling our Future Initiative Lead
PwCドイツ

高まる需要に応えるために必要な生産施設の数、当然ながらそれらのプラントの平均生産量によって決まる(図表6参照)。

既存の製油所をSAF生産施設に転換するにせよ、更地から新設するにせよ、年間で数百万トン規模のSAFを生産するような大規模プラントに十分な原料を確保することは不可能だろう。

将来的な原料価格、ならびに廃棄物原料や水素、CO₂の供給力はまだ不透明だ。従って、大量の原料を主力の大規模生産施設に輸送するアプローチと、原料の調達場所の近くにSAF生産施設を分散するアプローチの、いずれが収益性に優れているかは現時点では推測の域を出ない。

図表6
SAF生産施設の平均規模の範囲(単位:百万トン)



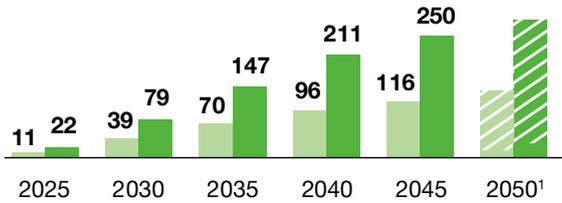
注: 図表中のバーは、SAFプラントの平均規模の推定値を示す(例えば、2025年のHEFAプラントの平均規模は最小で25万トン、最大で50万トン)。ただし、より小型なプラントや大型のプラントもあり、そうしたプラントの規模も加味して平均規模を推定している。

出所: Strategy&分析

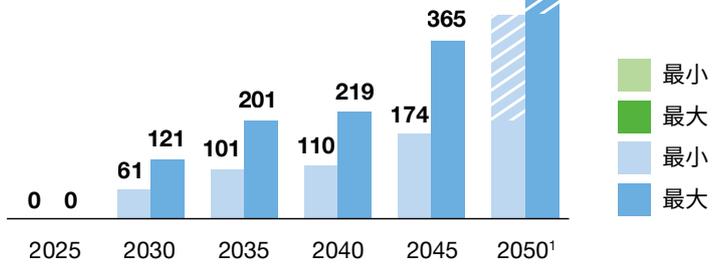
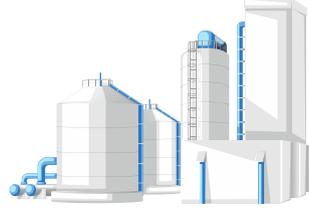
図表7

SAFの需要量と生産施設の最小平均規模、最大平均規模（図表6参照。単位：百万トン）それぞれに基づいた生産施設の必要数

バイオ燃料由来のSAF



PtL由来のSAF



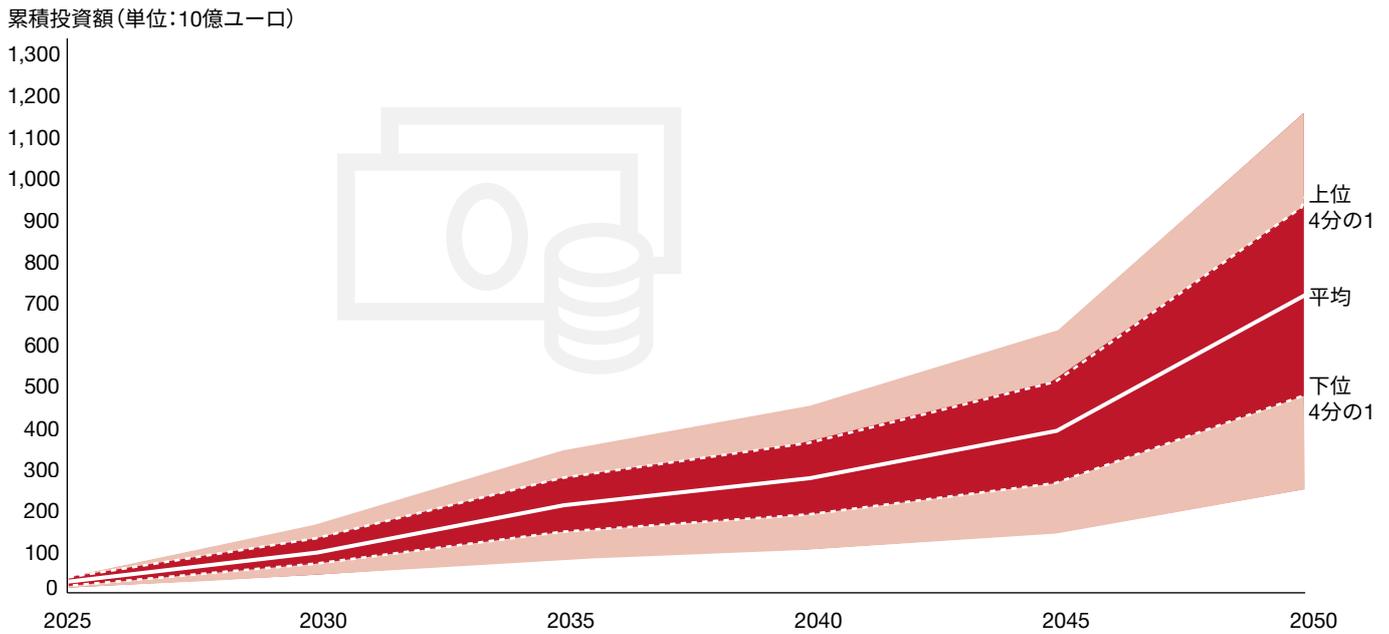
1 2050年にバイオ燃料由来のSAF生産施設の新設はないとみられる。2050年時点で必要となるバイオ燃料由来のSAF生産施設の数、PtL由来のSAFの価格と需要によって決まる。

出所：Strategy&分析



必要な数のSAF生産施設を整備するには、図表8にあるように大規模な投資が不可欠となる。

図表8
必要となる設備投資費（単位：10億ユーロ）



出所：Strategy&分析

継続的な設備投資が重要であることは言うまでもないが、投資のギャップが生じれば、当然ながら生産能力が落ち、慢性的な生産量不足に陥るため、ノルマを達成できなくなる。その結果、グリーンな航空産業への転換は何年も遅れることになる。

SAF生産施設の整備以外にも、バリューチェーンの拡大と発展も重要な課題である。つまり、エコシステム全体ではさらに大規模な投資が必要になる。

セクション2

SAFのバリューチェーンとコストの配分

SAFは異なる生産手法のそれぞれで、相対的な強みと弱み、コスト構造の違いがあるため、これらを検討することで具体的にどの領域で投資が必要なのかを明確化できる。

そのためには、バイオ燃料由来のSAFとPtL由来のSAFを区別する必要がある。以下では、まずバイオ燃料由来のSAFの代表的な生産手法であるHEFAについて、続いてPtLによるSAFの生産手法について概説する。HEFAは現時点で最もコスト効率に優れ、成熟した生産手法であるのに対し、PtLは将来的に大きな期待がかけられている生産手法である⁵。

HEFAのバリューチェーン

HEFAは、現時点において最も成熟したバイオ燃料由来のSAFの生産手法とされている。植物油、動物油、廃棄物、脂質残留物を原料とし、これらを水素化処理して酸素を除去し、混合物を炭化水素鎖に分解後、異性化（化学組成は変えずに異なる構造に転換すること）を行ってSAFを生産する。

HEFAによるSAF生産では、化石ジェット燃料と比べてCO₂排出量を74～84%削減できる。すでに認証取得済みのHEFAは、航空機とインフラのいずれも改修を行わずに、最大50%まで化石ケロシンに混合することが可能である。ただしHEFAの生物起源を考えると、原料の供給量には必然的に限りがある。持続可能な航空燃料であるSAFとしてCO₂排出量の削減に貢献していくためには、EUのRED IIIなど、高度な持続可能性基準を満たした原料を使うことで、森林伐採を防ぎ、食料生産との競争を避けなければならない。

⁵ SAFの生産手法は他にもあり、技術とインフラの進化によっていずれ商用化されるとみられるが、まだ開発の初期段階にあること、現時点では拡張性に限界があることなどから、本調査の分析には含めていない。しかし、SAFの生産技術やビジネスモデルの継続的な進化は、先進的なバイオ燃料やATJ技術（アルコールからSAFを製造する技術）といった別の生産手法や、バリューチェーンでのコスト配分に大きな影響を及ぼしていくと考えられる。

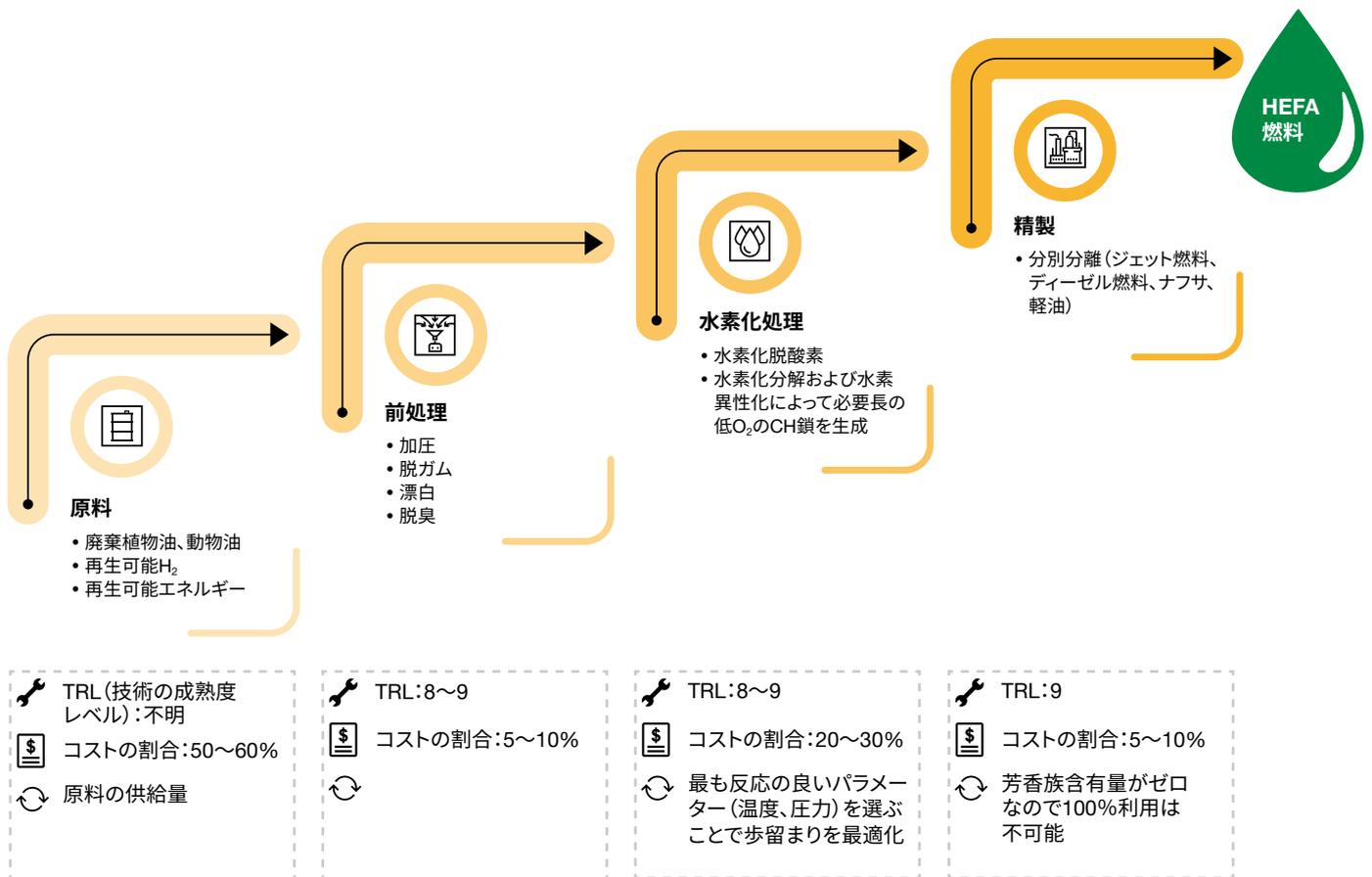


HEFAによる
SAF生産では、
化石ジェット
燃料と比べて
CO₂排出量を
74～84%
削減できる。

バリューチェーン全体で見ると（図表9参照）、HEFAによるSAFの生産技術はすでに成熟しており、拡張が可能である。従って、今後は前処理および水素化処理用の生産施設の整備に大規模な投資が必要になると考えられる。現時点で明らかになっている最大のコスト要因は、供給量に限りのある原料である。

図表9
HEFAのバリューチェーンとコストの配分

HEFAによるSAF生産手法は技術的に成熟しているが、持続可能な原料の供給量に限りがある



出所: Strategy&分析

PtLのバリューチェーン

PtLによるSAFの生産では、フィッシャー・トロプシュ法 (FT法) もしくはメタノール合成のいずれかの手法により、電解からグリーン水素を、持続可能な炭素源からCO₂をそれぞれ生成して、ジェット燃料とその他の炭化水素生成物を生産する。

PtLによるSAF生産によって、CO₂排出量は89~94%削減される。ただし、技術としてはまだ開発の初期段階にあり、大規模な生産に移行するにはいくつかの課題が残されている。

HEFAによるSAF生産と同様に、PtLの場合も原料の供給量に限りがある。PtLの構成物質 (水素、再生可能エネルギー、二酸化炭素) は理論的にはほぼ無限に入手できるが、他のセクターとの競争が激しいという問題がある。また、EUの環境関連法は現在、水素生産やCO₂源について厳しく規制している。例えばRED IIIは、合成SAFを含む全ての水素生産プロセスについて、発電およびCO₂源に関連した基準、ならびに混合義務の順守を定めている。米国や中東、アジアといったその他の地域は今のところそうした厳しい規制を設けておらず、少なくとも短期的には導入されないとみられることから、SAFの生産拠点としてより魅力的だと言える。

SAFは、十分な原料がなければ生産することができない。また、再生可能エネルギー源 (RES) による発電量は変動するため、これがPtLの安定した生産プロセスに影響を与える可能性や、電力の貯蔵の必要性も考えられる。利用できる電力量に限りがあれば、水素およびSAFの価格上昇にもつながるだろう。こうした状況は、再生可能資源であるCO₂にも当てはまる。CO₂の回収は現在、直接空気回収 (DAC) というコストのかかる手法が多く用いられている。よりコストの低い手法としては、セメント製造などの生産過程で回収する方法もあるが、限られた時間の中で極めて厳格な要件を満たさなければならない難しさがある。さらにSAFの生産コストは、再生可能電力のコスト、電解プロセスの効率性、CO₂回収技術の有用性やコストといったさまざまな要因によって左右される。

PtLによるSAFの生産技術は開発の初期段階にあること、インフラの整備要件があることから、そのコストはHEFAよりも高くなることが予想される。PtLが将来的に競争力を獲得するには、バリューチェーン全体で原料に関連した技術開発 (DAC技術など) などへの大規模な投資を行い、生産プロセスの柔軟性と効率性を高めていく必要がある (次ページの図表10参照)。



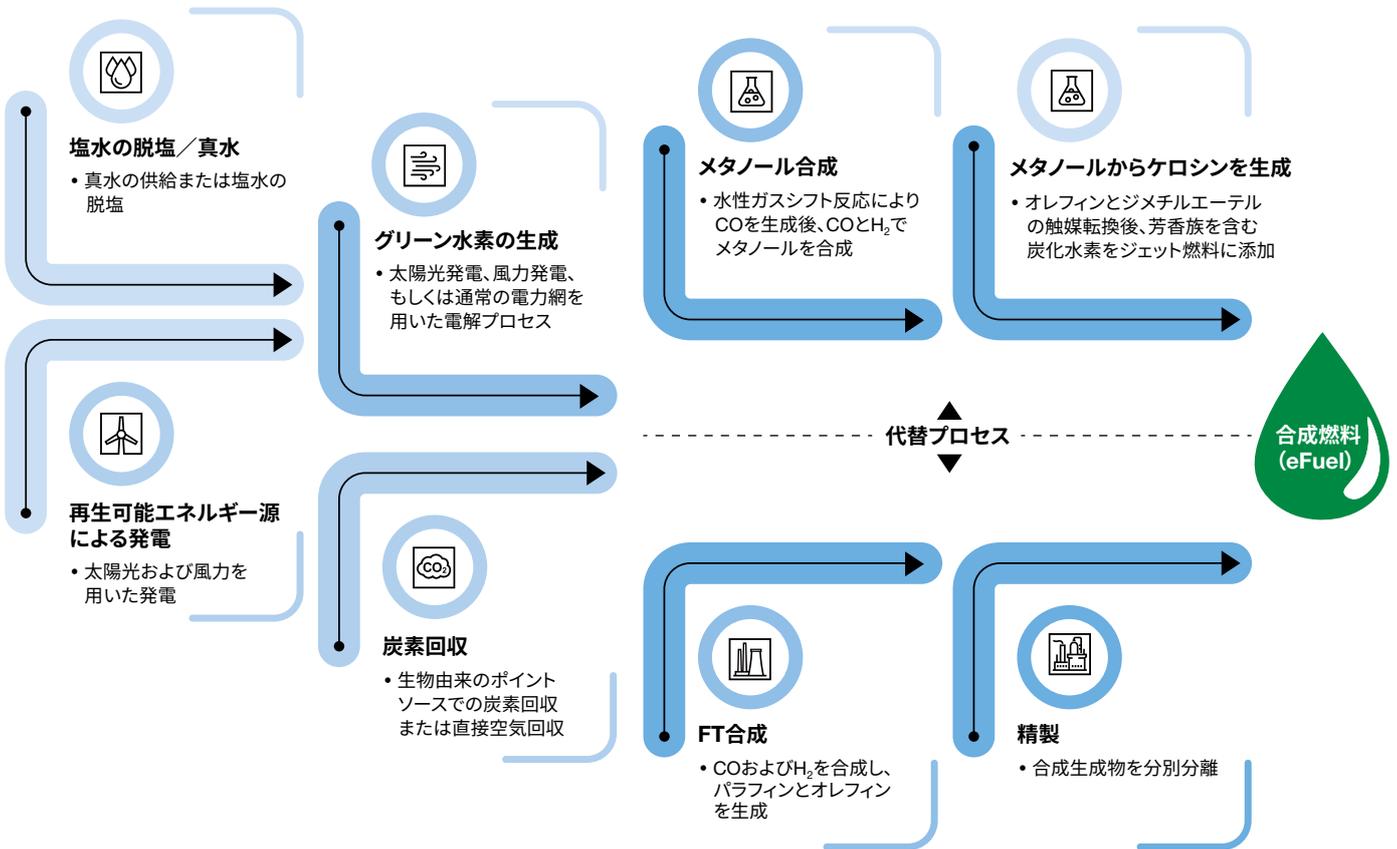
PtLによるSAF
生産によって、
CO₂排出量は
89~94%
削減される。

図表10

PtLのバリューチェーン

PtLのバリューチェーン全体とその課題への理解を深め、SAFの生産を拡大していく必要がある

<p> TRL (技術の成熟度レベル): 逆浸透膜は9</p> <p> コストの割合: 1~2%</p> <p></p>	<p> TRL: ALKは8~9、PEMは7~8、SOEC¹は6~7</p> <p> コストの割合: 20~25% (電力費含まず)</p> <p></p>	<p> TRL: 9</p> <p> コストの割合: 10~15%</p> <p></p>	<p> TRL: 8</p> <p> コストの割合: 5~10%</p> <p> 最も反応の良いパラメーター(温度、圧力)を選ぶことで歩留まりを最適化</p>
--	---	---	---



<p> TRL: 8~9 (洋上風力発電が最も低い)</p> <p> コストの割合: 30~40%</p> <p> 再生可能エネルギーの生産コスト</p>	<p> TRL: DAC²で6~7、ポイントソース回収で7~8</p> <p> コストの割合: 20~40% (ポイントソース回収またはDAC)</p> <p> 生物由来CO₂の供給量、DACのTRL</p>	<p> TRL: 8~9</p> <p> コストの割合: 10~15%</p> <p> 最も反応の良いパラメーター(温度、圧力)を選ぶことで歩留まりを最適化</p>	<p> TRL: 9</p> <p> コストの割合: 5~10%</p> <p></p>
---	--	--	--

1 SOEC = 固体酸化物形電解セル
2 DAC = 直接空気回収

出所: Strategy&分析

SAFバリューチェーンの拡大：その障壁と求められるアクション

さまざまなSAFのバリューチェーンの中で、すでにSAFの生産に関連する技術の大部分は成熟度が高く（DACを除く）、コスト構造も明確になりつつある。にもかかわらず、現時点でSAFの供給量は不足している。

では、SAFのサプライチェーンを迅速かつスムーズに拡大していくためには、どのようなアクションが必要なのだろうか。私たちはHEFA技術、PtL技術のそれぞれでSAF業界をリードする2社への詳細なインタビューを通じて、現在直面している障壁と、それらを克服するための戦略について話を聞いた。

HEFAのバリューチェーンを拡大する機会：

Neste



現在、SAF業界において最も成熟している生産技術はHEFAである。世界有数のHEFA-SAFおよび再生可能ディーゼル燃料の生産者であるNesteは、2030年までに年間2,000万トン以上のCO₂排出量の削減を目指すクライアント企業を力強くサポートしているⁱⁱⁱ。私たちは、同社の再生可能航空事業部門でコマーシャルマネジメントおよび事業開発担当バイスプレジデントを務めるJonathan Wood氏から、今後の成長戦略、SAFの需要拡大に向けて克服すべき主な課題、航空業界の脱炭素化に向けた主な取り組みについて話を聞いた。

必要とされるSAFの生産量を確保するための課題は？

「航空業界の全てのステークホルダーは過去数年間にわたり、2050年までのネットゼロ目標の達成に向けて連携してきました。SAFに関連する新たなプロジェクトや航空会社との供給契約についても、数多くの発表がなされています。しかしながら、IATAによれば2022年の段階でSAFの使用量は業界の燃料

需要全体のわずか0.1%を占めるに過ぎません。化石ジェット燃料に比べてSAFのコストが高いことが、需要の伸びを鈍化させています。また、化石由来燃料の使用におけるCO₂関連のコストが価格の一部と認識されていないことも影響していると考えられます。

こうしたことから、今後は規制政策がより重要な意味を持つようになります。SAFに対する確実かつ長期的な需要見通しがあれば、計画中のSAF生産プロジェクトから健全な収益を上げることが可能だという判断に至り、ひいてはSAF供給量の拡大目標の達成へとつながっていくはずですが。

SAF市場の長期的な成長を促す2つ目の要因として、再生可能原料の貯蔵量の増大があります。これには、新たな生産技術の開発と規模拡大が必要です。

さらに、SAFの普及拡大を後押しする3つ目の要因として、SAFは環境問題の改善に資する持続可能な

航空燃料であるという認知、理解、信頼の醸成も不可欠です。そのためには国際的な規格に基づいてCO₂の排出削減量を測定し、ユーザーがSAFを用いたフライトを自発的に選べる環境を整えていく必要があります」

規制政策の強化を通じたSAF使用量の拡大

「現在、世界のさまざまな地域でSAF関連の新たな規制が生まれつつありますが、そのアプローチは市場ごとに異なります。すでにEUでは、既存の航空会社に全航空燃料に占めるSAFの割合の引き上げを求める規制が発動され、さらに2025年にはEU全体でSAFの割合を2%に、2030年には6%に、2050年には70%にすることが求められる見通しです。同様に英国でも、2025年からSAFサプライヤーに新たな義務が課されることになっており、2030年までにSAFの割合を10%に引き上げる目標となっています。米国では、税額控除や各種インセンティブ（他のセクターにおける再生可能燃料の使用目標および義務と関連付けたインセンティブ）といった、優遇措置的な規制のアプローチがとられています。同様の規制案が出されている地域としては、シンガポールや日本といったアジア各国のほか、すでにバイオ燃料が陸上輸送に広く利用されているブラジルをはじめとした南米があります。こうした規制政策は、SAFの需要を確実に高めていく、あるいは供給量を拡大していく上でも不可欠です。新たなSAFの生産技術の開発を促し、十分な再生可能原料を確保するためには大規模な投資が必要で、そこには大きなリスクも伴うからです。

各地域の規制の枠組みは、サプライヤー、航空会社、エンドユーザーの全てが順守しなければなりません。航空業界はグローバルな業界なので、政策による支援内容やレベルが統一されれば、最終的に航空会社にとって公平な競争の場が確立されることとなります。そうなれば、ICAO（国際民間航空機関）の出番です。ICAOのサポートのもと、グローバルな航空業界全体としての方向性や政策の枠組み、基準に関する合意を結び、業界全体でネットゼロ目標の達成を目指すことができるでしょう」

再生可能原料の拡大と生産技術の進化

「HEFAによるSAF生産では、多くの廃棄物、残渣油、油脂が原料として用いられます。これらの原料はさらに増やせる可能性があり、世界経済フォーラムの『クリーン・スカイズ・フォー・トゥモロー（Clean Skies for Tomorrow）』レポートなどの調査研究によれば、2030年までに最大で約4,000万トンまで拡大できるそうです。持続可能な廃棄物および残留物をフル活用することが、SAFの生産規模をさらに拡大する鍵となります。これを実現するためのアプローチは国や地域によって異なります。例えばEUでは、先ごろ採択されたReFuelEUがSAF生産用の原料貯蔵に厳しい規制をかけています。この規制では、新規植物油などの新たな持続可能原料は、未活用の土壌の質改善に利用できるほか、地域社会にとって新たな収入源となるため、SAF用原料貯蔵の対象外とされています。これに対して米国では、トウモロコシ由来のATJ技術の利用を推進しています。これにより、持続可能原料を約1億5,000万トン拡大できる大きなポテンシャルが生まれ、しかも土地利用の変化や生態系への影響を引き起こす心配もありません。これらの原料をHEFAによるSAF生産に用いることで、供給量を拡大することが可能です。

その後も、さまざまな原料や技術がさらなるSAF供給量の拡大を促進してくれるでしょう。まだHEFAほど成熟していない技術でも、事前に大規模な資本投資が得られ、原料コストが安定してくれば、それが可能です。例えば、農業廃棄物や林業廃棄物といったリグノセルロース系残留物の利用、都市廃棄物とFT法によるガス化の組み合わせがあります。また、藻類とPtL法を組み合わせた手法では、生物由来源から空気回収した炭素とグリーン水素を、再生可能エネルギーを用いて結合させ、合成燃料由来のSAF（e-SAF）を生産することができます。

重要なのは、政策が新たな原料の調達と生産技術プラットフォームの拡大を許容し、後押ししてくれることです。それにより、業界は化石燃料を多種多様なSAFに置き換えることができるようになります。さらに、再生可能エネルギーの提供者や原料供給者、技術提供者、複雑な大規模処理プラントの運営会社、流通業界、マーケティング業界など、異なる能力を持ったステークホルダーが協働するためのパートナーシップも重要です」

CO₂の排出量を削減する確実な手法として、SAFに対する理解と信頼を高める

「SAFとは何か、なぜSAFが信頼できる確実な手法なのか、業界の関係者は全てのステークホルダーに必要な情報や知識を伝え、乗客をはじめとするエンドユーザーや、出張旅行や航空貨物を利用する企業との間に信頼感を醸成する役割を担わなければなりません。カーボンオフセットの信頼性と一貫性に疑問が投げかけられている現状を踏まえ、SAFは決してグリーンウォッシュではないという認識を広めていく必要があります。

現在、CO₂排出削減量の算出方法は複数あり、認証要件も機関ごとに異なります。規制を順守していることを証明したり、インセンティブを申請したりするための必要書類も、政府機関によってまちまちです。また、SAFの購入者に提示する書類も異なります。従って、化石燃料の代替物によって達成できる排出削減量を算出する信頼できる基準を確立した上で、こうした全てのプロセスを統一することも重要です。

SAFのプレミアム料金を支払い、CO₂の排出削減を達成することで社会貢献を目指している顧客が、その目標をなるべく容易に実現できるようにすること

も大切です。そのためには、支払い額に見合う対価を得られるという信頼感を提供しなければなりません。現時点では、世界中の全ての空港でSAFを調達できるわけではないため、顧客がSAFプレミアム料金の支払いを選択し、実際にはそのSAFを別のフライトに供給する、または生産拠点到近い別の場所で供給するというシステムが各地で構築されています。『ブック&クレーム』と呼ばれるこの方式は一見、社会貢献を目指す顧客を支援できる魅力的なソリューションに見えます。しかしながら、この場合でも改めて明確なガイドラインに基づくシステムを整備することで、CO₂排出削減の取引は一回限りであるという一貫性と確実性を確保する必要があります。

幸い、業界は脱炭素化に向けて積極的に取り組んでいます。航空業界はCO₂の排出削減がとりわけ困難なセクターであり、膨大な投資が必要とされますが、いくつかのソリューションを組み合わせることでネットゼロを達成できると考えています。これは大きなチャンスであり、エコシステムを構成する全てのプレーヤーが協働し、この課題に取り組んでいるところです」

PtLのバリューチェーンを拡大する機会：

Spark e-Fuels



Spark e-Fuelsは、あらゆる人々に、あらゆる場所で持続可能なエネルギーを提供することをビジョンに掲げる気候テック分野のスタートアップである。合成燃料由来のSAF (e-SAF) の供給量不足と高コストという課題の解決を目指す同社は、そのための取り組みとして、低コストの再生可能電力と直接接続された統合的なe-SAF生産システムの構築を進めている。

私たちはSpark e-Fuelsの3名の共同創業者のうちDr. Arno ZimmermannとDr. Mathias Böslの

2名へのインタビューを通じて、PtL技術を進化させ、そのポテンシャルを引き出すためには何が必要かという観点から、この技術の発展に向けた主な3つの道筋について話を聞くことができた。

SAFの需要拡大と規制による支援によって、投資の安全性を確立

「SAF関連の規制案は需要の拡大を促すシグナルにはなりますが、それだけでは価格の安定化にはつながりません。価格が安定しなければ、SAFのプロジェクトが確実に利益を生み出すかどうかの判断が

できません。膨大な初期投資というリスクを埋め合わせる方法の1つが価格の安定化を支えるメカニズムであり、そこでは規制を順守できない場合の明確なペナルティ制度のほか、いわゆる“差額契約”や“最後の買い手メカニズム”、CO₂排出量削減への貢献度に基づいた税制優遇措置、航空会社と燃料供給者とのオフテイク契約などが考えられます。

PtLの技術開発者と航空業界のステークホルダーの協働も大きな影響を及ぼすと考えられます。PtL燃料の供給量拡大に向けた両者の連携によるパイロットプロジェクトや商用スケールのプラントの実例としては、ドイツのPtX Lab LausitzやKopernikusプロジェクト、英国のAdvanced Fuels Fund (AFF)、ドイツ航空宇宙センター (DLR) のTechnologie Plattform PtLなどがあります。

この他にも、実証プロジェクトへの公的資金投入によって技術的リスクを軽減し、財務的な実現性を高める、商用規模の生産施設の初号機 (FOAK) への設備投資費を助成するといった手法も有効です。また、グローバルでより一貫性のある規制の枠組みを設けることにも非常に大きな意味があるでしょう」

PtL技術の成熟度を大規模に証明する

「PtLによるSAF生産は、まだ技術的な成熟度の観点で大規模な検証がなされていません。再生可能エネルギーなどの変動要因を考慮した柔軟な生産プロセスが必要です。考えられる解決策としては、新たな実証プラントやFOAKの整備と資金調達を行って、触媒や電解技術、燃料合成プロセスの改善を推し進める、炭素回収技術やオフグリッド技術を向上させて低コストの再生可能電力の利用を実現する、といったものがあります」

十分な原料供給の確保：電力とCO₂

「再生可能電力の供給量に限界があることも、大量のエネルギーを消費するPtL燃料の生産に影響を及ぼしています。現在、PtL生産はオングリッド技術を用いているため、安定した電力供給と他の電力オフテイク契約先との競争という課題があります。そのため、不安定でも電力価格の安い場所で再生可能電力を利用するオフグリッド技術の開発が進められていますが、さらなる資金投入が必要なのが実情です。

可能性のある解決策としては、政府による支援的な政策およびインセンティブ (再生可能エネルギープロジェクトに対する固定価格買取制度、税額控除、助成金、補助金など) を利用して再生可能エネルギーの導入と生産を促す、技術開発への投資を推進するといったものがあります。オングリッド技術では、長期的なグリッドの安定化とエネルギー貯蔵が有効です。オフグリッド技術では、低コストな場所で生産される再生可能エネルギーの直接オフテイク契約を可能にする技術開発が考えられます。

当面、PtLによるSAF生産量は多くはないので、CO₂の供給量は問題になりません。ただし、将来的にはCO₂供給を巡る競争は激化するでしょう。とはいえ、2030年までには生物由来のCO₂を利用したPtL生産が現実になると考えられます。EUも2041年をめどに、産業ポイントソースで回収されるCO₂を利用できるようにすることを決定しています。グローバルで見ると、CO₂の回収源に関する議論はEUよりもはるかにオープンです。米国では今のところ、CO₂の回収源に関する規制はありません。とはいえ、PtLによる持続可能なSAF生産を長期的に拡大するためには、生物由来のCO₂か、発生が避けられないCO₂かという問題に焦点を当てるのが重要です。直接空気回収の可能性はありません」

障壁を克服するために求められるアクション

以上のインタビューを通じて得られた知見をもとに、私たちはSAFの生産拡大に向けて克服しなければならない6つの主な障壁を明らかにした。

1. 規制の複雑さと不透明感



世界中のほとんどの国の政府は現在、SAF使用量の拡大に向けた義務規定やインセンティブをすぐにでも設けなければならないことを認識している。しかしながら、この問題については地域間で著しい相違があり、透明性も十分とは言えない。規制当局が明確な共通のゴールを見いだせない限り、航空会社、投資家、燃料生産者のいずれもサステナビリティ戦略に本腰を入れることができず、必要以上の投資に消極的な態度は変わらないだろう。

SAFに関連した義務規定と規制のいずれについても、協調的かつ国際的なアプローチで推進していくことが理想である。できる限り妥当な置き換え目標をグローバルで設けない限り、CO₂排出量を規制のない他の地域に移転するような抜け穴を防ぐことはできない。原料の要件を含めた生産の仕様を統一することも、公平な競争の場と高度なサステナビリティ基準の確立に有効である。

2. 会計を巡る不透明感



規制に関連したもう一つの障壁が、認証制度と企業の気候変動目標に対するSAFのクレジット方法である。現在、CO₂排出削減量を監査機関が確認し、企業の財務報告書に記載するためには、給油を現地の空港で行う必要がある。しかし、現在のところSAFは特定の空港でしか供給されていないため、国や地方自治体への報告において問題が生じることになる。

ここで有効なのが、世界経済フォーラムがRMIおよびPwCオランダ^{IV}と共に策定したような国際的なSAF認証取引のスキームだ。こうしたスキームがあれば、実際のSAF使用量と排出削減クレジットを切り離すことができる。また、SAFの使用によるスコープ3の排出削減量をクレジットとして含めることも可能になる。

炭素会計：スコープ3の開示

GHG排出量の会計および報告に関する標準化されたグローバルな包括的枠組みであるGHGプロトコルは、排出量を3つの「スコープ」に分類している。スコープ1が企業の所有下もしくは管理下にある資産からの直接的な排出量を指すのに対して、スコープ2は電力や熱、蒸気、冷水などを購入および使用した場合の間接的な排出量を指す。スコープ2はエネルギーを使用することで、GHGの排出に間接的に責任を負うという考え方に基づくものだ。そして、スコープ3は企業がサプライチェーンの上流および下流で行う活動を通じて発生する、その他の全ての間接的排出量を指す。従って、スコープ3の開示において評価されるGHG排出量は、所有下または管理下でない資産からの排出だが、その企業のバリューチェーン（出張旅行など）が間接的に影響を及ぼしている排出となる。

このようなスキームには、最も条件の良い場所でSAFを生産し、その場で直接使用することで、排出量が多くコストも時間もかかる燃料輸送をなくせるという利点もある。また、航空会社や燃料生産者はSAF認証書の販売を通じて、スコープ3のGHG排出削減の達成量をクライアント企業に販売できるため、これを新たな収益源としてSAFと従来の化石ケロシンの価格差を埋めることが可能になる。

さまざまなアイデアが議論されているが、現状では合意に至った例や公的制度は存在せず、SAFの国際市場の拡大が遅れているのが実情である。

3. 膨大な投資と市場の不透明感



投資家の意欲を低下させる大きな要因となっているのが、SAFの生産、貯蔵、流通に必要なインフラ整備のための初期投資の規模である。

膨大な初期投資の回収を巡る不透明感は、2つの方法によって払拭できる。1つ目は、規制と支援的スキームによる方法（欧州の置き換え目標、米国の税制優遇措置、各種契約を締結した後に化石燃料と再生可能燃料の差分を国が助成するなど）。2つ目は、一定の期間にわたり一定の量を一定の額で購入する企業との長期オフテイク契約⁶による方法である。同様の問題に直面したドイツの水素市場は、国の支援によって膨大な初期投資の課題にいかに対応できるかを示す好例になるだろう。ドイツではH2グローバル財団（H2 Global Foundation）がHydrogen Intermediary Company GmbH（HINT.CO）を仲介者として、供給側では長期購入契約を、需要側では短期販売契約を結ぶ取り組みを進めている。差金決済取引（CfD）と似たメカニズムによって、供給価格（生産と輸送）と需要価格の差分を公的または慈善団体の調達資金からの補助金で相殺する制度である。ドイツでは、こうした長期購入契約と政府支援によるオフテイカーのHINT.COを組み合わせることで投資の安全性を確保し、大規模投資を呼び込むことで、水素経済における触媒効果をもたらしている⁷。

⁶ SAFのオフテイク契約とは、SAF生産者と航空会社との契約において、販売量を含めたSAFの購入条件および供給条件を定めるものである⁸



「膨大な初期投資のリスクは、2つの方法で回避することができる。規制と支援的スキームによる方法、もしくは長期オフテイク契約による方法だ」

Dirk Niemeier, PwC Strategy& ドイツ
グリーン水素・代替燃料部門リーダー

政府の支援策の他にも、経済的な機会につながるいくつかの選択肢がある。長期オフテイク契約は、SAF購入者にとって2つの側面で魅力的なオプションだと言える。再生可能燃料に関する取り組みをマーケティングに活用することで、新たな顧客グループに訴求・リーチできることに加えて、企業の気候変動目標の達成も後押しできるためである。一例として自動車メーカーのボルボは、2021年に水素を用いた共同プロジェクトで製造されたグリーンスチールを購入。このグリーンスチールを新たなセールスポイントとして、「化石燃料フリーのスティール」で製造された自動車の販売を目指している^{VI}。こうした取り組みをSAF市場に応用すれば、航空会社はメーカーのサポートの下、環境への関心が高い顧客層を新たなターゲットとした戦略を展開することができる。

4. 持続可能な原料の供給量と拡張性



SAFの生産拡大を阻む4つ目の障壁は、繰り返しになるが、持続可能な原料の供給量と拡張性である。

この問題の克服に向けては、官民の両方が大きな役割を果たすことになる。国際的な持続可能性基準に関する継続的な対話は欠かすことができない。初期段階においては、どの基準を適用するかを定める単なる指針にとどまるとしても、それによって投資家や生産者に安心感を与えることができる。

一方、民間企業は最新の規制環境を注視して、初期段階から規制を順守できるようにしておく必要がある。規制の状況を監視する制度の導入も効果的だろう。原料源と供給の多様化戦略も有効だ。特定の植物油や都市廃棄物といった原料源の可能性をさらに検討しながら、南米や東南アジアといった特定の地域を念頭にグローバルな原料網とパートナーシップを構築するアプローチが、原料の多様化に向けた効果的な選択肢かもしれない。

5. SAF技術の拡張性



5つ目の障壁は、SAFの生産能力をバリューチェーン全体で商用レベルまで拡張するという課題である。具体的には、最大で現在の生産施設の5倍の生産能力が必要だ。効率性と環境への配慮、PtLでは場合によって個々の生産施設が物理的に近接している必要があるが、そのための適切なロジスティクスの構築も不可欠となる。

大規模生産の実現性に対する信頼感を醸成するには、バリューチェーンの全ての段階における実証施設の新設が不可欠である。ここではSAF精製だけではなく、炭素回収技術を含めたさまざまな実証施設が必要になる。グローバル市場全体での新たな機会を模索することも重要で、例えば南米やオーストラリア、中東など、特に再生可能エネルギー生産のポテンシャルが高い地域が有望である。こうした地域は、大規模生産施設を整備する上で魅力的な市場になり得ると同時に、近隣に各工程に必要な施設を建設できるメリットもある。

6. SAFに対する社会的認知の低さ



最後の障壁は、現状においてSAFに対する社会的認知と受容レベルが低い点である。SAFは、企業が「不可避」のフライト利用に起因するスコープ3のGHG排出量を削減する上で重要な役割を果たすが、ほとんどの企業はSAFそのものや、SAFが環境へもたらすメリットについてよく知らないのが実情だ。SAFはカーボンオフセットのメカニズムと混同されることが多いが、カーボンオフセットは過去における取引の不透明感によって信頼を失いつつある。また、SAFの現在の市場価格の高さも受容レベルの低さを助長している。

SAFに対する社会的認知を高めてメリットを訴求するには、いくつかの戦略が考えられる。第一の戦略は、航空業界のステークホルダーや政策立案者、一般市民をターゲットとして、エコシステムのメンバーが包括的な教育キャンペーンを展開することだ。これには、オフラインおよびオンラインのイベントやワークショップを開催し、参加者がSAFのメリットとデメリットを話し合っ、総合的な理解を深めるという取り組みも含まれる。

次の戦略は、新たなコラボレーションやパートナーシップの構築である。IATAやICAO、「First Movers Coalition」のような業界全体の取り組みをはじめとするグローバルなイニシアティブは、そのワールドワイドなリーチ力を生かしてSAFの認知度を高めていくことができる。コンソーシアムによる実証プロジェクトや共同研究は、SAFのような燃料の実現性と性能を確認しながら、信頼感を醸成していく上で効果的だろう。また、航空会社と政府機関によるオフテイク契約のようなロールモデルプロジェクトも、SAF技術に対する認知度および信頼度の向上に寄与するはずである。

最後に第三の戦略は、従来型のマーケティングに加えて、ソーシャルメディアやブログ、ポッドキャストを用いたオンラインキャンペーンを通じて、SAFに関する情報や成功事例、最新ニュース、幅広い視聴者にリーチできる興味深いコンテンツを共有することだ。

SAFの普及拡大を阻む主な障壁の分析結果をもとに、エコシステムを構成する全てのステークホルダーに初期段階にあるSAF市場の健全性を示すために必要な5つの主なアクションを導き出した（図表11参照）。これらについて詳述する前に、SAFのエコシステムとはどのようなものか、それぞれのビジネス・アーキタイプ（原型）にどのような違いがあるのか、エコシステムを介した積極的な協働が市場の発展にいかに関与できるかを明らかにしたい。

図表11
障壁を克服し、SAFの生産を拡大するためのステップ

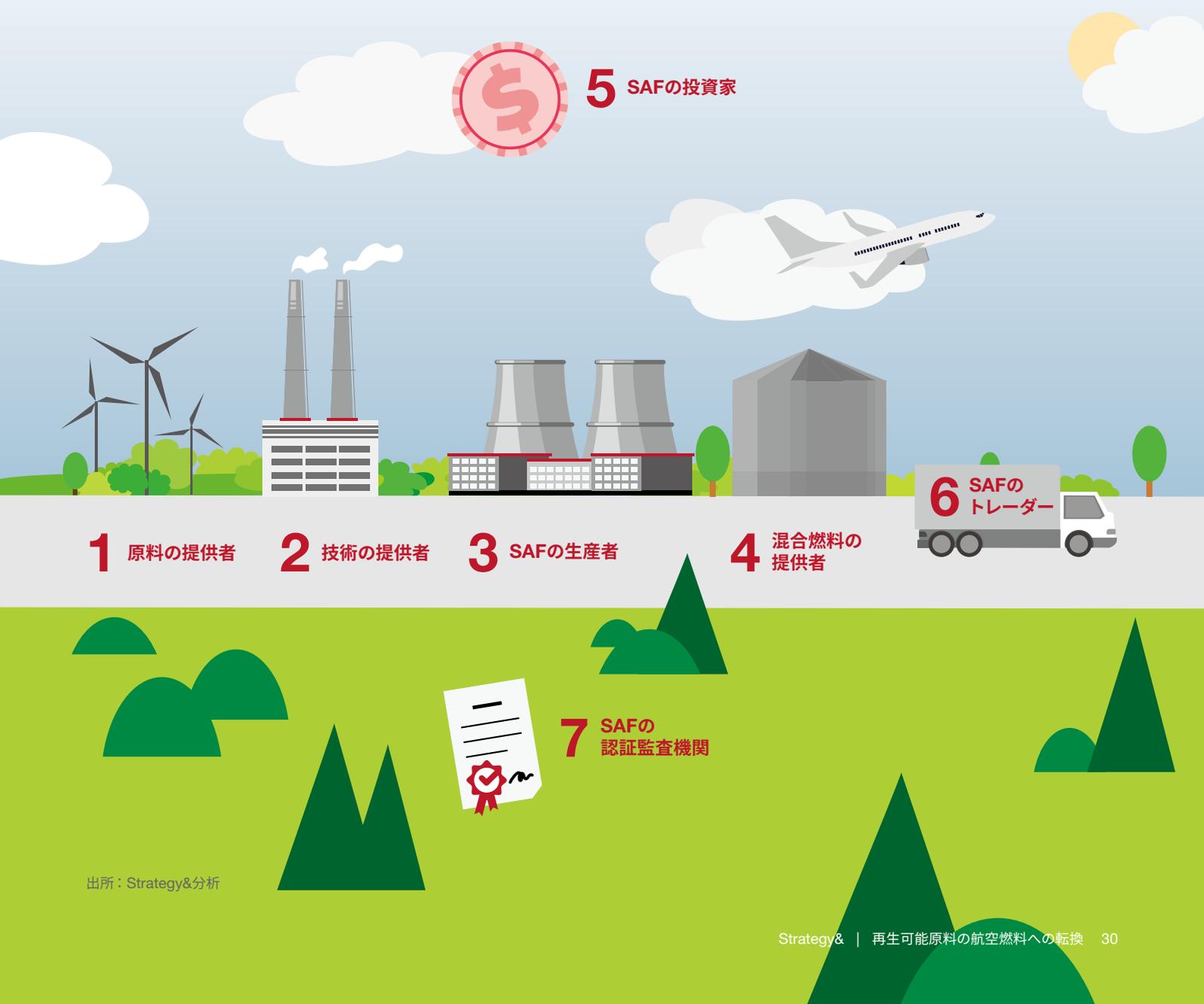


出所：Strategy&分析

SAF市場の発展を支えるビジネス・アーキタイプ（原型）

SAF市場の発展を促すためには、業界の全てのステークホルダーによる積極的かつ協働的な取り組みが不可欠だ。そのためには、持続性と自立性を備えた以下のようなSAFのビジネス・アーキタイプ（原型）を特定・構築し、個々のアーキタイプが連携していくことが求められる。

SAFのビジネス・アーキタイプ



以下に挙げるようなSAFの商業的な役割、またビジネス・アーキタイプ（原型）の進化が、今後ますます重要になってくると考えられる。これらのビジネス・アーキタイプは、1つの企業が複数の役割を担うことができる。

1. 原料の提供者

HEFAによるSAF生産では、原料コストが全体の50～60%を占め、最大のコスト要因である。それぞれの原料源は小規模であることが一般的のため、複数の原料源からバイオ廃棄物を集めて前処理を行い、燃料生産者に安定的に供給できる原料提供者は、業界で重要な役割を担い、大きな収益を上げることができる。

PtLによるSAF生産では、十分な量の再生可能電力や水素、再生可能CO₂を手頃な価格で入手できなければならない。最初の工程となるのは再生可能電力の大規模生産で、これがPtL生産の主なコスト要因である。再生可能電力の生産においては、可能な限り長い全負荷運転時間（再生可能電力の生産施設が最大容量で発電できる年間の時間数）を確保する必要がある。次の工程は、合成を促進するための主要素である水素の生産である。水素はローカルで生産（つまり、PtL生産施設のなるべく近くで生産）できることが合理的で、それにより水素の輸送および貯蔵にかかる大きなコストを回避できる。

最善のシナリオでは、電力および水素の生産施設を炭素回収施設と地理的に連携させることが望ましい。3つの原料全てをできるだけ近くで調達できれば、大きなメリットを生むことができる。

2. 技術の提供者

SAFのバリューチェーン全体で重要なもう1つのビジネス・アーキタイプは、技術の提供者である。伝統的なエンジニアリング企業が、FT法などのSAF生産プロセスに用いる設備やプラント、あるいは電解槽の製造を手がけるようになる場合と、革新的なスタートアップが技術提供者になる場合が考えられる。

技術提供は単なるプロセスではなく、そこには設備の整備も含まれ、しかも将来的な大規模生産に備える必要がある。従って、設備メーカーおよびインテグレーターはどのような技術が必要になるかを事前に把握し、早い段階でその拡張性の検証を行っておく必要がある。生産技術の進化に伴い、最終的には生産にかかるコストと時間の両方が著しく軽減されるとみられ、化石燃料のケロシンよりもSAFのほうが大きな競争力を持つようになることが期待される。



3.

SAFの生産者

次のビジネス・アーキタイプは、SAFのバリューチェーンで最も重要な役割を担うSAFの生産者である。現在のところ、実績のある石油・ガス生産者のほか、先に紹介したNesteやSpark e-FuelsのようなスタートアップがSAF市場に参入している。SAFの生産者は、SAF生産技術の実現可能性を検証しなければならないほか、商用化に向けた拡張のポテンシャルも実証しなければならない。

このビジネス・アーキタイプは、最も大きな投資を強いられる可能性がある。従って、実績のある企業にアドバンテージがあると言える。既存の設備をSAF生産用に改修・拡張できれば、生産拠点の新設と比べて投資総額を低く抑えられるからである。

SAFの生産者は、生産プロセスそのものの他にも、（化石燃料の場合と同様に）燃料を最終目的地まで輸送する役割も担う。

これらのコストを考えると、投資家の役割、スタートアップに対する助成金、実績のある企業による既存の設備を活用したSAFの生産支援といったことも、極めて重要な要素となる。

4.

混合燃料の提供者

ニートSAF（混合前の状態のSAF）を生産し、空港に輸送した後は、混合SAFの提供者というビジネス・アーキタイプが重要な役割を担う。

SAFの生産工程では、ニートSAFを化石燃料と混合する必要がある（現在は最大50%までの混合が認められている）。ニートSAFは、混合可能な燃料として燃料提供者のもとに送られる。

SAF燃料の提供者には、空港での物理的なSAFのフローに留意すること、またSAFの置き換え目標に準拠することが求められる。

5.

SAFの投資家

SAFのサプライチェーン拡大には、生産施設の整備やその他の開発事業のための大規模な資本支出が不可欠である。従ってSAF市場には、銀行やベンチャーキャピタル、その他の投資家にとって大きなビジネスの機会がある。

6.

SAFのトレーダー

SAFとその原料の生産・調達サイドの先、つまりSAFエコシステムの商業サイドには、また別のビジネス・アーキタイプが存在する。SAFのトレーダーである。市場において仲介者の役割を果たすSAFトレーダーにも大きなビジネスの機会がある。SAFトレーダーは、オフテイク契約などにおいて膨大な量のSAFを購入するための資本力と交渉力のほか、価格リスクをコントロールする能力が求められる（SAFの価格は現在、化石ケロシンの3~5倍）。

SAFトレーダーが購入した大量のSAFは、GHG排出量削減を目指すクライアント企業に再販売される。より成熟した市場が構築された暁には、SAFトレーダーはいわゆるコモディティ・トレーダーとして、先物取引によって価格変動のリスクをヘッジする、あるいはポジションを保有し、投機によって利ざやを増やすといったことを行う場合もあるだろう。

このようにSAFトレーダーは、SAFのエコシステムで重要な役割を果たすことができる。第一に、大量のSAFのオフテイク契約において、生産施設の整備を進めるSAF生産者が必要とする投資保証を提供できる。第二に、供給量に限りがあるSAFを確実に購入したいが、独力では交渉力が不足しているクライアントに最適な購入ルートを提供し、さらにGHG排出量の削減も支援できる。第三に、市場の流動性を促すことで、市場の拡大を後押しすることができる。

SAFそのものの供給を確保する以外にも、SAFトレーダーはSAFクレジットの取引によって、クライアントのGHG排出削減目標の達成をサポートする必要がある。ただし、現時点においてSAFクレジット取引の標準的な枠組みがないことが課題になる可能性があり、SAFトレーダーを目指すのであれば、この点に注視しておくことが重要である。このことは、次のビジネス・アーキタイプにも当てはまる。

7.

SAFの認証監査機関

SAFクレジットの有効性を確保し、GHGの排出削減目標の達成に向けた適切な手法として定着させるためには、持続可能性に関する一定の基準を満たす必要がある。そこでは、それを監査する専門機関の存在が欠かせない。

同時に、SAFクレジットのフローを正しく追跡し、二重計上（ある企業がクレジットとして計上したGHG排出削減量を、別の企業も計上すること）を防ぐ必要もある。

こうした監査機関の設立と運営、技術的な支援制度の策定という2つの取り組みにもビジネスの機会がある。

SAFのオフテイカー

SAF市場においてさまざまなビジネス・アーキタイプが誕生する中、SAFのオフテイカーの役割もまた重要である。SAFのオフテイカーとは、航空会社やその利用者など、SAFを購入または消費することでGHG排出量削減に寄与する組織や人を指す。SAFのオフテイカーにとって、SAFの利用はビジネスの一要素というよりも、もはや必須の要件だと言える。

つまり、SAFのオフテイカーはSAFの需要を高め、市場の発展を下支えし、ひいてはサプライチェーン全体でビジネスの機会を生み出すという意味で、エコシステムの中で重要な役割を担っているということだ。

まとめ

SAFは現在、航空業界におけるGHG排出量削減に貢献する主な手法の1つとして広く認識されるようになってきている。SAFの任意市場の活性化によって需要が確実に増加し、規制の重要性が高まっているとはいえ、その供給量は今のところ長期的な需要を満たせるほど十分ではない。私たちの調査でも、規制や市場に関する不確定要素がある中で大規模な投資が求められている事実や、さらなる技術開発の必要性、原料の不足、社会的認知の低さといったさまざまな要因が、SAFの生産拡大を妨げていることが明らかになった。

今回の調査結果をもとに、将来に向けてエコシステムの全てのステークホルダーが連携しながら、対処していかねばならない5つのアクションを提言したい。

1



投資

実証施設およびプラント開発プロジェクトへの投資によって、SAF技術を使った航空燃料の大量生産が実現可能であることを実証する。

2



原料の多様化

原料の供給量や価格の変動による影響を軽減する。

3



財務リスクの回避

大規模な投資に伴う財務リスクを回避する。

4



規制の明確化

各種の規制を明確化して、エコシステムを構成するステークホルダーにSAF市場の健全性を示す。

5



SAFに対する理解の促進

SAFのメリットに対するクライアント企業の理解を高めることで、新たな投資を呼び込む。



今後取り組まなければならない課題の規模を考えると、SAFの普及拡大は単独の企業だけで実現できるテーマではないことは明らかであり、業界全体が連携しながら、ステークホルダーがそれぞれの役割を果たしていかなければならない。とはいえ、SAFの需給ギャップは当面なくなることを考えると、SAFの生産事業者は適切な時期に市場に参入することで健全な収益を上げ、新たなビジネスモデルを構築していけるだろう。SAFへのエネルギー転換を実現し、それを持続していくためには、健全な利益構造を基盤とした共通のビジョンと国際的な協働が不可欠である。

このような複雑な状況において、1つだけ確かなことがある。それは、気候変動はそれを食い止めようとする私たち人間の努力に対して寛容ではないということだ。残された時間の中でSAFのポテンシャルから最大限の成果を生み出すためにも、私たちは今すぐに連携して具体的なアクションを起こさなければならない。

出所

- I IEA (2021)
- II IATA (2023)、DfT (2023)、Reuters (2023)、Nikkei Asia (2023)
- III Neste (2023)
- IV WEF (2022)
- V H2Global Stiftung (2023)
- VI Volvo (2023)
- VII IEA (2021)
- IX APECエネルギー作業部会 (2021)

Strategy&

Strategy&は、他社にはないユニークな特長を持つグローバルな戦略コンサルティングチームであり、クライアントの戦略的な意思決定と変革を通じた成果の実現に向けて、ニーズに応じたテイラーメイドな支援を行います。私たちはPwCの一員として日々、戦略的視点から考え抜いた、クライアントにとって最適な解を提供しています。圧倒的な先見力と、具体性の高いノウハウ、テクノロジー、そしてグローバルな規模を融合し、クライアントがこれまで以上に変革力に富んだ、即座に実行に移せる戦略を策定できるよう支援しています。

グローバルなプロフェッショナルサービスネットワークに属する戦略コンサルティング部門として随一の規模を誇るStrategy&は、実現性の高い戦略策定のケイパビリティをPwCの最前線のチームに提供することで、クライアントが目指すべき方向と、そこに向かうための方法の選択肢や実現の道筋を提示することを可能にしています。

その結果、私たちの戦略プロセスは、可能性を最大化できる強力なものであると同時に、確実に成果を上げられる実践的なものにもなっています。“Strategy, made real.”——即座に実行でき将来にも効果をもたらす“Practical Strategy”を、私たちが構築します。

www.strategyand.pwc.com/jp

本報告書は、PwCメンバーファームが2023年に発行した『Sustainable aviation fuel study 2023』を翻訳したものです。翻訳には正確を期しておりますが、英語版と解釈の相違がある場合は、英語版に依拠してください。

電子版はこちらからダウンロードできます。

<https://www.strategyand.pwc.com/jp/ja/publications/report.html>

オリジナル（英語版）はこちらをご覧ください。

<https://www.strategyand.pwc.com/de/en/industries/aerospace-defense/sustainable-aviation-fuel.html>

日本語版発刊年月：2024年3月



最新情報を常に把握しよう。－
最新のStrategy&のインサイト
や業界動向は、こちらをご覧ください。