

次世代航空機での温暖化ガス対策の最新動向

◆航空会社による出張時のCO₂排出削減プログラムが始動

2022年4月、全日本空輸（ANA）は出張でANAを利用する法人向けに、出張時のCO₂排出量の削減に貢献したことを示すプログラム「SAF Flight Initiative」（図1）の運用を開始したことを公表した。政府の50年カーボンニュートラル（CN）宣言に合わせ、50年までにCNの実現を宣言している企業が多くなっている。このプログラムは持続可能な航空燃料SAF(Sustainable Aviation Fuel)によってANAが削減したCO₂の量を、参加法人が支払った金額に応じて従業員の出張時に排出したCO₂に割り当て、減らすものだ。貨物事業者向けは21年10月から先行して開始済みだ。同様のプログラムはエールフランスKLMが実施し、日本企業では堀場製作所やナブテスコが参加を公表している。ANAのプログラムには、三井倉庫、伊藤忠商事、野村ホールディングス、運輸総合研究所が参加を表明している。

GHG プロトコルに基づく CO ₂ 削減プログラム		
		
	 コーポレート・プログラム	 カargo・プログラム
参加方法	法人契約を締結	
参加証明 認証	第三者機関の認証を受けた CO ₂ 削減証書を発行	
対象・用途	従業員の出張等による CO ₂ 排出を実質的に削減(Scope3 のカテゴリ-6)	事業のバリューチェーンにおける輸送・配送(上流・下流)による CO ₂ 排出を実質的に削減(Scope3 のカテゴリ-4、9)
その他 ご活用方法	SAF Flight Initiative のパートナーとして弊社媒体での社名、コーポレートシンボル等の提供	

図1 ANAのSAF Flight Initiativeプログラム 出典；ANA

◆企業などは本業だけではなく、物流や出張などでも排出削減が求められる

企業はCNの前提となる排出CO₂量としては、自らの排出量だけでなく、事業活動に関係するあらゆる排出を合計した排出量を公表するように求められ、これをサプライチェーン排出量という。Scope1と2は自社活動で排出する量を示すが、Scope3には上流、下流での物流や従業員の出張、通勤が含まれる（表1）。

表1 Scope3のカテゴリと該当する活動例 出典；環境省などの資料を元にARC作成

Scope3カテゴリ	該当する活動（例）
1 購入した製品・サービス	原材料の調達、パッケージングの外部委託、消耗品の調達
2 資本財	生産設備の増設（複数年にわたり建設・製造されている場合には、建設・製造が終了した最終年に計上）
3 Scope1,2に含まれない燃料及びエネルギー活動	調達している燃料の上流工程（採掘、精製等） 調達している電力の上流工程（発電に使用する燃料の採掘、精製等）
4 輸送、配送（上流）	調達物流、横持物流、出荷物流（自社が荷主）
5 事業から出る廃棄物	廃棄物（有価のものは除く）の自社以外での輸送、処理
6 出張	従業員の出張
7 雇用者の通勤	従業員の通勤
8 リース物流（上流）	リース使用している倉庫の運用時
9 輸送、配送（下流）	出荷後、所有権移転後の物流
10～14省略	
15 投資	株式投資、債券投資、プロジェクトファイナンスなどの運用
その他（任意）	従業員や消費者の日常生活

出張や通勤に関しては、各交通手段によって排出されるCO₂量の原単位は大きく違う（図2）。このうち最も大きいものは自家用車であり、次が航空機だ。地方では通勤に車を使う場合も多く、地方に拠点がある場合今後問題になる可能性はある。鉄道の方がCO₂排出量は少ないため、出

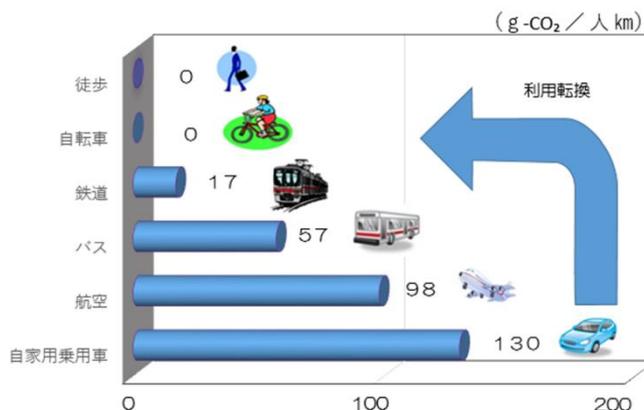


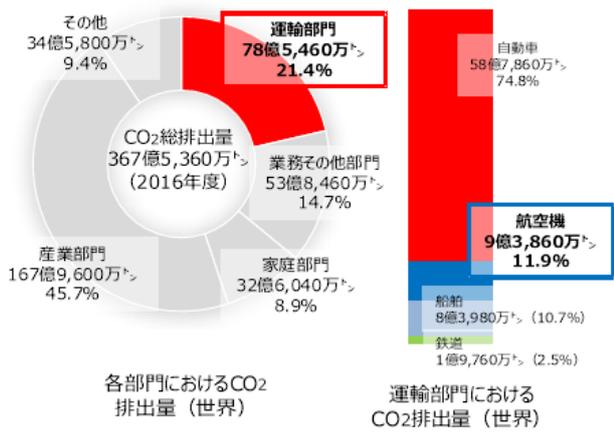
図2 各交通手段におけるCO₂排出原単位 出典；国土交通省

張ではなるべく鉄道を使用することが望ましいが、海外出張や長距離では航空機に依存することになる。そのため航空機のCO₂排出量の削減が注目されている。

◆航空機から排出のCO₂の比率は小さいが、欧州を中心に対策が進む

航空機のCO₂排出原単位は大きいですが、運輸部門の中の比率で見れば必ずしも大きくはない（図3）。世界では運輸部門でのCO₂排出の比率は16年で21.4%だが、乗用車やバス、貨物車など自動車に由来するものは運行台数も大きいため、排出量は運輸部門のうちのおよそ75%で圧倒的に多い。これらに対して現在は純電動化やハイブリッド、水素燃料電池などで対応しようとしている。航空機からの排出量は、運輸部門全体のうちでは12%程度に過ぎないが、それでも欧州を中心に急速に規制や対策が進んでいるので今後国際標準になる可能性がある。

フランスでは航空機で2時間半の国内線で、オランダでは500km以内で航空機の運航を禁止する動きが顕在化している（表2）。また、フランスはフランス発のすべての航空機に対しSAF使用割合を1%に引き上げることを検討しており、外国籍の航空機にも適用される。ICAO（国際民間航空機関）は、21年以降航空機からの温室効果ガスを19年の排出量を超えない目標を設定するなど、世界的に航空機への規制が進んでいる。



全世界でのCO₂排出量：367億5360万ト
 運輸部門：21.4%（うち 航空分野11.9%）
 図3 運輸部門におけるCO₂排出量
 出典；経済産業省

表2 航空機のCO₂削減に対する欧州の取り組み 出典；各資料を元にARC作成

国名	対策の内容
フランス	2時間半圏内の国内線の運航を禁止する計画。フランス発のすべての航空便に対し、SAF搭載量を1%以上に引き上げることを検討（当初は22年中だったが延期か）
英国	2035年までに温室効果ガス排出量を78%減とする方針発表。国際線航空機からの排出量も削減の見通し。
ドイツ	国内線とEU域内の航空税引き上げ。ルフトハンザ航空が鉄道とコードシェア連携。
オランダ	KLMオランダ航空が500km以下の近距離路線を減便（アムステルダム/ブリュッセルなど）。高速鉄道と連携。
EU	「欧州グリーンディール」は、航空機に搭載するSAFの割合を2025年までに2%、2030年までに5%に増やすことを目標に。

◆航空機のCO₂排出削減の手法はSAFが中心に、水素や電動化の動きも

航空機におけるCO₂発生削減の手法としては、SAFを使用する方法が当面は主流になるが、水素を燃焼させる方法や電動化の動きもある（表3）。SAFや水素燃焼は基本的には全ての航空機に適用できるが、水素燃焼は実用化には時間がかかり、電動化は大型機への適応は難しいとみられている（表4）。

表3 航空機のCO₂削減の手法 出典：各資料を元にARC作成

	内容	現状および課題	今後の取り組み
バイオ系燃料 (SAF)	バイオベース原料からエタノールやCO ₂ を得て、合成したHCを燃焼させることで推進力を得る。	・FT合成やエタノールHC化は触媒最適化など必要。藻類培養について大量増殖が必要。 ・現状は大量供給難しい。	・大規模実証によりコストダウン、大量生産技術の確立が必要。(コスト目標は2030年既存燃料並み100円台/L)
合成燃料 (SAF)	回収したCO ₂ と水素から合成したHCを燃焼させることで推進力を得る。	・現状燃料同等品であるためエンジンの改良不要。商用化にむけたプロセスは未確立。	・既存技術(逆シフト反応でCO ₂ にしてFT合成)の高効率化など技術開発。 ・革新技術(共電解や直接合成)の完成。 ・2030年までに製造技術を確立し、2040年までの商用化を目指す。
水素燃料	ジェット燃料の代わりに水素を燃焼させることで推進力を得る。燃料電池搭載の可能性も。	・エアバスは2035年に水素航空機の市場投入を目指すと公表。 ・日本がリードする軽量化、水素貯蔵タンク、エンジン効率化などの技術を生かせる可能性。	・2030年に向け、航空機向けコア技術(水素貯蔵タンク、エンジンなど)の開発促進。 ・2035年以降の水素航空機の本格導入に備えたコア技術の航空機への応用を目指し、空港での水素インフラの整備。
電動化	蓄電した電力を使用してプロペラまたはファン回転させて推進力を得る。途中段階ではハイブリッド化も。(世界市場は2030-50年で約2兆ドル見込む)	・航空機向け蓄電池、ハイブリッドシステム、インバーターなど航空機向けに性能向上が必要。 ・機体をより軽量化する材料技術が必要。	・2030年までにハイブリッド電動化技術完成。 ・2050年までにコンピューター機での全電動化、リージョナルから小型機でのハイブリッド電動化技術に向けた基盤技術確立、蓄電池やモーターなどの技術開発。

表4 航空機のCO₂削減の手法の適応範囲 出典：各資料を元にARC作成

機体タイプ	客席数	代表的な機種例	バイオ燃料	合成燃料	バッテリー電動	水素
コンピューター	<19	ドルニエ228	○	○	○	○
リージョナル	20-80	DHC-8、CRJ700				
小型機	81-165	B737、A320			×	
中型機	165-250	B787、A350				
大型機	>250	B777、A330				
超大型機	>400	B747、A380				
有利な点			機体やエンジンの大きな変更なし		フライト中の温暖化ガス排出無し	温暖化ガス削減に大きな効果
不利な点			原料供給に限り、CO ₂ 削減に限り	CO ₂ 削減に限り	充電やバッテリー交換のためのインフラ整備	水素充填のためのインフラ整備

◆COから炭化水素油製造の技術は古いが、最新技術開発も進む

ジェット燃料は通常は原油精製時に石油製品のひとつとして生産されるもので、主成分はC₁₂~15の灯油成分とほぼ同じである。SAFはさまざまなルートで生産されるが(図4)、COと水素から炭化水素(HC)を製造するフィッシャー・トロプ

シュ（FT）反応による合成方法が広く使用される。

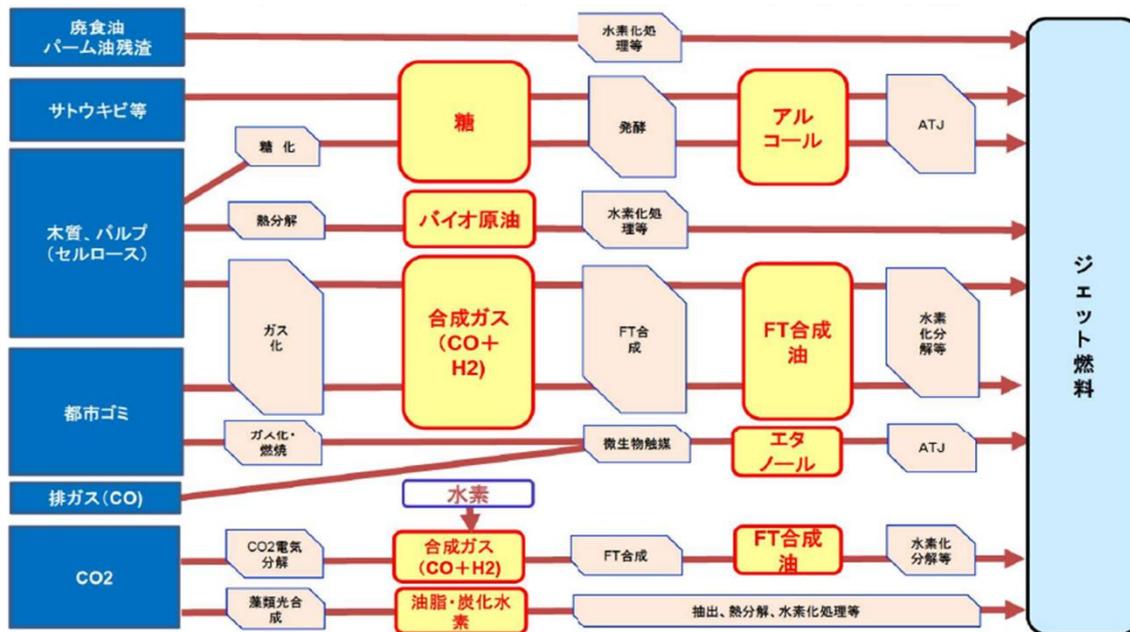


図4 SAFのさまざまな合成ルート 出典；国土交通省

FT合成は古くから知られた合成反応だ。日本では戦前航空燃料が不足したために京都帝国大学が石炭から得られるCOとH₂から、安価で入手が容易な鉄系触媒を使用して「人造石油」を合成する手法を完成していた。北海道で試運転が行われたが間もなく終戦になった。これらの資料は13年に日本化学会が化学遺産に選定した。そのほかに触媒にはルテニウムやコバルトが用いられる（表5）。

FT合成については、新たな触媒開発が進んでいる。従来の触媒ではSiO₂の表面にCoを担持する構造のため比較的短鎖のHCの収率が高くなるが、SiO₂のコアで囲みカプセル型触媒にすることで、SiO₂の細孔の中でHCが長く成長でき、長鎖HC、ジェット燃料成分の収率が増える（図5）。

東京大学の研究者は20年、今後電池用電極などで需要が増え、高騰が予想されるコバルトを使用しない反応系を開発した。金属の代わりにホウ素を用いるもので、今の

表5 FT合成に使用される触媒 出典；各資料を元にARC作

触媒	反応温度	長所	欠点
コバルト (Co) 系	230°C程度	最も広く使用されている。反応条件と液体HC生産性のバランスが良好。	Coは資源量が少なく偏在している。最近ではリチウムイオン電池の電極用での需要が増え、価格が高騰している。
鉄 (Fe) 系	320~350°C	安価な鉄を使用	反応温度が高く、C-C連鎖成長には不利で軽質HC生産比率が多く、ジェット燃料に向くHCの生産性が低い。
ルテニウム (Ru) 系	260°C程度	FT反応に対する活性が高い。Ru担持量は少なく、担体を生かした触媒設計がしやすい。	Ruの価格が高価で、商業生産には向かない。

ところは水素ではなく強力なヒドリド還元剤を使用するが、室温条件でHCの生成を確認したとのことだ。

CO₂を原料に用いる場合には通常はシフト反応により一旦COに還元してから使用するが、20年12月、オックスフォード大学のグループが直接ジェット燃料に変換する新たな鉄系触媒を開発、Nature Communicationsに発表した。クエン酸と水素およびFe-Mn-K系触媒の混合物を350℃まで加熱し、そこにCO₂を加えることによりジェットエンジンで使える液体HCを生成するというプロセスだ。CO₂からHCへの転化率は38.2%、生成する全HCの中の47.8%が長鎖HCであり、COやCH₄など短鎖HCの生成は5~10%に抑えることができた。現状はまだ実験スケールであり、今後スケールアップが必要だ。

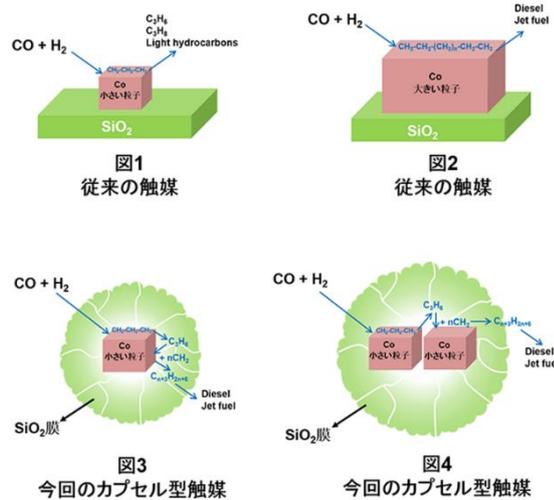


図5 新規な触媒構造 出典：富山大

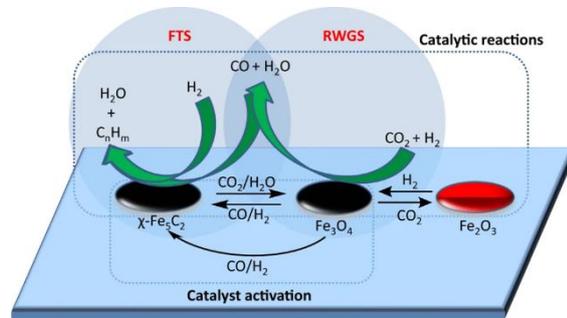


図6 CO₂の直接変換の触媒模式図 出典：オックスフォード大学

◆エタノールからジェット燃料を合成するプロセスも実用化へ

図4ではCOを原料とする合成ルートのほか、エタノールを出発原料にしてジェット燃料を合成するルート（ATJ）も示されている。これはサトウキビ廃棄物や木材など非食性原料から発酵により製造したエタノールをエチレンに変換し、二量化工程（Dimerization）を繰り返し、炭素数が10から15程度のHCを得る手法である（図7）。最初の工程はエタノールの脱水工程によるエチレンの生産

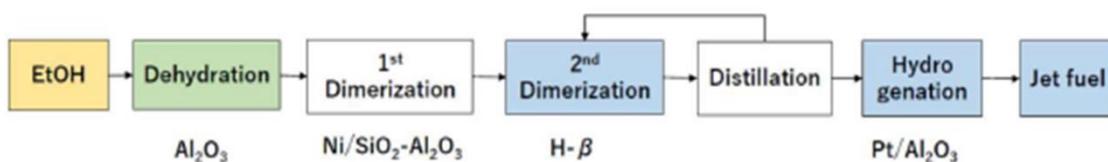


図7 エタノールからジェット燃料の合成 出典：触媒学会懇談会ニュース

で、 Al_2O_3 を用いる。1段目の二量化はNi触媒を用い、2段目の二量化はH-β型ゼオライトが用いられ、最後に水素化を行う。海外では、米国のLanzaTechは古細菌（生物の主要な3系統の内の一つ）を用いた発酵法によりCOからエタノールを製造する技術を開発し、ジェット燃料を合成する企業LanzaJetを設立した。

出光興産は22年4月、「最先端のATJプロセス技術を用いたATJ実証設備の開発と展開」がNEDOプロジェクトとして採択されたことを明らかにした。原料となるバイオエタノールの国内外からの調達（年間18万kL）と、世界初の10万kL級ATJの製造商業機の開発に取り組み、25年度に同社千葉事業所内にSAF製造装置を建設し、26年から供給を開始する計画だ。製造コストは100円台/Lを目指す。

◆ユーグレナは使用済み食用油と微細藻類により燃料を合成、飛行試験に成功

ユーグレナは微細藻類の光合成によりCO₂からジェット燃料を合成する技術を完成した（図8）。21年6月にはホンダジェットがユーグレナの燃料を使用した試験飛行を行い、また22年3月にはフジドリームエアラインがエンブラエル機での試験飛行に成功した。しかし現状は1万円/Lほどのコストで、今後生産規模拡大でコストダウンを目指す。

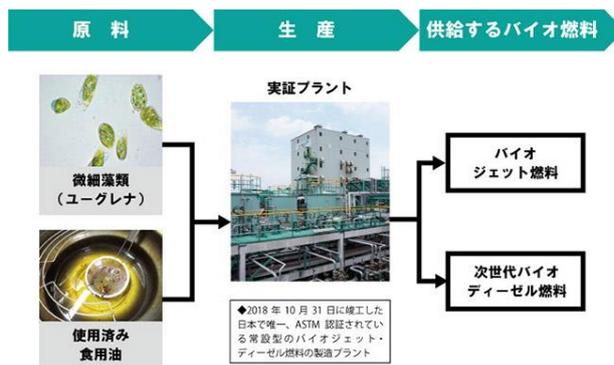


図8 廃油と微細藻類による燃料合成
出典；ユーグレナ

◆SAF開発は欧米が中心に進むが、日本でも開発が進む

ANAがSAFの調達をフィンランドのNesteから行うなど、欧米企業が製造開発でリードしている。今後欧州でSAFの需要が増えると日本に回る量が無くなる可能性もある。将来、日本でSAFの給油ができないと欧米の飛行機は来航しなくなることも考えられる。22年3月、日揮ホールディングス、レボインターナショナル、全日本空輸、日本航空の幹事企業4社共同で、国産のSAFの商用化および普及・拡大に取り組む有志団体「ACT FOR SKY」を設立したと発表した。コストについても大幅に下げる必要があり、200円/L程度が目標になりそうだ。電動化や水素エンジンについても今後開発が進みそうで、電池や機体の大幅な軽量化、水素の燃焼技術などに関してイノベーションが必要になるだろう。 【松田英樹】