

航空分野の長期的な排出削減対策見通し

令和4年3月



一般財団法人 運輸総合研究所

航空分野の長期的な排出削減対策見通し

航空分野の長期的な排出削減対策見通し	0
(1) 検討の概要.....	1
(2) 将来の CO2 排出パスのベースケースの推計	5
(3) 航空技術・運航技術による削減の推計	14
(4) SAF(Sustainable Aviation Fuels)による削減の推計.....	39
(5) 航空技術・運航技術・SAF 導入後の CO2 排出量の将来推計	44
(6) 総括	48

(1) 検討の概要

1) 検討の目的

国際民間航空機関(ICAO; International Civil Aviation Organization)では、2019 年の ICAO 総会において、国際航空分野における長期目標(LTAG; Long-Term global Aspirational Goal for international aviation)の実現可能性調査を行い、2022 年の ICAO 総会に報告することが決議された。これを受け、2019 年 12 月の ICAO 航空環境保全委員会(CAEP: Committee on Aviation Environmental Protection)関連会合において、我が国から、あらゆる削減施策の検証によるボトムアップの目標設定及びタスクフォース設置を提案し、我が国が議長を務めるタスクグループ(CAEP LTAG-TG)において、長期目標に関する議論が進められてきたところ。

本検討では、2022 年秋の ICAO 総会における長期目標の合意を見据えて、ICAO での議論や諸外国の動きなどを踏まえつつ、中長期的な我が国の航空分野の気候変動対策の効果を分析することを目的として、将来の我が国の航空分野の CO2 排出量に関する推計を行った。

具体的な対策としては、CAEP LTAG-TG において検討の対象としている航空技術(Technology)、運航技術(Operation)及び SAF 等(Fuel)とし、将来の我が国の航空分野の需要見通しを踏まえて 2070 年に至るまでの CO2 排出量の長期的な見通しを推計するとともに、今後の課題として検討すべき事項を考察した。

2) 推計の全体像

本推計の対象範囲は、本邦エアラインの国内線・国際線とする。参考に CAEP LTAG-TG と関連する先行事例における推計対象範囲との比較を表 1 に記す。

表 1 先行事例の推計対象範囲の比較

本推計	国内線(日本):本邦エアライン(定期便のみ) 国際線(日本):本邦エアラインのみ(外国発含む)
ICAO(CAEP LTAG-TG)	世界全体の国際線
ATAG Waypoint2050 ¹	世界全体の国内線・国際線
United States 2021 Aviation Climate Action Plan ²	国内線(米国):米国エアライン+外国エアライン(定期便以外を含む) 国際線(米国):米国エアライン(外国発含む)※米国の空港からの排出も対象に含む。

推計の全体像は図 1 に示すとおりである。

無対策の場合の将来の CO₂ 排出パス(ベースケース)(本資料(2))については、個別機種やフライトの積み上げによるデータ分析に基づく分析が可能となるよう、本邦エアラインの保有する機種別の燃料消費量の推計を行い、全機種について積み上げるとともに、先行研究を踏まえて将来の需要見通しを設定することにより、推計を行った。

ここで、機種別の燃料消費量については、我が国におけるフライト別の燃料消費量に係るサンプルデータから機種別の燃料消費原単位の推計式を導出し、OAG 時刻表³のフライト別データ(最大離陸重量及び空港間の距離)を用いて、全フライトについて積み上げることにより推計した。

次に、航空技術・運航技術による削減の推計(本資料(3))については、上記の機種別の燃料消費量に対して、航空技術の導入に係る 3 つのケース(A.機材コンポーネントの更新ケース、B.新コンセプトの導入+電動化ケース、C.B.に加えてナローボディ機への水素航空機導入を追加するケース)と運航技術の導入に係る 1 つのケースを想定し、各ケースの排出削減率を織り込んだ燃料消費量・CO₂ 排出量の将来パスを推計した。

次に、SAF(Sustainable Aviation Fuels)による削減の推計(本資料(4))については、別途取り纏めた国内における SAF の供給ポテンシャル3ケースを想定し、CO₂ 削減の将来パスの推計を行った。

以上を踏まえ、航空技術・運航技術・SAF 導入後の CO₂ 排出量の将来推計(本資料(5))をとりまとめるとともに、総括(本資料(6))として今後の課題をとりまとめた。

¹ https://aviationbenefits.org/media/167417/w2050_v2021_27sept_full.pdf

² https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2021-11/Aviation_Climate_Action_Plan.pdf

³ 世界全体を対象とする民間企業が作成する航空会社のスケジュール・データベース。ICAO において環境影響等の分析を目的にモデルを構築している CAEP Modelling and Databases Group(MDG)においても参照されている。

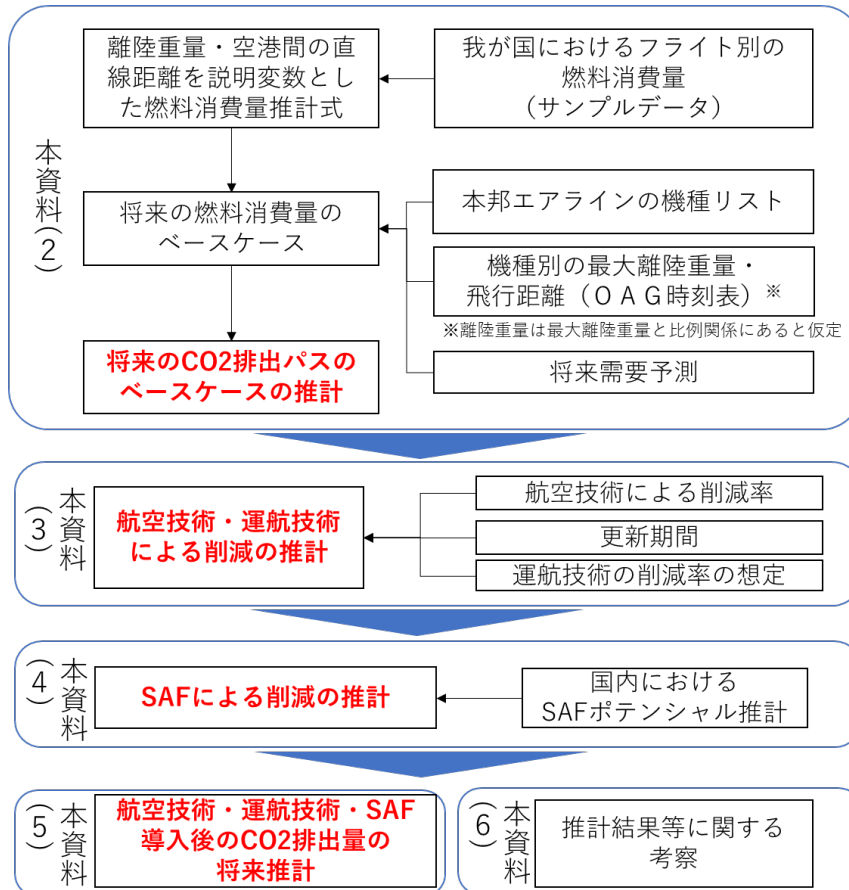
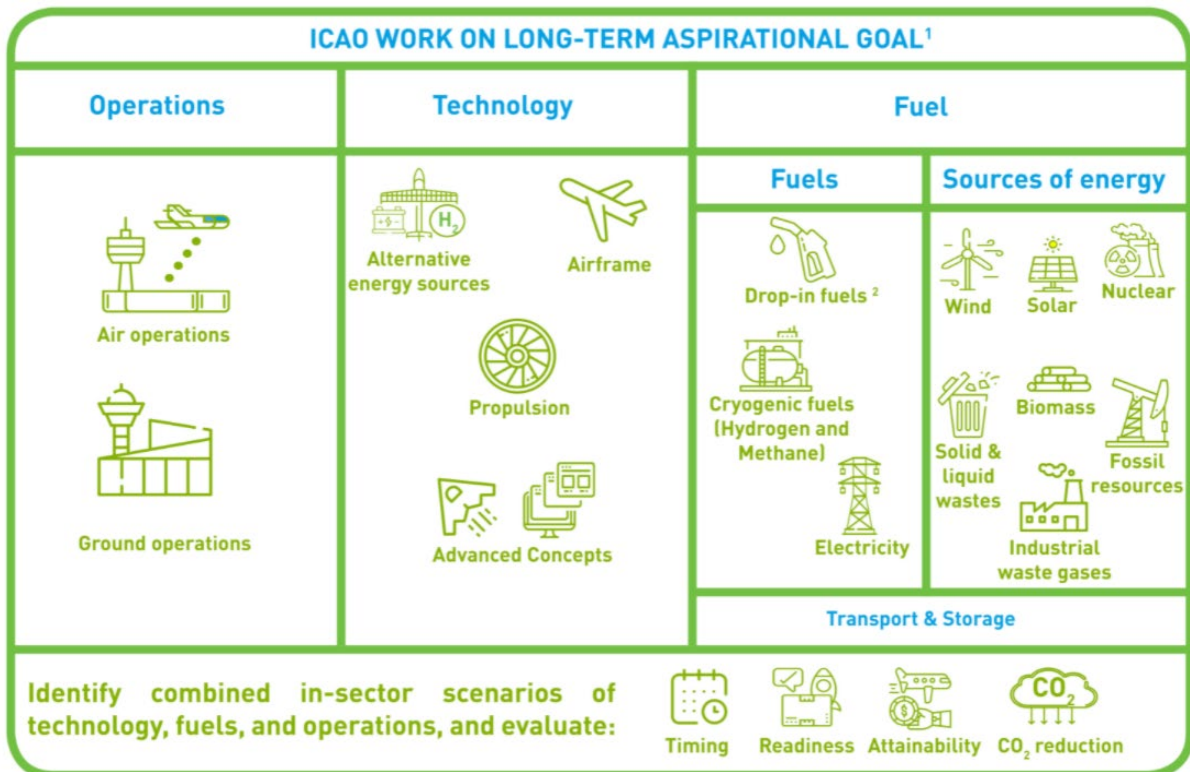


図 1 我が国航空分野の CO2 排出削減パス推計の全体像

<参考1> ICAO における Long Term Aspirational Goal (LTAG) の検討

2019年の第40回 ICAO 総会において、国際航空分野の CO₂ 排出削減に係る長期目標 (LTAG) の実現可能性調査を実施し、2022年の第41回総会に報告することが決議されたことを受け、日本政府からの提案に基づき、LTAG を検討するタスクグループ LTAG-TG が ICAO 航空環境保全委員会 (Committee on Aviation Environmental Protection: CAEP) の下部組織として設置された (議長国: 日本)。

CAEP LTAG-TG では、下図に示すとおり、Technology (航空技術)、Operation (運航技術) 及び Fuel (燃料) の3分野の対策 (in-sector) に基づき、ボトムアップ・アプローチにより長期目標の検討が行われた。検討結果は、2022年2月の CAEP 第12回会合で審議され、2022年秋の ICAO 総会において公開が予定されている。



¹ This work should identify and evaluate existing, foreseen, and innovative in-sector measures in technology, fuels and operations, and their enablers, including information of probable costs. This will assist in identifying gaps, and information and expertise needed, in order to complete a thorough assessment of all in sector CO₂ reductions for international aviation. This should include timing, readiness, attainability and the quantity of CO₂ reduction possible, based on a feasible roll out into the aviation sector.
² Sustainable Aviation Fuels (SAF), Low Carbon Aviation Fuels (LCAF), E-Fuels. Icons made by Freepik from www.flaticon.com

図 ICAO LTAG における検討の範囲

(2) 将来の CO2 排出パスのベースケースの推計

1) 推計方針

本邦エアラインによる将来の CO2 排出パスを推計するに当たっては、特に航空技術の導入による CO2 削減量を機種別に推計することを可能とするため、機種別の CO2 排出量を推計し、これを本邦エアラインが保有する機種について積み上げることにより行うこととした。

そのため、2)において、機種別の燃料消費原単位の推計式を検討し、3)において、この推計式に基づき、本邦エアラインが保有する機種の燃料消費量の総量を推計した。4)において、推計式及び先行研究による需要の将来予測データに基づいて、本邦エアラインの機種別の将来の燃料消費量及び CO2 排出量の推計を行った。

2)2019年のサンプルデータに基づき、機種別の燃料消費原単位(Y)を被説明変数とし、離陸重量(TOW)と空港間の直線距離(DIST)を説明変数とする関係式を重回帰分析により推計する。

$$Y = TOW^{-0.112} \times DIST^{-0.28} \times e^{0.424}$$



3)世界全体のフライトの詳細データが含まれるデータベースである OAG 時刻表データ等を用いて、本邦エアラインの保有する機種を整理するとともに、機種aの燃料消費原単位 Y_a を推計する。

推計した Y_a に最大離陸重量(MTOW)と空港間の直線距離(DIST)を乗じ、全フライトについて積み上げることにより、機種aの年間燃料消費量 $FUEL_a$ を推計する。

※離陸重量(TOW)と最大離陸重量(MTOW)は、比例関係にあると仮定。

推計した年間燃料消費量 $FUEL_a$ を全ての機種について積み上げることにより、本邦エアラインの年間燃料消費量 FUEL を推計する。



4)上記推計式及び先行研究による需要の将来予測データにより、本邦エアラインの機種別の将来の燃料消費量及び CO2 排出量を推計する。

図 2 将来の CO2 排出パスのベースケースの推計手順

2) 機種別の燃料消費原単位の推計式の導出

a. 推計方針

燃料消費原単位 Y [$\ell/t \cdot km$] は、航空機の重量 [t] 及び飛行距離 [km] (特に燃費効率が良いとされる巡航フェーズの割合) の影響を受けると考えられることから、これらのパラメータの関数として説明できると仮定する。ANA 及び JAL から提供を受けたサンプルデータ⁴においては、各フライトにおける離陸重量・空港間の直線距離当たりの燃料消費量(燃料消費原単位) Y [$\ell/t \cdot km$]、離陸重量 TOW [t] (Take-Off Weight)、空港間の直線距離 $DIST$ [km] が既知であることから、 TOW 及び $DIST$ を説明変数、 Y を被説明変数とする下記の重回帰式を設定し、直近の 2019 年のサンプルデータを用いて、 α 、 β 及び γ を推定する。

$$Y = TOW^{\alpha} \times DIST^{\beta} \times \gamma \quad (\text{式 1})$$

Y [$\ell/t \cdot km$]: 離陸重量・空港間の直線距離当たりの燃料消費量(燃料消費原単位)

TOW [t]: 離陸重量

$DIST$ [km]: 空港間の直線距離

b. 燃料消費原単位の推計式の導出

式 1 の両辺の自然対数を取ることで、式 2 を導出し、2019 年のフライト別のサンプルデータ Y 、 TOW 及び $DIST$ を用いて、 α 、 β 及び γ の重回帰を行った。結果は式 3 のとおりとなり、これが本邦エアラインの機種に共通する燃料消費原単位の推計式を表す。t 値によるといづれの係数も 5% 有意水準⁵にある。

$$\ln Y = \alpha \ln TOW + \beta \ln DIST + \ln \gamma \quad (\text{式 2})$$

$$Y = TOW^{-0.112} \times DIST^{-0.28} \times e^{0.424} \quad (\text{式 3})$$

回帰統計		係数	標準誤差	t-値	下限 95%	上限 95%	
重相関 R	0.71	$\ln \gamma$	0.424	0.012	35.4	0.401	0.448
重決定 R ²	0.5	α	-0.112	0.00204	-55.2	-0.117	-0.109
補正 R ²	0.5	β	-0.28	0.00135	-207.6	-0.283	-0.278
標準誤差	0.23						
観測数	54823						

なお、脚注 4 のとおり、本推計で用いたサンプルデータは特定の空港間のデータに限られること、また、リージョナル機、ターボプロップ機等の小規模の航空機については、サンプルデータに含まれていない点に留意する必要がある。

⁴ ANA 及び JAL/ の 13 の代表空港間のフライトを対象とし、発着空港、使用機材及び燃料消費量のデータを含む。ここで、代表空港とは、新千歳/ 苫小牧・羽田・成田・中部国際・伊丹・関西国際・福岡・那覇の 8 国内空港、ホノルル・ワシントン・ロサンゼルス・シカゴ・シドニーの 5 海外空港を指す。

⁵ 自由度無限大の t 値の 5% 有意水準は 1.96 であり、t 値の絶対値はいずれも 5% 有意水準を超えている。

3) 本邦エアラインの機種別の燃料消費量の推計

本分析では、2)で導出した推計式を踏まえ、世界全体のフライトの詳細データが含まれるデータベースである OAG 時刻表データ等を用いて、本邦エアラインの保有する機種を整理するとともに、機種別の燃料消費原単位 Y [$\ell/t \cdot km$] (離陸重量・空港間の直線距離当たりの燃料消費量)を推計した。

ある機種 a の燃料消費原単位 Y_a については、下記のとおり、フライト毎の平均値をとることとする。

$$Y_a = \overline{TOW_a^{-0.112}} \times \overline{DIST_a^{-0.28}} \times e^{0.424} \quad (\text{式 4})$$

ここで、 Y_a を推計するためには、フライト別の TOW_a [t] (離陸重量) 及び $DIST_a$ [km] (空港間の直線距離) のデータが必要となるが、参照した OAG 時刻表には、 $DIST_a$ [km] (空港間の直線距離) データは含まれているものの、 TOW_a [t] (離陸重量) は得られない。そこで、 TOW は、OAG 時刻表に含まれる最大離陸重量 $MTOW$ (Maximum Take-Off Weight) [t] との間で式 (5) の関係式が成り立つと仮定した。

$$TOW = k_{tow} \times MTOW \quad (\text{式 5})$$

ここで、 k_{tow} は国際線・国内線別に設定される係数と仮定した⁶。

つまり、機種 a の燃料消費原単位 Y_a [$\ell/t \cdot km$] (離陸重量・空港間の直線距離当たりの燃料消費量) は、式 6 を用いて推計することができる。

$$\begin{aligned} Y_a &= \overline{(k_{tow} \times MTOW_a)^{-0.112}} \times \overline{DIST_a^{-0.28}} \times e^{0.424} \\ &= (k_{tow}^{-0.112} \times \overline{MTOW_a^{-0.112}} \times e^{0.424}) \times \overline{DIST_a^{-0.28}} \quad (\text{式 6}) \end{aligned}$$

ここで、 $MTOW_a$ は機種 a の最大離陸重量、

$$\overline{DIST_a} = \sum_{\text{フライト}} DIST_a / \text{年間フライト回数}_a$$

上記の式を本邦エアラインが保有する全ての機種に対して適用し、また、(3)1)において機種別に機材更新による削減量を推計することが可能となるよう、各国航空局やエアラインのウェブサイト情報⁷を元にとりまとめられたデータを用いて、本邦エアラインが保有する機体の登録番号 (NH01XX, JA01XX など)、機種及びデリバリーがあった年、各エアラインのウェブサイトの情報から特定した旅客輸送 (国内・国際)・貨物輸送の別等の情報を含む機種の一覧を作成した (集計用分類 26 種、機数 589 機)。なお、上記データと OAG 時刻表データの突合に当たっては、それぞれのデータで機種名は相互に異なるため、Airbus、Boeing 等メーカー名、機体型番、導入時期、飛行区間、機齢、席構成、国内際/貨物機体等から総合的に判断した。

⁶ 最大離陸重量に対する実際の離陸重量の割合は国際線と国内線で傾向が異なることが想定されることから国際/国内別に設定するものとした。

⁷ <https://www.planespotters.net/>

続いて、式 6 によって推計した機種 a の燃料消費原単位の平均値 Y_a [$\ell/t \cdot km$] (離陸重量・空港間の直線距離当たりの燃料消費量)を用いて、機種 a の年間燃料消費量 $FUEL_a$ を推計した。

$$\begin{aligned}
 FUEL_a &= \sum_{\text{フライト}} (Y_a \times TOW_a \times DIST_a) \\
 &= (k_{tow}^{-0.112} \times MTOW_a^{-0.112} \times e^{0.424}) \times \overline{DIST_a}^{-0.28} \\
 &\quad \times \sum_{\text{フライト}} ((k_{tow} \times MTOW_a) \times DIST_a) \\
 &= k_{tow}^{0.888} \times MTOW_a^{0.888} \times e^{0.424} \times \overline{DIST_a}^{-0.28} \times \sum_{\text{フライト}} DIST_a \\
 &= k_{tow}^{0.888} \times MTOW_a^{0.888} \times e^{0.424} \times \overline{DIST_a}^{-0.28} \times \overline{DIST_a} \times \text{年間フライト回数}a \\
 &= k \times (e^{0.424} \times MTOW_a^{0.888} \times \overline{DIST_a}^{-0.72} \times \text{年間フライト回数}a) \quad (\text{式 7}) \\
 &\quad \text{ここで、} k = k_{tow}^{0.888} \text{、国際線・国内線別に設定される係数}
 \end{aligned}$$

最後に、式7を用いて算出した機種別の年間燃料消費量を積み上げることにより、本邦エアライン全体の年間燃料消費量 FUEL は下記のとおり計算できる。

$$\begin{aligned}
 FUEL &= \sum_{\text{機種}} FUEL_a \\
 &= k \times \sum_{\text{機種}} (e^{0.424} \times MTOW_a^{0.888} \times \overline{DIST_a}^{-0.72} \times \text{年間フライト回数}a) \\
 &\quad \text{ここで、} k = k_{tow}^{0.888} \text{、国際線・国内線別に設定される係数}
 \end{aligned}$$

ここで、① $\sum_{\text{機種}} (e^{0.424} \times MTOW_a^{0.888} \times \overline{DIST_a}^{-0.72} \times \text{年間フライト回数}a)$ を集計し、②航空輸送統計に基づく本邦エアラインの燃料消費量(国内については定期便)(FUEL)との比較を行うことにより、 k を推計した。

表 2 2019 年航空輸送統計のデータ実績値の比較

	国内線 ^{※1}	国際線 ^{※2}
①推計式による合計値	9,192,435kL	12,259,811kL
②航空輸送統計年報(令和元年(2019年))	4,233,431kL	6,126,497kL
③ $k = ②/①$	0.46	0.50
(参考) k_{tow} ^{※3}	0.42	0.46

※1 今回収集した機種はいずれもジェット燃料を消費する定期便向けの機種であるため、航空輸送統計からは定期・ジェット燃料の消費量を参照した。

※2 貨物分については特定した機種が全てワイドボディ機であったため国際線に含めて集計している。

※3 離陸重量と最大離陸重量の比率を表す。実際の運航時の比率よりも小さな値となっていると考えられるが、想定したモデルの誤差が影響していると考えられる。

機種リスト及び推計された燃料消費原単位を表 3 に示す。

表 3 機種リスト(2021年時点)

内際	機種名*	機数	機材タイプ	推計燃料消費原単位(l/離陸重量 t・km)
国際 旅客	Airbus A320-271N	11	NB	0.090
	Airbus A321neo	3	NB	0.090
	Airbus A380-841	3	WB	0.051
	Boeing 737-846(WL)	9	NB	0.089
	Boeing 767-346ER	6	WB	0.068
	Boeing 767-346ER(WL)	9	WB	0.068
	Boeing 767-381ER(WL)	9	WB	0.068
	Boeing 777-246(ER)	6	WB	0.064
	Boeing 777-300ER	6	WB	0.048
	Boeing 777-346ER	13	WB	0.048
	Boeing 777-381ER	9	WB	0.048
	Boeing 777-9	3	WB	0.048
	Boeing 787-10 Dreamliner	3	WB	0.060
	Boeing 787-8 Dreamliner	49	WB	0.062
	Boeing 787-9 Dreamliner	64	WB	0.055
国内 旅客	Airbus A320-200	61	NB	0.112
	Airbus A320-214(WL)	3	NB	0.112
	Airbus A320neo	5	NB	0.112
	Airbus A321-211(WL)	4	NB	0.117
	Airbus A321-272N	20	NB	0.117
	Airbus A350-941	12	WB	0.095
	ATR 42	9	TP	0.188
	ATR 42-600	2	TP	0.188
	ATR 72	2	TP	0.169
	Boeing 737-700	8	NB	0.112
	Boeing 737-800	48	NB	0.112
	Boeing 737-81D(WL)	4	NB	0.112
	Boeing 737-846(WL)	39	NB	0.112
	Boeing 737-86N(WL)	9	NB	0.112
	Boeing 737-881(WL)	36	NB	0.112
	Boeing 737-8AL(WL)	4	NB	0.112
	Boeing 767-300	4	WB	0.101
	Boeing 767-346	2	WB	0.101
	Boeing 767-346ER	14	WB	0.101
	Boeing 767-381ER	11	WB	0.101
	Boeing 777-281	3	WB	0.095
	Boeing 777-281(ER)	10	WB	0.095
	Boeing 777-381	5	WB	0.088
	Boeing 787-8 Dreamliner	14	WB	0.099
	Boeing 787-9 Dreamliner	2	WB	0.099
	Bombardier CRJ-700	10	RJ	0.131
	Bombardier DHC-8-400	5	TP	0.162
	De Havilland Canada DHC-8-201Q Dash 8	2	TP	0.162
	De Havilland Canada DHC-8-202Q Dash 8	1	TP	0.162
	Embraer ERJ-170	3	RJ	0.135
	Embraer ERJ-175	13	RJ	0.135
	Saab 340B+	2	TP	0.201
	貨物	Boeing 747-8KZF	8	WB
Boeing 767-316F(WL)		1	WB	0.079
Boeing 767-381ER(BCF)		5	WB	0.079
Boeing 767-381F		3	WB	0.079
Boeing 777-F		2	WB	0.079

※各国航空局やエアラインのウェブサイト情報(<https://www.planespotters.net/>)

当該推計結果を用いて、本邦エアライン燃料消費量の機材タイプ別のシェアを集計したところ、図 3 のとおり。

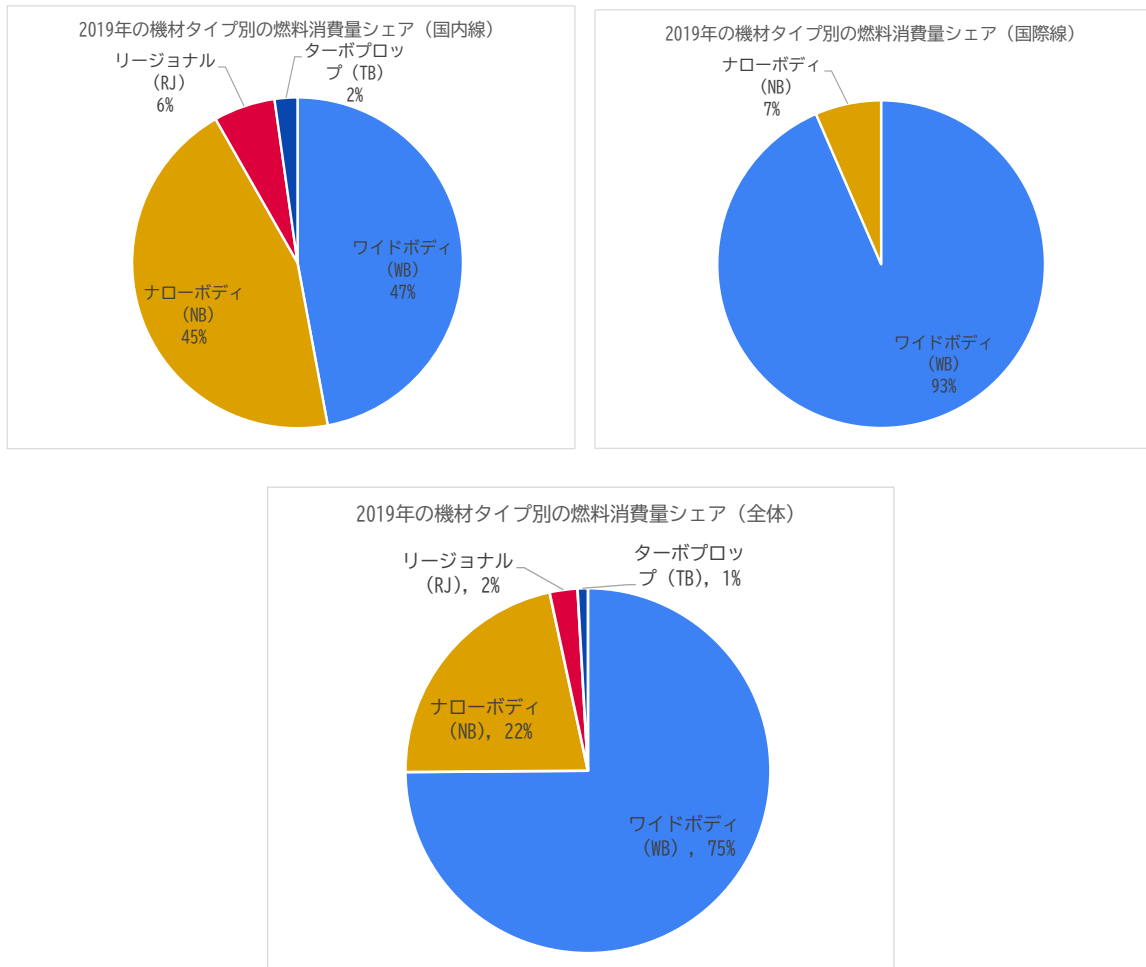


図 3 本邦エアライン燃料消費量の機材タイプ別シェア(推計)(左図:国内線、右図:国際線、下図:内際計)

なお、世界全体の国際線、国内線の両者を対象として推計している ATAG Waypoint2050 では、CO2 排出量の機材タイプ別のシェアは表 4 のとおり示している。

表 4 世界全体の CO2 排出量の機材タイプ別シェア(国内線+国際線)

機材タイプ	CO2 排出シェア
Commuter(9-19 席)	1%以下
Regional(50-100 席)	3%以下
Short haul(100-150 席)	24%以下
Medium haul(100-250 席)	43%以下
Long haul(250 席以上)	30%以下

出所)ATAG Waypoint2050

4) 将来推計

a. 推計の条件

ア) 需要見通し

旅客に関しては、コロナ禍の影響が見込まれる 2021～2023 年は国内線・国際線共に IATA が示したシナリオ⁸に基づき需要を設定した。

2024 年以降の国内線の需要は①2030 年までは、交通政策審議会航空分科会第 15 回基本政策部会⁹の資料 3 における需要予測を元とした数値とし、②2031 年以降は需要を横ばいとした。

2024 年以降の国際線の需要は、①2030 年までは、第 2 回「航空機運航分野における CO2 削減に関する検討会」¹⁰での 2030 年 SAF 導入量試算のために用いられている前提条件¹¹を用い、②2031 年以降は、2050 年までの長期的な需要予測を行っている ATAG Waypoint2050 の中位シナリオ (central scenario)において適用されている 2050 年までの年平均成長率3.1%を適用する。

貨物に関しては、機材タイプから推測すると国際線が大宗を占めるものと考えられ、旅客ほどコロナ禍の影響を受けるものではないと考えられることから、2019 年から ATAG Waypoint2050 の年平均成長率 3.1%を適用することとした。本推計において用いた需要の増加率をまとめると表 5 のとおり。これらに基づき 2019 年の需要を1とした場合の需要の将来予測を図 4 に記す。

表 5 本推計における需要の想定のみまとめ

	2021～2023	2024～2030	2031～2070
旅客(国内)	IATA, COVID-19 Outlook for air travel in the next 5 years	交通政策審議会航空分科会第 15 回基本政策部会に基づく想定	横ばい
旅客(国際)		第 2 回「航空機運航分野における CO2 削減に関する検討会」に基づく想定	3.1%/年 (ATAG Waypoint2050 の中位シナリオ)
貨物	3.1%/年 (ATAG Waypoint2050 の中位シナリオ)		

⁸ IATA「COVID-19 Outlook for air travel in the next 5 years」(2020.5.13)

<https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/covid-19-outlook-for-air-travel-in-the-next-5-years/>

⁹ 国土交通省、https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/kouku01_sg_000152.html, 平成 26 年 4 月開催

¹⁰ 国土交通省航空局、「航空分野における CO2 削減に向けたアプローチ毎の取組の方向性」、令和3年6月 と同様

¹¹ ICAO による North Asia 地域(日本が含まれる。)と他のエリアとの往來の各成長率(推計)を OAG 時刻表(2019 年)の日本発着の方面別席キロシェアに対して適用

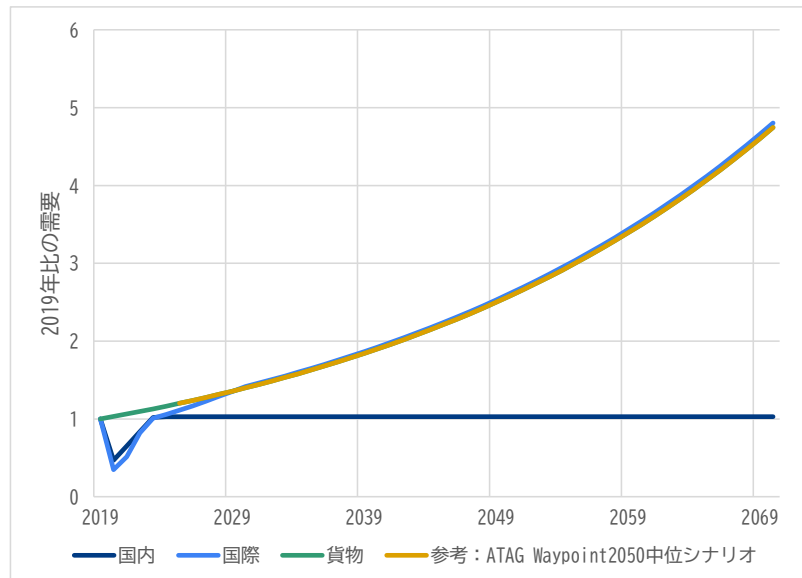


図4 需要の将来想定(国内・国際・貨物)(2019年比)

イ) 推計対象期間

本検討における推計対象期間は、CAEP LTAG-TG の検討に合わせ、2070 年までを対象とするものとした¹²。

ウ) 機材タイプのシェアの変化

(3)にて後述するとおり、今回の推計では、航空技術による削減効果を機材タイプ別に設定しているが、将来の機材タイプ別の構成比率(図3参照)に関しては、2070年にかけて変化がないものと仮定して分析を行っている。

b. 推計結果

以上の条件で推計したベースケースにおける燃料消費量推移は図5に、CO₂ 排出パスは図6に示すとおりである。2070年の排出量は、国内線旅客機で約1,100万t-CO₂、国際線旅客機で約6,500万t-CO₂、貨物機で約680万t-CO₂と推計される。

なお、CO₂ 排出量の計算には、ジェット燃料の比重0.8kg/L及び CORSIA における排出係数3.16g-CO₂/kgを用いて、2.53g-CO₂/Lを用いて換算を行った。

¹² [https://www.icao.int/Meetings/2021-ICAO-LTAG-GLADS/Documents/LTAG-GLADs Day-1 2-Progress-of-ICAO-work-on-LTAG.pdf](https://www.icao.int/Meetings/2021-ICAO-LTAG-GLADS/Documents/LTAG-GLADs%20Day-1%20Progress-of-ICAO-work-on-LTAG.pdf)

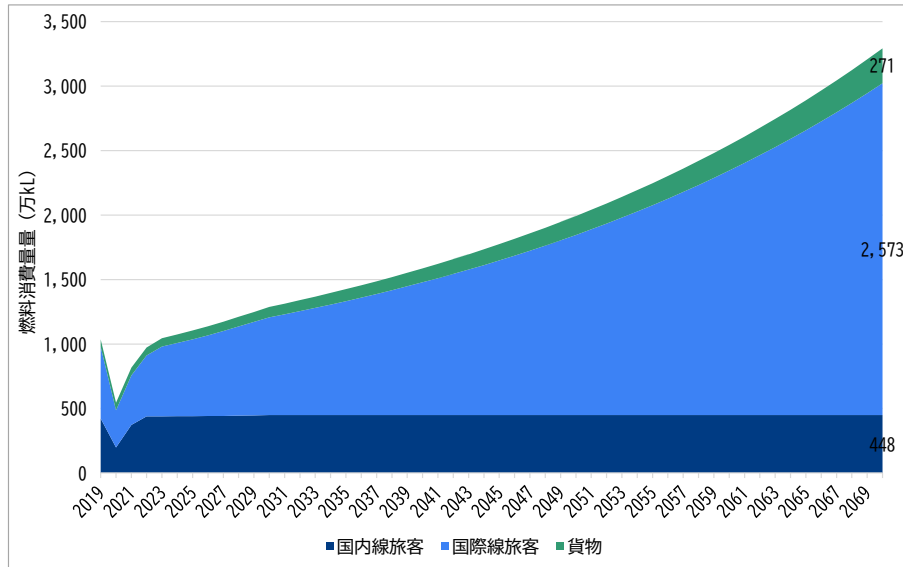


図5 ベースケースの燃料消費量推移

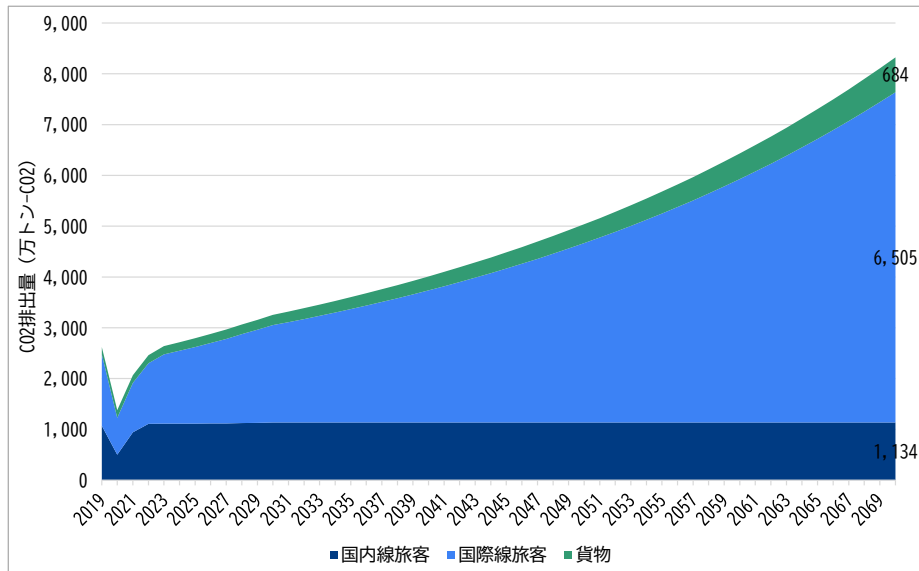


図6 ベースケースのCO2 排出パス

(3) 航空技術・運航技術による削減の推計

1) 航空技術(機材更新)による削減効果

a. 航空技術(機材更新)の分析の考え方

航空技術(機材更新)による削減効果については、ATAG Waypoint2050を参考に、下記の 3 つのケースを対象とし推計を行った。

- A. 機材コンポーネントの更新ケース
- B. 新コンセプトの導入+電動化ケース
- C. B.に加えてナローボディ機への水素航空機導入を追加するケース

機材更新による削減効果を推計するため、下記のとおり、ア)更新後の機材の選定、イ)更新期間及びウ)更新による燃費改善削減率を検討する。

表 6 先行事例との比較

本推計	対応する ATAG Waypoint2050のシナリオ
A. 機材コンポーネントの更新ケース	T2:更新後の航空機は現在のモデルに従うが、ターボファンエンジン推進システムを備えた標準的な「tube and wing」形態も発展形を備える。従来の液体ジェット燃料又は SAF を使用する。
B. 新コンセプトの導入+電動化ケース	T4:新しい構造要素(strut-braced wing、blended wing body、オープンローターエンジン等)を組み込んだ航空機の革新的な形態の航空機。加えて、バッテリーシステム(100 席未満)及びハイブリッドシステム(より大型の航空機用)を使用した電気推進にシフト(2035-2040 から市場に投入)。
C. B.に加えてナローボディ機への水素航空機導入を追加するケース	T5:ナローボディ機(100~200 席)のゼロ・エミッション航空機(水素の可能性)への革新的なシフト。小型航空機の電動化及びより大型の航空機のハイブリッド化を想定。このシフトは、2030 年から発生し、より大型の航空機については T4 シナリオよりも早く発生する。

出所)ATAGWaypoint2050 https://aviationbenefits.org/media/167417/w2050_v2021_27sept_full.pdf

ア) 更新後の機材の選定

更新後の機材については、ターボプロップ機、リージョナル機、ナローボディ機及びワイドボディ機の 4 種類の機材タイプ(後述のボックスにおいて解説)に応じて、燃費改善の考え方を設定した。詳細な考え方は b に後述するが、各ケースにおいて導入することを想定した技術を総括すると表 7 のとおりである。シナリオごとに異なる部分を表の網掛けによって示す。

表7 各ケースにおいて導入することを想定した技術の総括

ケース	機材タイプ	2034年以前の更新	2049年以前の更新	2050年以降の更新
A. 機材コンポーネントの更新ケース		機材コンポーネント ¹³ の更新	機材コンポーネントの更新	機材コンポーネントの更新
B. 新コンセプトの導入+電動化ケース	ワイドボディ機 (WB)	機材コンポーネントの更新	マイルド・ハイブリッド化・新コンセプト機材に移行	マイルド・ハイブリッド化・新コンセプト機材に移行
	ナローボディ機 (NB)		ハイブリッド航空機化 全体電動化	全体電動化
	リージョナル機 (RJ)			
	ターボプロップ機 (TB)			
C. B. に加えてナローボディ機への水素航空機導入を追加するケース	ワイドボディ機 (WB)	機材コンポーネントの更新	マイルド・ハイブリッド化・新コンセプト機材に移行	マイルド・ハイブリッド化・新コンセプト機材に移行
	ナローボディ機 (NB)			全体水素航空機化
	リージョナル機 (RJ)		ハイブリッド航空機化	全体電動化
	ターボプロップ機 (TB)		全体電動化	

イ) 更新期間

各機材の更新期間は、2021年7月までに退役した本邦航空会社の使用機材845機のうち使用年数が世界平均に比べ短い(10年未満)機体を除く平均値を集計した結果を元に、表8のとおりを設定した。

表8 本推計における更新年の設定

機材タイプ		更新年
旅客機	ワイドボディ機 (WB)	19年
	ナローボディ機 (NB)	17年
	リージョナル機 (RJ)	13年
	ターボプロップ機 (TP)	17年
貨物機		17年

ウ) 更新年及び削減率の考え方

機材更新を行う場合には、更新時において、導入しようとする航空技術が成熟し、利用可能かどうかが必要な要素となる。

以下では、航空機の機材に関する技術開発動向として、2035年と2050年を1つのマイルストーンとして参照し、①2035年までの技術レベル、②2035年以降2050年までの技術レベル、③2050年以降の技術レベルの3種類を想定し、それぞれについて機材更新による一定の削減率を設定した。

つまり、機材更新が、2034年以前であれば、①の削減率を適用し、2035年以降2049年以前であれば②の削減率を適用し、2050年以降であれば、③の削減率を適用して計算を行った。

¹³ エンジン、機体を構成する材料、機体システム(アビオニクス系統等)、機体(主翼等)の形状

エ) 推計の流れ

ステップ1

機材の種類ごとに 2035 年、2050 年をマイルストーンとした期間別の削減率(3 通り)を設定(図 7 左側)

ステップ2

機材リストの機体年数のデータ(2021 年時点)を使用し、表 8 に示した更新年が経過した段階で最初の更新、その後表 8 で設定した年数が経過する毎に、該当する期間に応じた削減率を適用。(図 7 右側)

機材更新のマスター

機材の種類	機種の種類	①2035年 まで CO2排出 量比	②2050年 まで CO2排出 量比	③2050年 以降 CO2排出 量比
B777	WB	0.90	0.80	0.70
A320	NB	0.90	0.80	0.70
...				

機材リスト

機体識別 番号	機体種類	機体年数	更新年と対応するCO2排出量比		
JA01X X	B777	15	2025	2034	2053
JA02Y Y	A320	1	2037	2054	-
...					

図 7 機材更新の分析イメージ

<参考2>機材タイプ

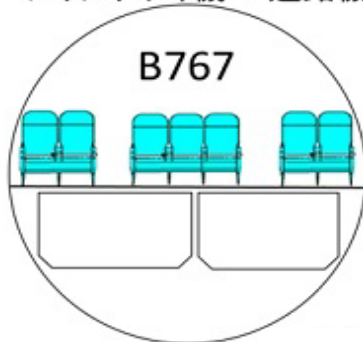
本分析において適用した機材タイプは以下の通りである。各分類について下表に記す。

表 機材タイプの解説

機材タイプ	説明	航空機の例	航続距離／座席数
ワイドボディ機 WB	客室に通路が2本ある機体	ボーイング767 エアバス 330	長／多
ナローボディ機 NB	客室に通路が1本ある機体	ボーイング737 エアバス320	↑
リージョナル機 RJ	座席数が100席前後の小型機体	エンブラエル170	↓
ターボプロップ機 TP	推進系がジェットエンジンではなく、プロペラが回転することにより推進する小型の機体	ATR42	短／少

ワイドボディ機とナローボディ機については、客室部分の断面によって分類されている。旅客機のうち通路が2つある旅客機をワイドボディ機、内部の通路が1つしかないものをナローボディ機と呼ぶ。

ワイドボディ機・2通路機



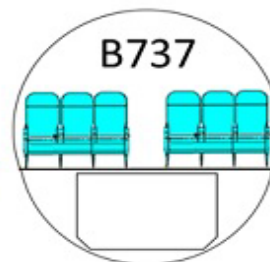
ワイドボディ機のイメージ



リージョナル機のイメージ



ナローボディ機・短通路機



ナローボディ機のイメージ



ターボプロップ機のイメージ



b. 航空技術の導入と削減効果の設定

ア) 機材コンポーネントの更新(ケース A.)

機材コンポーネントの更新とは、航空機の形態を現行のものから変更せず、エンジンをより効率的なものに変える、翼の先端を変更する等の機材更新を指す。このような機材更新による燃料消費削減効果(CO₂削減効果)については、2019年に発行された IATA Aircraft Technology Roadmap to 2050(以下「IATA 技術ロードマップ」という。) ¹⁴を参考に設定した。

表 9 に示すとおり、IATA 技術ロードマップの Table2 では、従来型の機材コンポーネントの更新による 1 世代前の航空機と比較した時の燃料消費量の削減率を示している。ケースAでは、これを参考に、機材コンポーネントの更新の際には、①エンジンの改良、②機体を構成する材料の改良、③機体システム(アビオニクス系統等)の改良及び④翼の形状の改良の 4 要素による削減率を設定することとした。

表 9 IATA 技術ロードマップにおける機材コンポーネントの更新による削減効果

Group	Concept	Type of Technology	Fuel Reduction Benefits
Aerodynamics	Variable Camber	Retrofit	1 to 2%
	Riblets	Retrofit	1%
	Raked Wingtip	Retrofit	3 to 6%
	Winglets	Retrofit	3 to 6%
Cabin	Lightweight Cabin Interior	Retrofit	1 to 5%
Material & Structure	Advanced Materials	Production Upgrade	1 to 3%
	Active Load Alleviation	Production Upgrade	1 to 5%
	Composite Primary Structures	Production Upgrade	1 to 3%
	Composite Secondary Structures	Production Upgrade	<1%
System	Adjustable Landing Gear	Production Upgrade	1 to 3%
	Taxi Bot	Retrofit	1 to 4%
	Advanced Fly-by-Wire	Production Upgrade	1 to 3%
	Structural Health Monitoring	Retrofit	1 to 4%
Advanced Engine Components	Fan Component Improvement	Production Upgrade	2 to 6%
	Very High BPR Fan	Production Upgrade	2 to 6%
	Advanced Combustor	Production Upgrade	5 to 10%

The numbers mentioned above are based on the IATA Technology Roadmap 2013 [22].

Table 2: List of retrofits and upgrades available for aircraft before 2030

出所)IATA 技術ロードマップ Table2
<https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/technology20roadmap20to20205020no20foreword.pdf>

表 9 に記載されている技術は、適用可能な技術のオプションを示したものであって、機材更新時に同時

¹⁴

<https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/technology20roadmap20to20205020no20foreword.pdf>

に適用できるものとそうではないものに分けられるため、以下の考え方に基づき、機材更新によって段階的に適用されていくと仮定して削減率を設定した。

① エンジンの改良

エンジンの燃焼効率を高めることにより、燃費改善が実現する。

Fan Component Improvement はエンジンのファン部分の構造材の改善、BPR はファンの形状、Advanced Combustor は燃焼器が各々改善の対象のため、各対策を同時に実施可能と考えられる。このため表 9 の数値を元に、以下の通り削減率を設定した。

- ・2034 年以前の更新:各対策による削減(下位)▲9%削減(100%-98%×98%×95%)
- ・2049 年以前の更新:▲15%(2034 年以前の更新と 2050 年以降の更新の中間値)
- ・2050 年以降の更新:各対策による削減(下位)▲20%削減(100%-94%×94%×90%)

② 機体を構成する材料の改良

機体の軽量化に資する材料を用いることで燃費改善につながる。

表 9 に記載の Material & Structure は、一次構造(Composite Primary Structures)二次構造(Composite Secondary Structures)に大きく分けられ、その他の項目はこれら両者に包含されるものと考えられる。新規の構造材の適用は、二次構造への適用の方が安易であるものと考えられるため、2034 年以前は二次構造、2049 年以前は一次構造へ適用するが下位の削減率、2050 年以降は一次構造へ対策を適用し高位の削減率が得られるものと想定した。

- ・2034 年以前の更新:二次構造への適用で▲1%削減
- ・2049 年以前の更新:一次構造への適用による削減(下位)で▲2%削減(100%-99%×99%)
- ・2050 年以降の更新:一次構造への適用による削減(上位)で▲4%削減(100%-99%×97%)

③ 機体システム(アビオニクス系統等)の改良

機体の操縦においてよりエネルギー(燃料から変換)を使用しないようなシステムを適用することで燃費改善につながる。

Adjustable Landing Gear(降着装置の改善)、Taxi Bot(エンジンを使用せず地上走行を行うもの)、Advanced Fly-by-wire(先進フライ・バイ・ワイヤの導入)による削減効果を想定した。なお、Structural health monitoring は、機材の故障をいち早く検知する技術であり、直接的には他の対策によって CO2 削減効果が生じるものであると考えられることから、この推計においては考慮していない。

- ・2034 年以前の更新:レトロフィット(既存機材の取付)により導入可能な Taxi Bot により▲2%(下限値▲1%と上限値▲4%の中央値を切捨)
- ・2049 年以前の更新:上記に加え Advanced Fly-by-wire を導入によりさらに▲2%(下限値▲1%と上限値▲3%の中央値)の効果を追加し▲4%(100%-98%×98%)
- ・2050 年以降の更新:上記に加え Adjustable Landing Gear を導入によりさらに▲2%(下

限值▲1%と上限値▲3%の中央値)の効果を追加し▲6%(100%-98%×98%×98%)

④ 機体(主翼等)の形状の改良

主翼等の形状に工夫を行い機体周りの空気の流れをスムーズにすることで燃費改善につながる。表 9 に記載の対策のうち、Winglets と Raked wingtip(共に翼の形状を改良する技術)は適用先が重複する点に留意が必要である(両者で想定されている削減率は同じ)。

対策の導入順序としては、Winglets が現状 B787 に既に導入されていることから最初に導入されることを想定し、次に Riblets(機体表面の抵抗を抑制する技術)は現在日本でも研究が進められている技術である。最後に導入可能であるとしている Variable Camber(可変キャンバー)の技術は、航空機の構造上の変更が大きいと、技術的に開発時間がかかり、機体の安全性の審査にも時間が必要と想定される。

- ・2034 年以前の更新 Winglets により▲4%(下限値▲3%と上限値▲6%の中央値を切捨)
- ・2049 年以前の更新:上記に加え Riblets を導入によりさらに▲1%の効果を追加し▲5%(100%-96%×99%)
- ・2050 年以降の更新:上記に加え Variable Camber を導入によりさらに▲1%(下限値▲1%と上限値▲2%の中央値を切捨)の効果を追加し▲6%(100%-96%×99%×99%)

以上より、機材更新によるCO2削減率を表 10 のとおり設定した。機材タイプによって変更はないと仮定し、ターボプロップ機、リージョナル機、ナローボディ機、ワイドボディ機の全てに同じ削減率を適用する。

表 10 機材コンポーネントの更新における各対策別の想定 CO2 削減率(2019 年比)

機体を構成する要素	機材コンポーネントの更新による CO2 削減率		
	2034 年以前に 機材更新が行われる場合	2049 年以前に 機材更新が行われる場合	2050 年以降に 機材更新が行われる場合
エンジン	▲9%	▲15%	▲20%
機体を構成する材料	▲1%	▲2%	▲4%
機体システム(アビオニクスシステム等)	▲2%	▲4%	▲6%
機体(主翼)の形状	▲4%	▲5%	▲6%
上記の集計	▲15%	▲24%	▲32%

機材コンポーネントの更新による燃料消費量及び CO2 排出量の削減量の推移は図 8 及び図 9 に記すとおり。

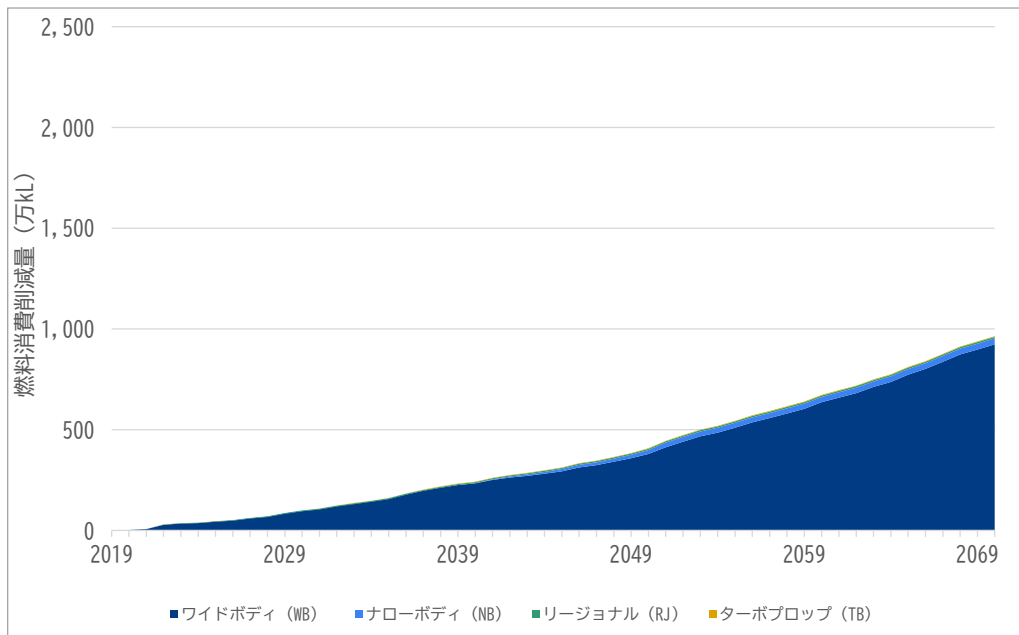


図 8 燃料消費削減量の推移(ケース A. 機材コンポーネント更新)

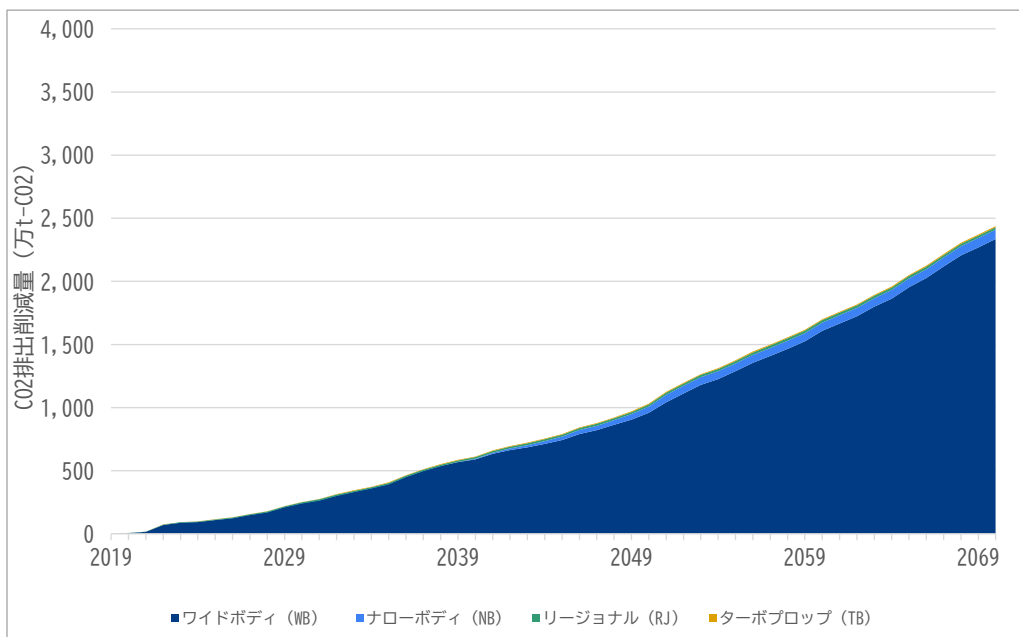


図 9 CO2 排出削減量の推移(ケース A. 機材コンポーネント更新)

<参考3> IATA 技術ロードマップにおける機材更新による燃費改善効果

1 世代前の航空機と比較した際の燃費改善効果は下記のとおり。リージョナルジェット機については 6~24%、ナローボディ機については 15~20%、ワイドボディ機については 14~25%の燃費改善効果があるとされている。

Aircraft Category	Aircraft	Type	Range	Fuel Efficiency Benefits per ASK (compared to predecessor)	EIS	Maximum Seat Capacity	Reference Aircraft
Regional Jet	Airbus A220-100	Single Aisle	5741 km	20% [17]	2015	125	
	Airbus A220-300	Single Aisle	6112 km	20% [17]	2016	160	
	Embraer E175-E2	Single Aisle	3815 km	6% [18]	2021	90	Embraer E175
	Embraer E190-E2	Single Aisle	5278 km	17% [18]	2018	114	Embraer E190
	Embraer E195-E2	Single Aisle	4815 km	24% [18]	2019	146	Embraer E195
Narrow-body	Boeing 737 MAX 7	Single Aisle	7130 km	20% [19]	2021	172	Boeing NG 737-700
	Boeing 737 MAX 8	Single Aisle	6570 km	20% [19]	2017	210	Boeing NG 737-800
	Boeing 737 MAX 9	Single Aisle	6570 km	20% [19]	2018	220	Boeing NG 737-900
	Boeing 737 MAX 10	Single Aisle	6110 km	20% [19]	2020	230	
	Boeing 737 MAX 200	Single Aisle	6570 km	16% [19]	2019	200	
	Airbus A319 neo*	Single Aisle	6950 km	15% [20]	2017	160	Airbus A319 ceo
	Airbus A320 neo*	Single Aisle	6500 km	15% [20]	2016	194	Airbus A320 ceo
	Airbus A321 neo*	Single Aisle	7400 km	15% [20]	2017	244	Airbus A321 ceo
	Airbus A321 LR	Single Aisle	7400 km	20% [20]	2018	240	Boeing 757-200W
Wide-body	Airbus A330-800 neo	Twin Aisle	13900 km	14% [21]	2019	406	Airbus A330-200
	Airbus A330-900 neo	Twin Aisle	12130 km	14% [21]	2018	440	Airbus A330-300
	Boeing 787-9	Twin Aisle	13620 km	20% [19]	2014	242	Boeing 767-300ER
	Boeing 787-10	Twin Aisle	11910 km	25% [19]	2018	330	Boeing 767-400ER
	Airbus A350 XWB-900	Twin Aisle	15000 km	25% [20]	2015	400	
	Airbus A350 XWB-1000	Twin Aisle	14750 km	25% [20]	2018	440	
	Boeing 777X-8	Twin Aisle	16110 km	20% [19]	2023	375	Boeing 777-200LR
	Boeing 777X-9	Twin Aisle	14075 km	20% [19]	2020	425	Boeing 777-300ER

*Airbus announced 20% saving in fuel burn per seat for the A320neo family by 2020 [20]

Table 1: List of recent and imminent aircraft (green: recently entered into service – blue: imminent)

イ) 新コンセプトの導入+電動化(ケース B.)

新コンセプトの導入とは、ア)に記載したような機材のコンポーネントを従来の延長線として取り換える対策ではなく、航空機のデザインそのものを更新することを指す。具体的には、blended wing body 機や strut-braced wing 機等の機材の導入を想定している。電動化に関しては、全ての航空機に適用が検討されている技術であるが、機体の大きさと利用可能な技術の成熟度に応じ、ハイブリッド電動化又は電池を用いた完全電動化が想定される。本ケースでは、ナローボディ機及びワイドボディ機についてはハイブリッド化以上の電動化の難易度が高いと考え、ハイブリッド化と新コンセプト機材¹⁵に移行することを想定した。

新コンセプトの航空機及び電動化は、IATA 技術ロードマップに基づき 2035 年以降に技術レベルが成熟することによって、達成されるものであるとされていることから、2035 年以降の更新から順次導入されるものとする。機材タイプ別には、IATA 技術ロードマップによる将来予測(参考4参照)をもとに、ターボプロップ機に関しては 2035 年以降の機材更新で完全電動化、リージョナル機に関しては 2035 年以降の機材更新でハイブリッド航空機によって 80%の CO2 削減が達成されるとした。また、ATAG Waypoint2050(参考5参照)も踏まえ、将来的にはリージョナル機についても完全電動化が可能であるものと考え、2050 年以降の機材更新では完全電動化を実現すると想定した。ナローボディ機とワイドボディ機については、ATAG Waypoint2050 でも言及されているとおり、機体が大きく航続距離が長いため、完全電動化は将来的にも難しい。そのためマイルド・ハイブリッド¹⁶電動化と新コンセプトの導入を想定した。

具体的な各機材タイプの CO2 削減率の設定方法は下記のとおりとし、表 11 のとおり整理した。

- ターボプロップ機については、2035 年以降の更新での完全電動化を想定し、CO2 削減率を 100%¹⁷とした。
- リージョナル機については、2035 年以降の更新時では、IATA 技術ロードマップに基づきハイブリッド電動化を想定し CO2 削減率を 80%、ATAG Waypoint2050 に基づき 2050 年以降の更新時では、完全電動化を想定し CO2 削減率を 100%とした。
- ナローボディ機及びワイドボディ機については、各時点におけるケース A(機材コンポーネントの更新)に対して CO2 削減率が 10%改善すると想定した。

表 11 新コンセプトの導入+電動化ケースの CO2 削減率(2019 年比)

機材タイプ	2034 年以前に機材更新が行われる場合	2049 年以前に機材更新が行われる場合	2050 年以降に機材更新が行われる場合
ワイドボディ機	▲16%	▲32%	▲39%
ナローボディ機	▲16%	▲32%	▲39%
リージョナル機	▲16%	▲80%	▲100%
ターボプロップ機	▲16%	▲100%	▲100%

※2034 年以前の更新における削減率はケース A.と同じ

¹⁵ truss-braced wings and boxed wings, BWB, unducted fans,

¹⁶ 内燃機関による推進系に対し補助的に電動モーターを用いるもの。電動モーターのみの推進のみでの運航は不可。

¹⁷ 本推計において、電力については、間接排出分を計上していない。

新コンセプトの導入+電動化による燃料消費量及び CO2 排出量の削減量の推移は図 10 及び図 11 に記すとおり。

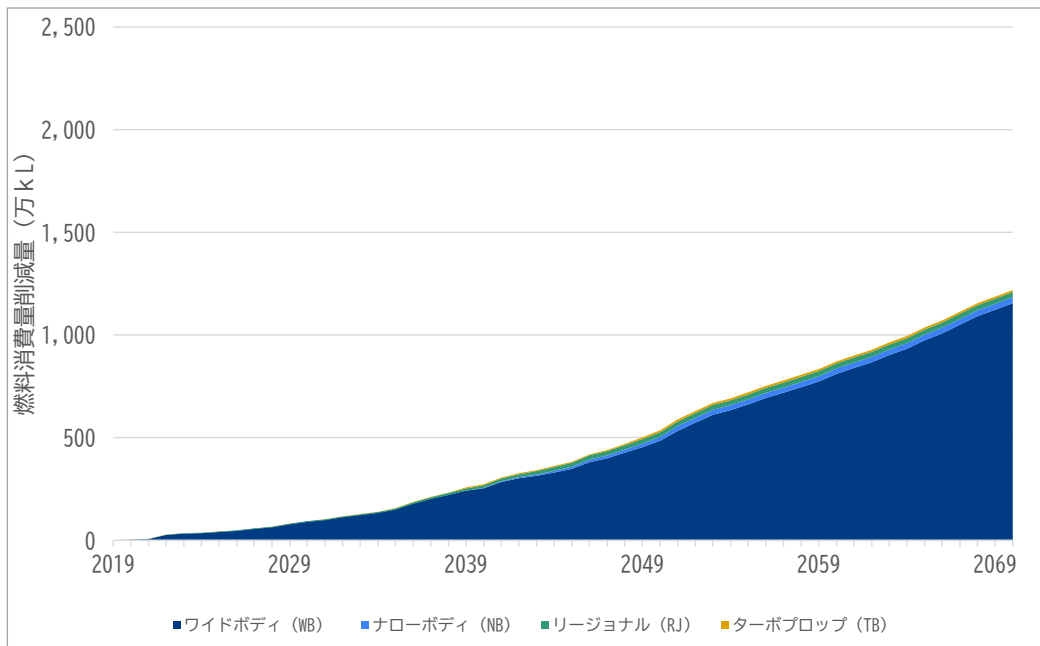


図 10 燃料消費削減量の推移(ケース B. 新コンセプト+電動化)

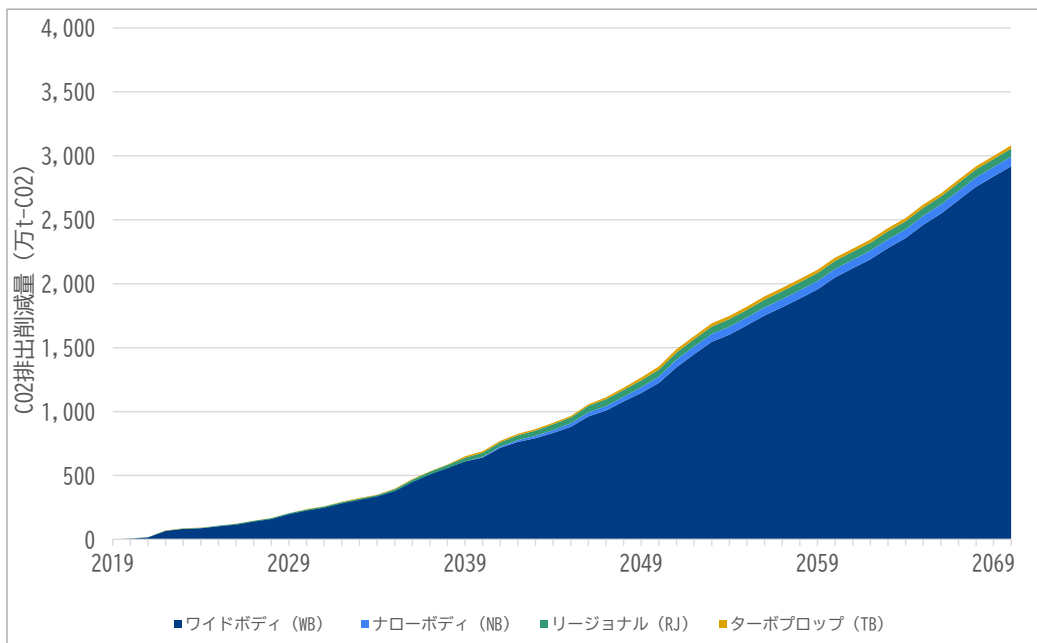


図 11 CO2 排出削減量の推移(ケース B. 新コンセプト+電動化)

ウ) ナローボディ機への水素航空機導入追加ケース(ケース C.)

ATAG Waypoint2050 の T5「野心的シナリオ」では、イ)に記載した新コンセプト及び電動化の導入に加えて、ナローボディ機に対して水素航空機を導入することによる排出削減が想定されている。ここでは、当該シナリオを参考に、ナローボディ機に対して水素航空機を導入するケースを検討した。ナローボディ機に対する水素航空機の導入は、技術的に難易度の高いものと考えられ、本推計では 2050 年以降の更新時に導入が進むものとし、CO₂ 削減率は 100%とした。¹⁸

機材タイプ別の CO₂ 削減率は表 12 のとおり。

表 12 ナローボディ機への水素航空機導入を追加するケースの CO₂ 削減率(2019 年比)

機材タイプ	2034 年以前に機材更新が行われる場合	2049 年以前に機材更新が行われる場合	2050 年以降に機材更新が行われる場合
ワイドボディ機	▲16%	▲32%	▲39%
ナローボディ機	▲16%	▲32%	▲100%
リージョナル機	▲16%	▲80%	▲100%
ターボプロップ機	▲16%	▲100%	▲100%

※ナローボディ機の 2050 年以降の更新を除き、削減率はケース B.と同じ

ナローボディ機への水素航空機の導入追加による燃料消費量及び CO₂ 排出量の削減量の推移は図 12 及び図 13 に記すとおり。

¹⁸ 本推計において、水素については、間接排出分を計上していない。

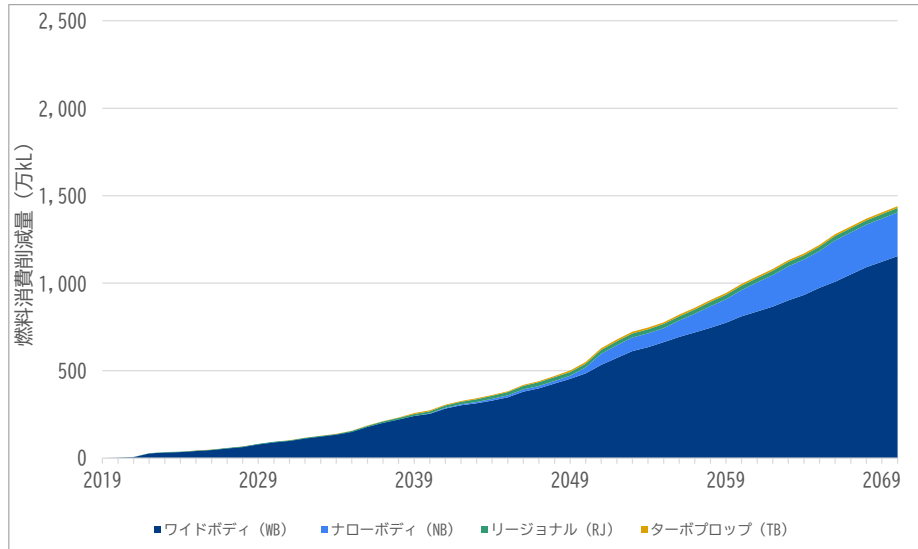


図 12 燃料消費削減量の推移(ケース C. ナローボディ機への水素航空機導入を追加)

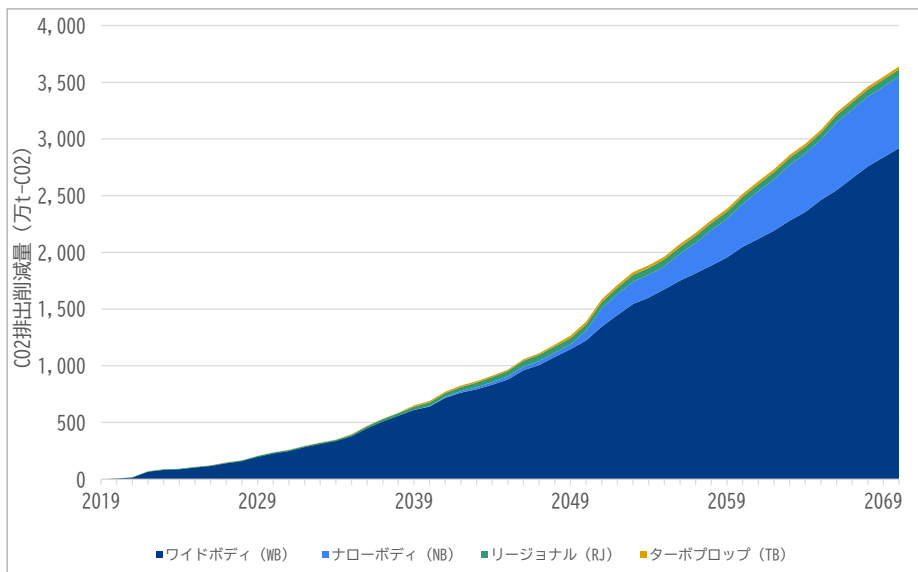


図 13 CO2 排出削減量の推移(ケース C. ナローボディ機への水素航空機導入を追加)

<参考4> IATA 技術ロードマップにおける導入見通し

航空機の電動化については、小型の機体から電動化が進む見通しとされており、2035～40 年までには、100 席以下(リージョナルジェット機までのサイズが該当)の機体においてハイブリッド電動化が実現し、CO₂ 排出が最大で 80%削減されるとされている。

また、2035 年以降、座席数が 80 席以下の機体において完全電動化が実現する可能性があることが示唆されている。

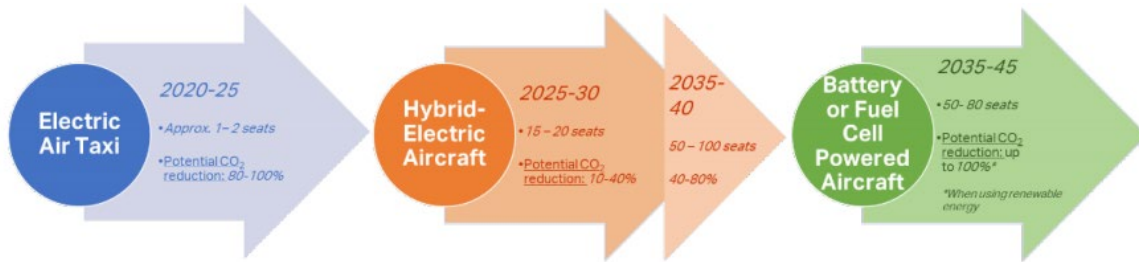


Figure 28: Step-by-step approach in the penetration of electrically-powered aircraft into the market

<参考5> ATAG Waypoint 2050 における航空技術の導入想定

2021年9月、国際的な業界団体である ATAG は、航空業界における新たな CO2 削減シナリオ「Waypoint 2050 SECOND EDITION」を公表。当該シナリオでは、航空技術について、以下の T1 から T5 までの 5 シナリオを想定している。

表 ATAG Waypoint2050 におけるシナリオ別の航空技術の導入想定

シナリオ	概要
T1 ベースライン	- 既存機又は市場投入されようとする航空機による更新のみ (例:旧型の 737 機が退役し、737MAX に置き換わる等)
T2 保守的シナリオ (進化的技術のみ)	- 更新後の航空機は現在のモデルに従うが、ターボファンエンジン推進システムを備えた標準的な「tube and wing」形態も発展形を備える。従来の液体ジェット燃料又は SAF を使用する。
T3 新コンセプトの導入	- 革新的技術(BWB 機、strut-braced wing 機、オープンローター等)の導入。従来の液体ジェット燃料又は SAF を使用する。
T4 電動化の推進	- 新しい構造要素(strut-braced wing、blended wing body、オープンローターエンジン等)を組み込んだ航空機の革新的な形態の航空機。 - 加えて、バッテリーシステム(100 席未満)及びハイブリッドシステム(より大型の航空機用)を使用した電気推進にシフト(2035-2040 から市場に投入)。
T5 野心的技術	- ナローボディ機(100~200 席)のゼロ・エミッション航空機(水素の可能性)への革新的なシフト。 - 小型航空機の電動化及びより大型の航空機のハイブリッド化を想定。このシフトは、2030 年から発生し、より大型の航空機については T4 シナリオよりも早く発生する。

なお、2050 年ネットゼロに至る CO2 排出パスは下記のとおり。

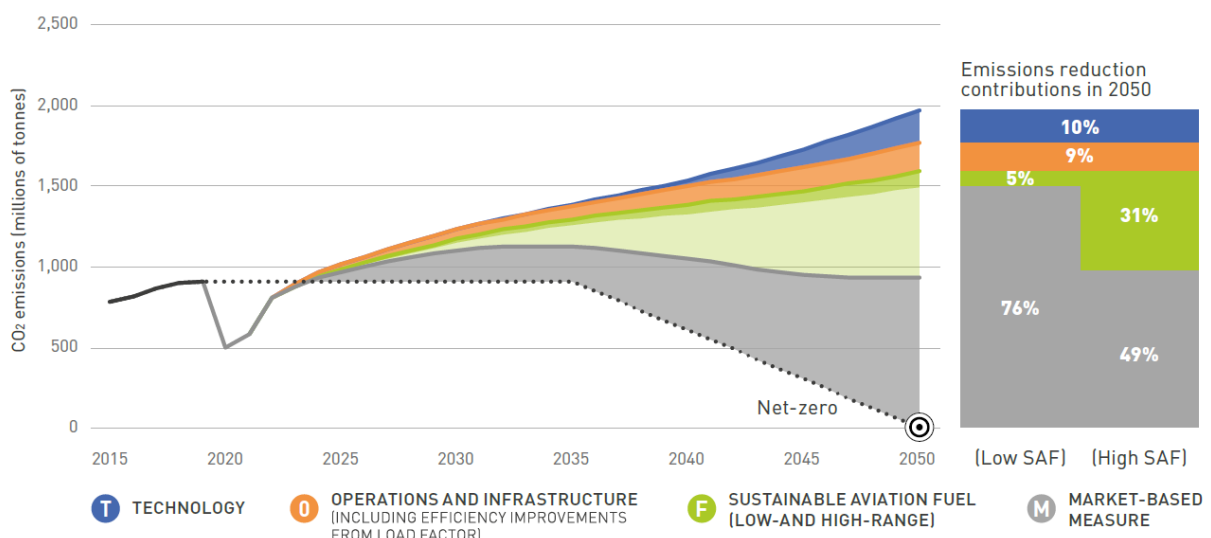


図 T2(機体コンポーネントの改善)を想定したシナリオの排出パス

<参考5> ATAG Waypoint 2050 における航空技術の想定(続き)

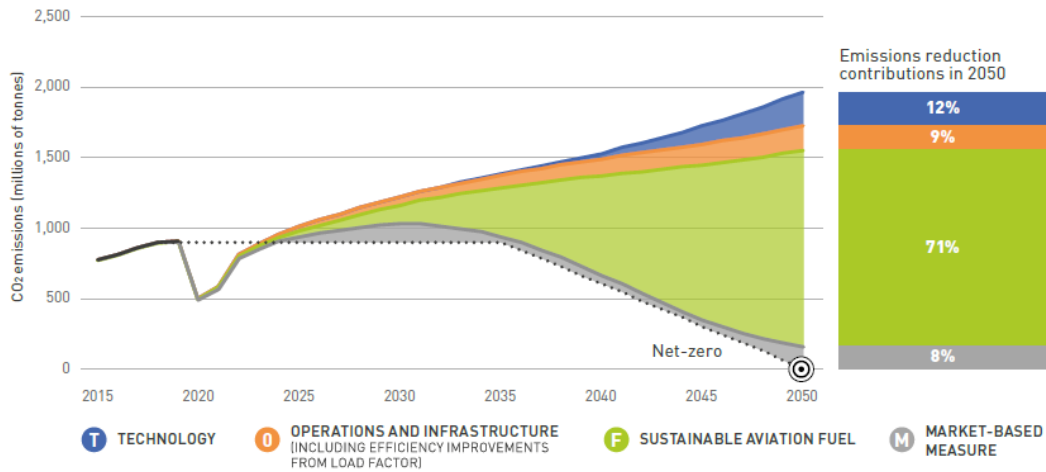


図 T3(新しい航空機コンセプトの導入)を想定したシナリオの排出パス

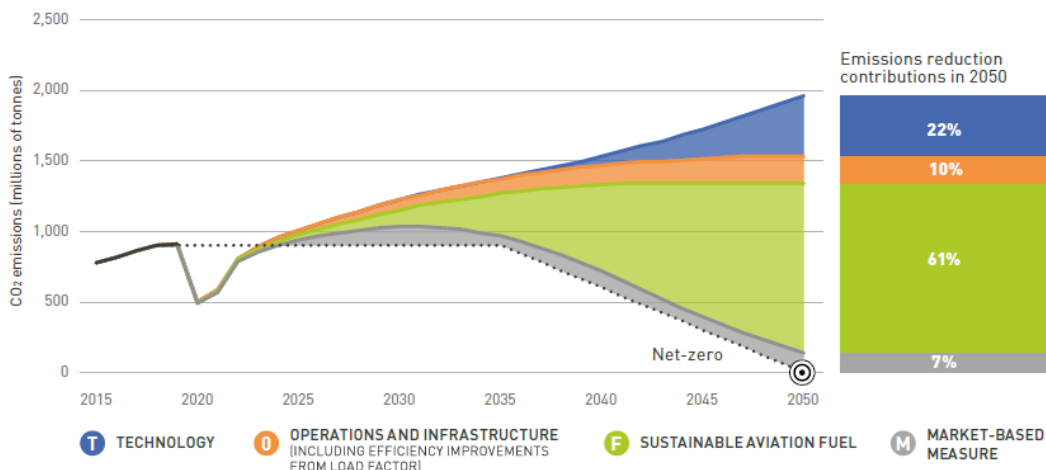


図 T4(電動化の推進)を想定したシナリオの排出パス

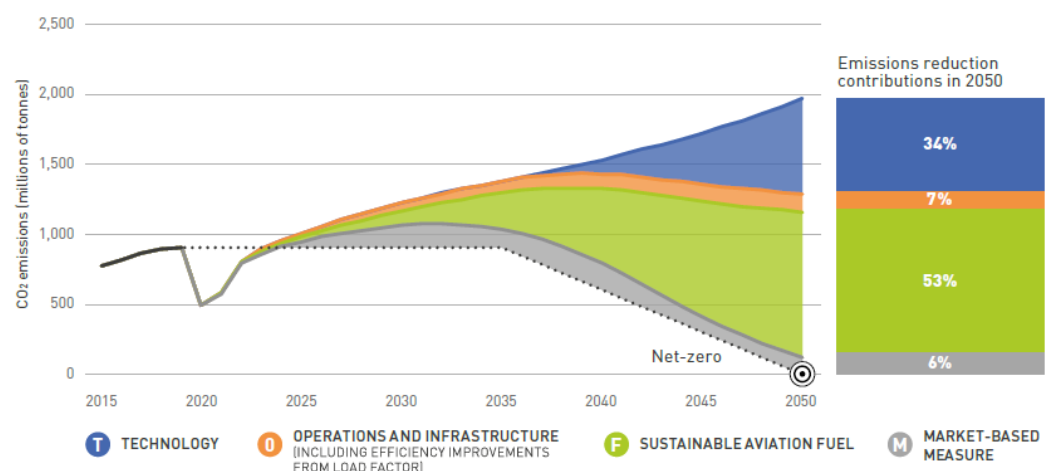


図 T5(野心的技術)を想定したシナリオの排出パス

<参考5> ATAG Waypoint2050 における航空技術の想定(続き)

なお、ATAG Waypoint2050 では、座席数・航続時間に応じた 5 種類 (Commuter, Regional, Short haul, Medium haul, Long haul) の航空機に適用され得る動力源及び導入時期を示している。Commuter 及び Regional については、2025 年/2030 年以降に電気又は燃料電池の使用を、Short haul 及び Medium haul については、2035 年/2040 年以降、水素燃料が使用され得る。Long haul については、2050 年においても SAF の使用が中心であると想定されている。(以下を踏まえ、本検討ではリージョナル機については将来的に、完全電動化が可能であるものと想定した。)

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Commuter » 9-19 seats » < 60 minute flights » <1% of industry CO ₂	SAF	Electric or Hydrogen fuel cell and/or SAF	Electric or Hydrogen fuel cell and/or SAF	Electric or Hydrogen fuel cell and/or SAF	Electric or Hydrogen fuel cell and/or SAF	Electric or Hydrogen fuel cell and/or SAF	Electric or Hydrogen fuel cell and/or SAF
Regional » 50-100 seats » 30-90 minute flights » ~3% of industry CO ₂	SAF	SAF	Electric or Hydrogen fuel cell and/or SAF	Electric or Hydrogen fuel cell and/or SAF	Electric or Hydrogen fuel cell and/or SAF	Electric or Hydrogen fuel cell and/or SAF	Electric or Hydrogen fuel cell and/or SAF
Short haul » 100-150 seats » 45-120 minute flights » ~24% of industry CO ₂	SAF	SAF	SAF	SAF potentially some Hydrogen	Hydrogen and/or SAF	Hydrogen and/or SAF	Hydrogen and/or SAF
Medium haul » 100-250 seats » 60-150 minute flights » ~43% of industry CO ₂	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF potentially some Hydrogen	SAF potentially some Hydrogen	SAF potentially some Hydrogen
Long haul » 250+ seats » 150 minute + flights » ~30% of industry CO ₂	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF

2) 運航技術による削減効果

我が国は、新技術を活用した航空交通管制による運航改善の取組みとして、ICAO が 2040 年までの方向性・行動計画をとりまとめた「世界航空交通計画(GANP:Global Air Navigation Plan)」に基づき、2010 年に「将来の航空交通システムに関する長期ビジョン」(CARATS:Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems)を策定し、CO2 削減に資する施策の導入に取り組んでいる。CO2 削減目標については、国土交通省の「航空機運航分野における CO2 削減に関する検討会」でとりまとめられた、管制の高度化による運航方式の改善に係る工程表¹⁹において、我が国における今後の取組みのロードマップが示されている。

工程表(②管制の高度化による運航方式の改善)

●凡例 1. 準備・導入フェーズ 2. 試行・実証フェーズ 3. 運用・拡大フェーズ ④ 最終目標

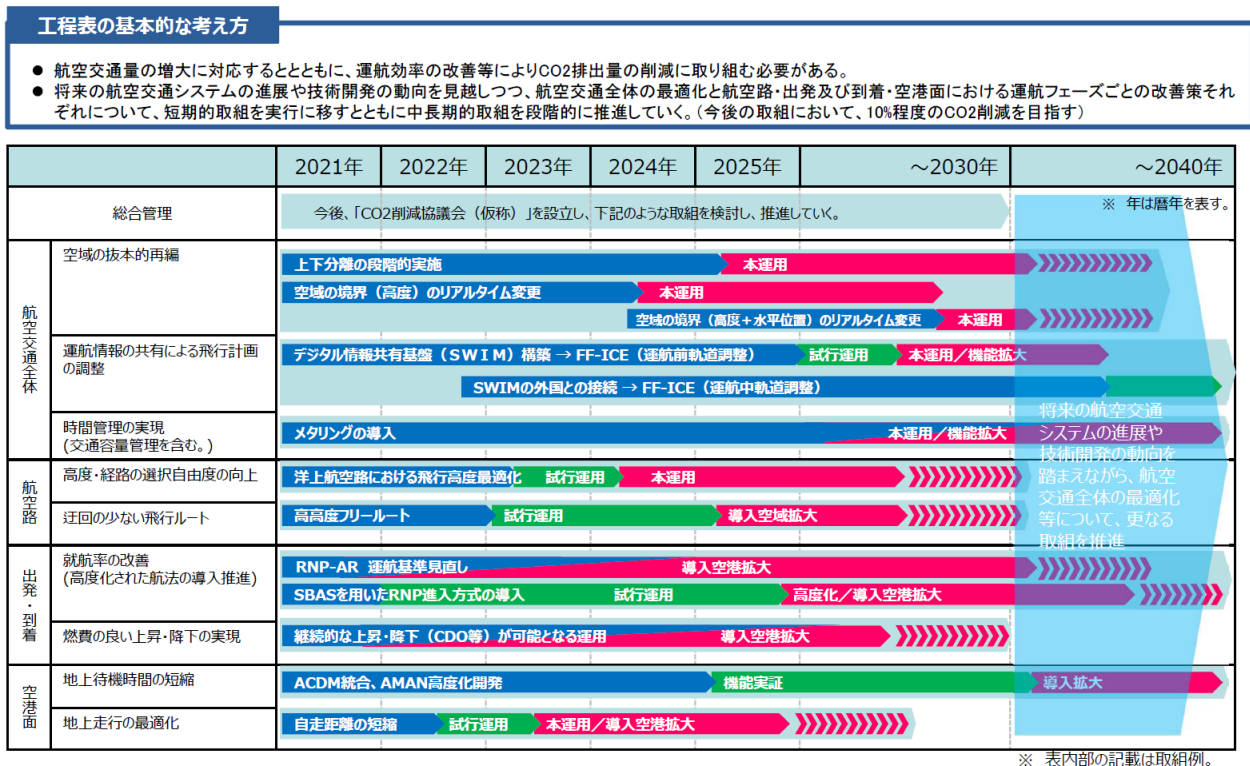


図 14 管制の高度化による運航方式の改善ロードマップ

工程表においては、2050 年において 2021 年比 10%程度の CO2 削減を目指すこととされている。この目標を年率に換算すると、年率 0.35%の改善に相当する。これを踏まえ、本検討では、運航技術により、年率 0.35%の改善を実現することを想定した。なお、具体的な削減対策については、参考6及び参考7に示す。

¹⁹ 国土交通省航空局「航空の脱炭素化推進に係る工程表(航空機運航分野における CO2 削減に関する検討会)」(2021 年 12 月)、<https://www.mlit.go.jp/common/001445923.pdf>

<参考6> CARATS において実施されている CO2 削減に寄与する運航方法

運航方法	仕組み・寄与する理由	導入時期目安
空港における運用効率化	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 地上における待機時間を短縮することで CO2 排出量を削減する ➤ 空港関係者間で、情報共有を強化することにより、航空機、地上作業員及び航空管制提供者間の情報交換を容易にする。これにより、航空会社にとってより正確なターンアラウンド情報が提供され、遅延や燃料消費を最小限に抑えるスロットの効果的な使用が可能になる。 	2030 年以降
自由なルートでの飛行	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 上空の気象に応じて、運航乗務員がより効率的に飛行できるルート・高度を選択して飛行することで巡航中の CO2 排出量を削減する。 ➤ 事前に計画された管制承認をリアルタイムに変更する調整が必要であり、地上・機上のインフラ整備が必要となる。 	2022 年以降
時間管理運航	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 管制機関が交通流の混雑具合を把握し、上空において待機時間を発生させないよう飛行の位置・速度をリアルタイムに調整することで全体として、巡航中の CO2 排出量を削減する。 ➤ 事前に計画された管制承認をリアルタイムに変更する調整が必要であり、地上・機上のインフラ整備が必要となる。 	2030 年以降
継続的な上昇・降下運用	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 上昇・降下フェーズでの CO2 削減に寄与する。 ➤ エンジン運用の方法を変更することで実現ができる。 	2023 年以降
進入経路短縮 (RNP AR 方式など)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 進入フェーズの飛行距離を短くすることで CO2 排出に寄与する。 ➤ 飛行方式の設定および機上・地上のインフラに左右されることが多く、特定空港へ順々に導入される予定である。 	2021 年以降

<参考7> CARATS における CO2 削減に寄与する具体施策(詳細版)

施策 ID	施策名	導入予定時期	
DCB-5-2	複数地点 CFDT	2021 年度	
TBO-1	高高度でのフリールーティング	フェーズ 1(直行経路)	2022 年度
		フェーズ 2(UPR)	2025 年度
TBO-2-1	協調的な運航前の計画軌道調整	2026 年度	
TBO-5	継続的な上昇・降下の実現	CDO フェーズ 1	2023 年度
		CCO	2027 年度
		CDO フェーズ 2	2031 年度
TBO-8-1	洋上管制間隔の短縮(ADS-C CDP)	2021 年度	
TBO-8-2	空対空監視(ASAS)の活用/ATSA-ITP 運航	2021 年度	
APO-2	空港運用の効率化 (AMAN/DMAN/SMAN)	AMAN (Step 1)	2019 年度
		AMAN (Step 2)/統合運用	2030 年度
NAV-1	RNP 方式の導入(RNP to ILS)	2021 年度	
NAV-2	SBAS を用いた運航(LP/LPV, RNP to LPV)	2025 年度	
NAV-3	GBAS を用いた運航	GLS 進入(CAT-I)	2020 年度
		RNP to GLS	2023 年度
		GLS 進入(CAT-II/III)	2026 年度
DCB-5-2	複数地点 CFDT	2021 年度	
TBO-1	高高度でのフリールーティング	フェーズ 1(直行経路)	2022 年度
		フェーズ 2(UPR)	2025 年度
TBO-2-1	協調的な運航前の計画軌道調整	2026 年度	
TBO-5	継続的な上昇・降下の実現	CDO フェーズ 1	2023 年度
		CCO	2027 年度
		CDO フェーズ 2	2031 年度
TBO-8-1	洋上管制間隔の短縮(ADS-C CDP)	2021 年度	
TBO-8-2	空対空監視(ASAS)の活用/ATSA-ITP 運航	2021 年度	
APO-2	空港運用の効率化 (AMAN/DMAN/SMAN)	AMAN (Step 1)	2019 年度
		AMAN (Step 2)/統合運用	2030 年度
NAV-1	RNP 方式の導入(RNP to ILS)	2021 年度	
NAV-2	SBAS を用いた運航(LP/LPV, RNP to LPV)	2025 年度	
NAV-3	GBAS を用いた運航	GLS 進入(CAT-I)	2020 年度
		RNP to GLS	2023 年度
		GLS 進入(CAT-II/III)	2026 年度

3) 航空技術・運航技術導入後の燃料消費量・CO2 排出量の将来推計

ここまで検討した航空技術・運航技術の導入による削減効果を考慮した本邦エアラインの燃料消費量・CO2 排出量の将来推計を行った。a に本邦エアライン全体の推計結果、b に国内線旅客機に係る推計結果、c に国際線旅客機に係る推計結果、d に貨物機に係る推計結果を示す。

国際線については、図 3 のとおり、我が国では WB からの排出が全体の多くを占めるため、ケース A (機材コンポーネントの更新)による削減効果が高く、国内線については、NB からの排出が WB からの排出と同程度であることから、ケース C (特に 2050 年以降の水素航空機の導入)による削減効果も高い。また、全体としては、国際線からの排出が長期的には全体の多くを占めるため、ケース A (機材コンポーネントの更新)による削減効果が高い。

a. 本邦エアライン全体

本邦エアライン全体の燃料消費量・CO2 排出量(国内線・国際線)及び航空技術・運航技術の導入による削減効果を考慮した燃料消費量・CO2 排出量(国内線・国際線)の推計結果は表 13 及び図 15 に示すとおりである。ベースケース(機体の燃費改善がなされず、需要予測に比例して燃料消費量が増加)においては、2070 年時点で約 3,292 万 kL の燃料消費量、約 8,323 万トン CO2 の排出量となった。各ケースの 2070 年時点におけるベースケースからの削減量は、以下のとおり。

- ✓ ケース A.:航空技術で約 1,052 万 kL/約 2,660 万トン CO2 の削減(ベースケースの約 32% 相当)、運航技術の追加分で約 367 万 kL/約 927 万トン CO2 (ベースケースの約 11% 相当)
- ✓ ケース B.:航空技術で約 1,298 万 kL/約 3,280 万トン CO2 の削減(ベースケースの約 39% 相当)、運航技術の追加分で約 327 万 kL/約 826 万トン CO2 の削減(ベースケースの約 10% 相当)
- ✓ ケース C.:航空技術で約 1,522 万 kL/約 3,849 万トン CO2 の削減(ベースケースの約 46% 相当)、運航技術の追加分で約 290 万 kL/約 733 万トン CO2 の削減(ベースケースの約 9% 相当)

表 13 本邦エアライン全体の燃料消費量・CO2 排出量の将来推計(航空技術・運航技術導入後)

単位[万 kL]	2021 年	2030 年	2050 年	2070 年
ベースケース	817	1,287	1,993	3,292
A.機材コンポーネントの更新	810	1,169	1,540	2,240
A.+運航改善	805	1,124	1,381	1,873
B.新概念+電動化	810	1,169	1,396	1,995
B.+運航改善	805	1,124	1,253	1,668
C. B+NB 機水素化	810	1,169	1,382	1,770
C.+運航改善	805	1,124	1,239	1,480

単位[万t-CO2]	2021 年	2030 年	2050 年	2070 年
ベースケース	2,066	3,254	5,038	8,323
A.機材コンポーネントの更新	2,049	2,955	3,892	5,663
A.+運航改善	2,035	2,843	3,491	4,736
B.新概念+電動化	2,049	2,955	3,530	5,043
B.+運航改善	2,035	2,843	3,167	4,217
C. B+NB 機水素化	2,049	2,955	3,493	4,475
C.+運航改善	2,035	2,843	3,133	3,742

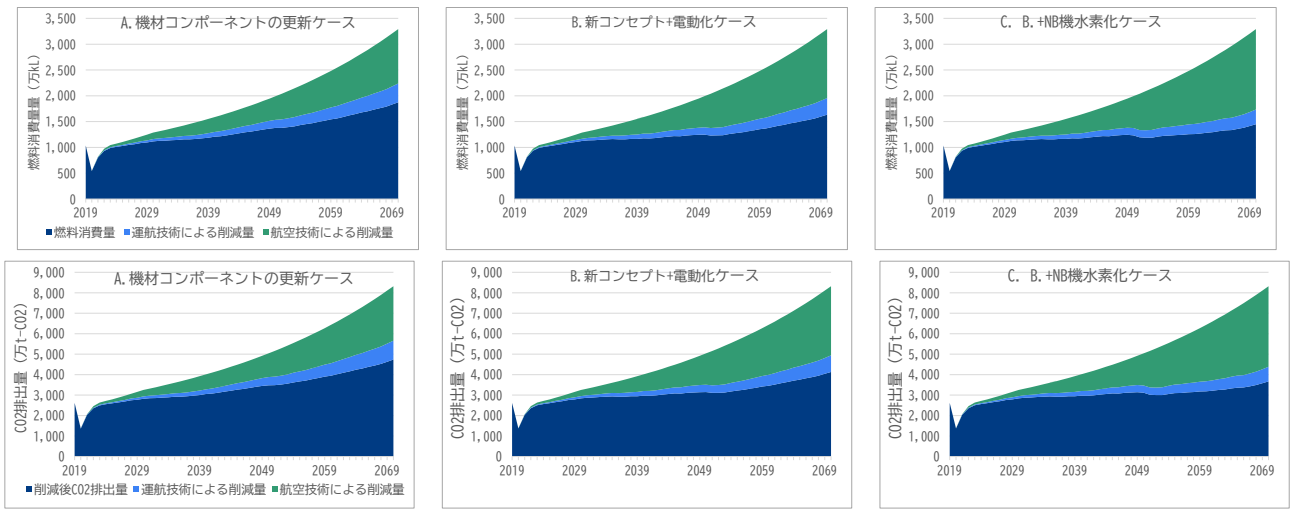


図 15 本邦エアライン全体の燃料消費量・CO2 排出量の将来推計(航空技術・運航技術導入後)

b. 本邦エアラインにおける国内線旅客機

本邦エアラインにおける国内線旅客機の燃料消費量・CO₂ 排出量及び航空技術・運航技術の導入による削減効果を考慮した燃料消費量・CO₂ 排出量の推計結果は表 14 及び図 16 に示すとおりである。

ベースケース(機体の燃費改善がなされず、需要予測に比例して燃料消費量が増加)においては、2070年時点で約448万kLの燃料消費量、約1,134万トンCO₂の排出量となった。各ケースの2070年時点におけるベースケースからの削減量は、以下のとおり。

- ✓ ケース A.: 航空技術で約 142 万 kL/約 359 万トン CO₂ の削減(ベースケースの約 32%相当)、運航技術の追加分で約 50 万 kL/約 127 万トン CO₂(ベースケースの約 11%相当)
- ✓ ケース B.: 航空技術で約 194 万 kL/約 491 万トン CO₂ の削減(ベースケースの約 43%相当)、運航技術の追加分で約 42 万 kL/約 105 万トン CO₂ の削減(ベースケースの約 9%相当)
- ✓ ケース C.: 航空技術で約 316 万 kL/約 800 万トン CO₂ の削減(ベースケースの約 71%相当)、運航技術の追加分で約 22 万 kL/約 55 万トン CO₂ の削減(ベースケースの約 5%相当)

表 14 航空技術・運航技術導入後の本邦国内旅客線の燃料消費量

単位[万 kL]	2021 年	2030 年	2050 年	2070 年
ベースケース	373	448	448	448
A. 機材コンポーネントの更新	370	394	341	306
A.+ 運航改善	368	379	306	256
B. 新コンセプト+電動化	370	394	289	254
B.+ 運航改善	368	379	259	213
C. B+NB 機水素化	370	394	282	132
C+ 運航改善	368	379	253	110

単位[万t-CO ₂]	2021 年	2030 年	2050 年	2070 年
ベースケース	942	1,134	1,134	1,134
A. 機材コンポーネントの更新	936	995	863	774
A.+ 運航改善	930	958	774	648
B. 新コンセプト+電動化	936	995	731	643
B.+ 運航改善	930	958	655	538
C. B+NB 機水素化	936	995	712	334
C+ 運航改善	930	958	639	279

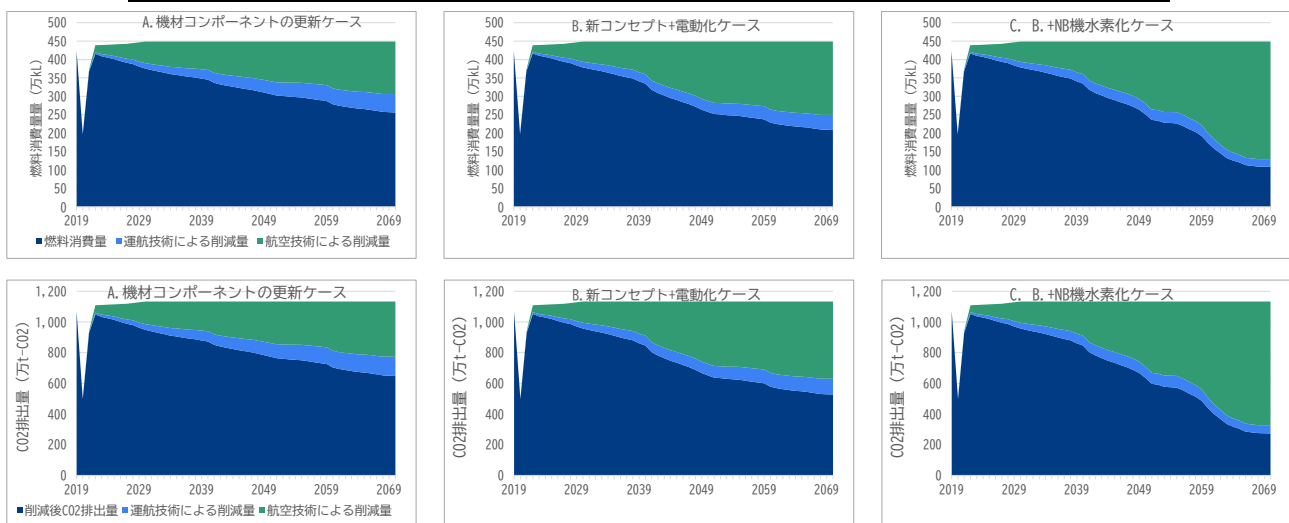


図 16 国内線旅客機の燃料消費量・CO₂ 排出量の将来推計(航空技術・運航技術導入後)

c. 本邦エアラインにおける国際線旅客機

本邦エアラインにおける国際線旅客機の燃料消費量・CO₂ 排出量及び航空技術・運航技術の導入による削減効果を考慮した燃料消費量・CO₂ 排出量の推計結果は表 15 及び図 17 に示すとおりである。

ベースケース(機体の燃費改善がなされず、需要予測に比例して燃料消費量が増加)においては、2070 年時点で約 2,573 万 kL の燃料消費量、約 6,505 万トン CO₂ の排出量となった。各ケースの 2070 年時点におけるベースケースからの削減量は、以下のとおり。

- ✓ ケース A.:航空技術で約 823 万 kL/約 2,082 万トン CO₂ の削減(ベースケースの約 32%相当)、運航技術の追加分で約 287 万 kL/約 724 万トン CO₂(ベースケースの約11%相当)
- ✓ ケース B.:航空技術で約 998 万 kL/約 2,524 万トン CO₂ の削減(ベースケースの約39%相当)、運航技術の追加分で約258 万 kL/約 652 万トン CO₂ の削減(ベースケースの約 10%相当)
- ✓ ケース C.:航空技術で約1,101 万 kL/約2,783 万トン CO₂ の削減(ベースケースの約 43%相当)、運航技術の追加分で約 241 万 kL/約609 万トン CO₂ の削減(ベースケースの約 9%相当)

表 15 航空技術・運航技術導入後の本邦国際旅客線の燃料消費量

単位[万 kL]	2021 年	2030 年	2050 年	2070 年
ベースケース	384	759	1,397	2,573
A.機材コンポーネントの更新	380	707	1,086	1,750
A.+運航改善	377	680	974	1,463
B.新コンセプト+電動化	380	707	1,006	1,575
B.+運航改善	377	680	903	1,317
C. B+NB 機水素化	380	707	999	1,472
C+運航改善	377	680	896	1,231

単位[万t-CO ₂]	2021 年	2030 年	2050 年	2070 年
ベースケース	971	1,918	3,533	6,505
A.機材コンポーネントの更新	960	1,787	2,746	4,424
A.+運航改善	953	1,720	2,463	3,699
B.新コンセプト+電動化	960	1,787	2,544	3,981
B.+運航改善	953	1,720	2,282	3,329
C. B+NB 機水素化	960	1,787	2,526	3,722
C+運航改善	953	1,720	2,266	3,113

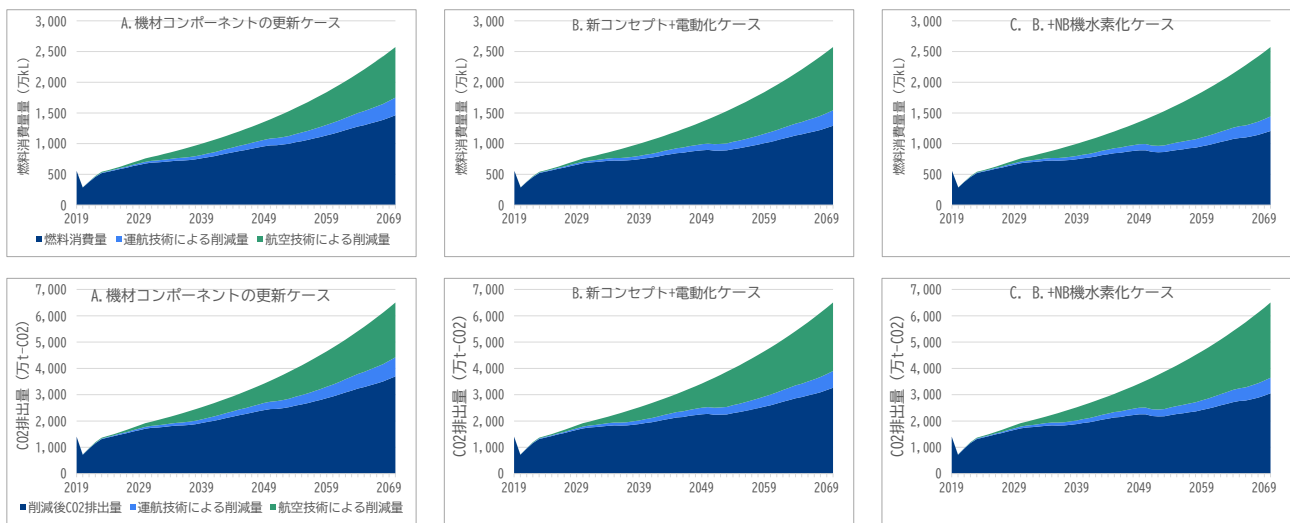


図 17 国際線旅客機の燃料消費量・CO₂ 排出量の将来推計(航空技術・運航技術導入後)

d. 本邦エアラインにおける貨物機

本邦エアラインにおける貨物機の燃料消費量・CO₂ 排出量及び航空技術・運航技術の導入による削減効果を考慮した燃料消費量・CO₂ 排出量の推計結果は表 16 及び図 18 に示すとおりである。

ベースケース(機体の燃費改善がなされず、需要予測に比例して燃料消費量が増加)においては、2070 年時点で約 271 万 kL の燃料消費量、約 684 万トン CO₂ の排出量となった。各ケースの 2070 年時点におけるベースケースからの削減量は、以下のとおり。

- ✓ ケース A.: 航空技術で約 87 万 kL/約 219 万トン CO₂ の削減(ベースケースの約 32%相当)、運航技術の追加分で約 30 万 kL/約 76 万トン CO₂(ベースケースの約 11%相当)
- ✓ ケース B.: 航空技術で約 105 万 kL/約 265 万トン CO₂ の削減(ベースケースの約 39%相当)、運航技術の追加分で約 27 万 kL/約 69 万トン CO₂ の削減(ベースケースの約 10%相当)
- ✓ ケース C.: 航空技術で約 105 万 kL/約 265 万トン CO₂ の削減(ベースケースの約 39%相当)、運航技術の追加分で約 27 万 kL/約 69 万トン CO₂ の削減(ベースケースの約 10%相当)²⁰

表 16 航空技術・運航技術導入後の本邦貨物線の燃料消費量

単位[万 kL]	2021 年	2030 年	2050 年	2070 年
ベースケース	61	80	147	271
A. 機材コンポーネントの更新	60	68	112	184
A.+運航改善	60	65	100	154
B. 新コンセプト+電動化	60	68	101	166
B.+運航改善	60	65	90	139
C. B+NB 機水素化	60	68	101	166
C+運航改善	60	65	90	139

単位[万 t-CO ₂]	2021 年	2030 年	2050 年	2070 年
ベースケース	153	202	372	684
A. 機材コンポーネントの更新	152	172	283	465
A.+運航改善	151	165	254	389
B. 新コンセプト+電動化	152	172	255	419
B.+運航改善	151	165	229	350
C. B+NB 機水素化	152	172	255	419
C+運航改善	151	165	229	350

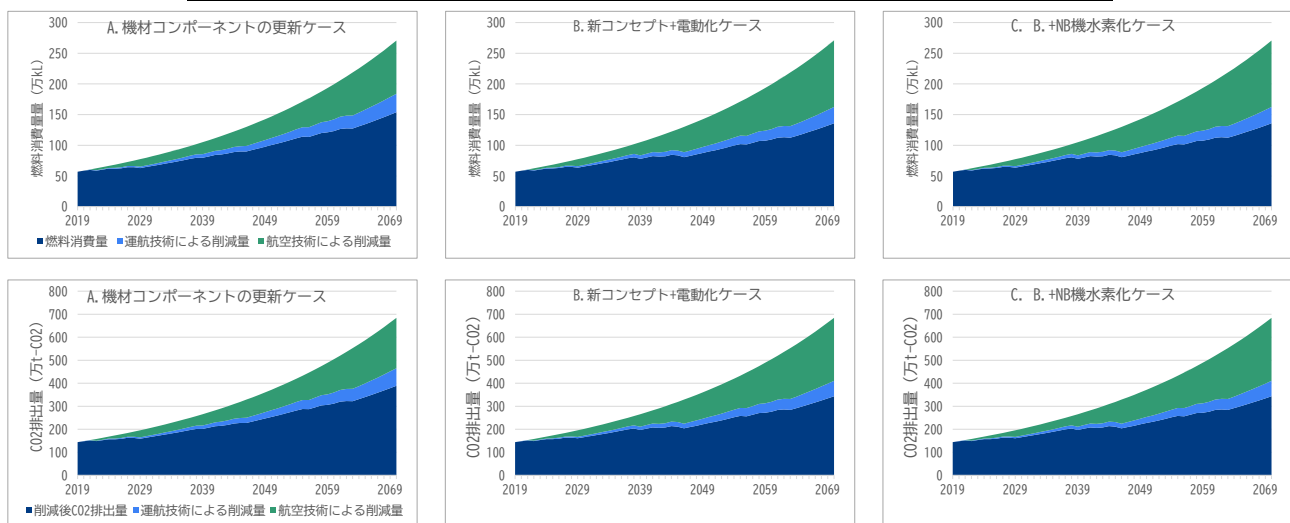


図 18 貨物機の燃料消費量・CO₂ 排出量の将来推計(航空技術・運航技術導入後)

²⁰ 本推計において対象となった貨物機はすべてワイドボディ機であるためケース B.とケース C.の差異は現れなかった。

(4) SAF(Sustainable Aviation Fuels)による削減の推計

1) SAF(Sustainable Aviation Fuels)の位置づけと検討方法

SAF(Sustainable Aviation Fuel)とは、バイオマス、廃棄物、排ガス中の炭素等を原料とする航空燃料を指す。SAF は、バイオマスの成長過程において吸収された炭素成分を含み、当該炭素成分の燃焼により、大気中のCO₂の総量を増加させないことからCO₂は排出されないものとみなされる。そのため、SAFのライフサイクル全体でのCO₂排出量は、従来のジェット燃料に比べて大幅に小さいものとなる。

SAFによる削減を評価するに当たっては、ライフサイクルベースでのCO₂削減率及び従来のジェット燃料との混合比率に留意が必要であり、本推計では以下のとおり検討を行った。

a. ライフサイクルベースでのCO₂削減率

国際航空分野における市場メカニズムを活用した削減対策である CORSIA(Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation)制度においては、SAFの使用による温室効果ガスの排出削減量をライフサイクルベースで評価するものとされている。そのため、本検討においても、SAFの使用による排出削減量を推計するに当たっては、原料の栽培からSAFの燃焼に至るまでのライフサイクル全体での評価を行った。

b. 従来のジェット燃料との混合比率

SAFは、ニートSAFとして国際標準であるASTM規格に適合することが求められ、更に、当該規格において定められた最大混合可能率の範囲で、従来の化石由来のジェット燃料と混合することが求められる。この混合後のSAFは、関連するASTM規格に適合することが認められた場合、従来のジェット燃料と同じ燃料とみなされ、同じ取扱いがなされる(エンジンの改修等なく、既存の航空機に搭載することができる)。

2022年1月時点で、SAFの混合比率の上限は表17に示すとおり。一方、2021年4月に”100%SAF ASTM Task Force”が設置され、混合を要さない100%SAFの実現に向けた検討が開始されており、国土交通省の「航空機運航分野におけるCO₂削減に関する検討会」において示されたSAFに係る工程表²¹においても2030年以降のSAF100%フライトの実現を目指していることから、2035年以降は表17のブレンド上限は想定せず、SAF100%で導入可能であるものと想定した。

²¹ 国土交通省航空局「航空の脱炭素化推進に係る工程表(航空機運航分野におけるCO₂削減に関する検討会)」(2021年12月)、<https://www.mlit.go.jp/common/001445923.pdf>

表 17 SAF の混合上限比率²²

ASTM D7566	製造技術	従来の燃料との混合上限	原料
Annex1	Fischer-Tropsch 法により精製される合成パラフィンケロシン (FT-SPK)	50%	有機物全般
Annex2	植物油等の水素処理により精製される合成パラフィンケロシン (Bio-SPK 又は HEFA)	50%	生物系油脂
Annex3	発酵水素化処理糖類由来のイソ・パラフィン (SIP)	10%	バイオマス糖
Annex4	非化石資源由来の芳香族をアルキル化した合成ケロシン (SPK/A)	50%	有機物全般
Annex5	アルコール・ジェット由来の合成パラフィンケロシン (ATJ-SPK)	50%	バイオマス糖 紙ごみ
Annex 6	Catalytic Hydrothermolysis Jet (CHJ)	50%	生物系油脂
Annex 7	Hydrocarbon-HEFA (HC-HEFA)	10%	微細藻類

出所)航空機運航分野における CO2 削減に関する検討会(第1回)資料

2) 本推計の対象範囲

(3)までの検討と同様、本邦エアラインの国内線及び国際線(外国発含む)とする。ここで、国内線及び国際線(日本発)については、国産原料による国産 SAF のみの使用(輸入 SAF 及び輸入原料による国産 SAF の使用は含まない。)を想定し、国際線(外国発)については、海外の SAF の使用を想定した。

3) SAF の供給ポテンシャル

a. 国内における SAF の供給ポテンシャル

運輸総合研究所及び三菱総合研究所「我が国における SAF の普及促進に向けた課題・解決策」において、2050 年までの国内における SAF の供給ポテンシャルを推計している。

ここで、この推計結果は、本邦エアラインのみならず、外航エアラインによる国内給油も想定したものであることに留意する必要がある。本邦エアラインのみの SAF 導入量を推計するため、2019 年における本邦エアラインと外航エアラインの国内燃料消費量の比率²³に基づいて按分した。なお、本邦エアラインの SAF 導入量の国内線と国際線の内訳についても、2019 年における本邦エアラインの国内線(定期便)と国際線(国内給油)の国内燃料消費量の比率²⁴に基づいて按分した。また、2050 年以降の導入量は横ばいであると仮定した。この結果を図 19 に示す。

なお、この供給ポテンシャルには、藻類バイオマス、未利用の低質廃棄油脂、海外から輸入することを念

²² なお、ASTM D1655 規格 Annex A1 においては、混合率5%を上限とし、FOG Co-processing 及び FT Co-processing による製造プロセス(従来の石油精製プロセスに投入するプロセス)が規定されている。

²³ 航空輸送統計年報(令和元年(2019年))によると、本邦エアラインの国内燃料消費量(国内線(定期)及び国際線)は約 732 万 kL。令和 1 年資源・エネルギー統計年報によると、外航エアラインと本邦エアラインの国内燃料消費量(国際線)は約 889 万 kL であり、外航エアラインに限ると、約 580 万 kL となる。

²⁴ 航空輸送統計年報(令和元年(2019年))によると、本邦エアラインの国内燃料消費量(国内線(定期))は約 423 万 kL、国内燃料消費量(国際線)は約 309 万 kL。

頭においた廃棄油脂、PFAD・POME等を原料とする SAF や輸入 SAF(ニート又は混合後)を含まず、また、PtL については、2030 年時点の水素の製造ポテンシャルを用いて推計しているが、2050 年にかけて増加が見込まれる水素を活用した合成燃料の製造も考えられる点には留意する必要がある。

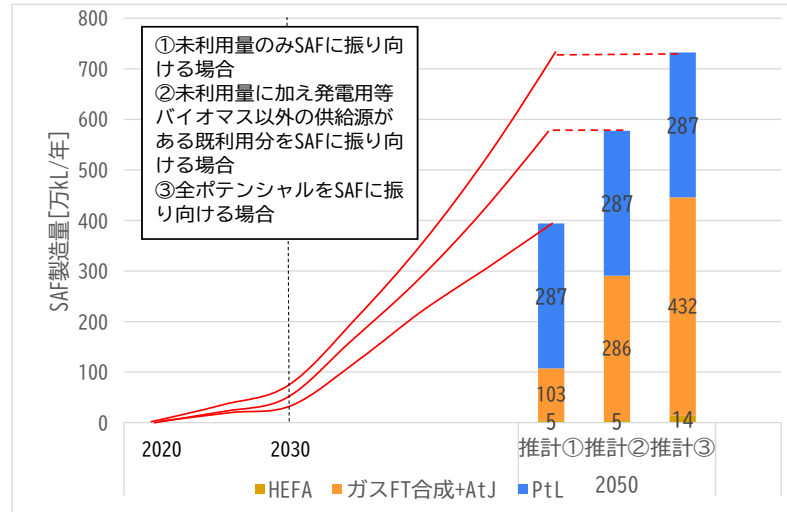


図 19 我が国における SAF の製造ポテンシャル

b. 本邦エアラインの国際線の外地給油分における SAF の供給ポテンシャル

SAF の外地給油量については、世界全体の SAF 供給量に本邦エアラインの外地給油によるジェット燃料消費量が世界全体のジェット燃料消費量に占める割合を乗じることにより算定した。

前者については、ATAG Waypoint2050 において 2050 年カーボンニュートラルを達成するために必要とされている SAF 供給目標量を用いた。具体的には、SAF の中位シナリオ(F2)のカーブから各年の目標量を読み取った。なお、2050 年の目標量は 4.75 億 kL とされている。

後者については、2019 年の世界全体のジェット燃料消費量約 3.96 億 kL²⁵ に対し、本邦エアラインの外地給油によるジェット燃料消費量が約 304 万 kL²⁶ であることから、約 0.77% となる。本推計では、本邦エアラインは、海外の SAF についてこの割合で調達するものと仮定した。

また、SAF の種類別の導入量の内訳比率は国内における SAF の供給ポテンシャル推計③と同じとし、2050 年以降の導入量は横ばいであると仮定した。

c. SAF による CO2 削減率

足下の CO2 削減率については、運輸総合研究所及び三菱総合研究所「我が国における SAF の普及促進に向けた課題・解決策」において試算したライフサイクル GHG 削減率(表 18)を採用した。ATAG Waypoint2050 においては、2050 年における平均削減率を 100% としていることから、全ての製造種について表 18 の削減率が足元から 2050 年に削減率 100% となるよう段階的に改善していくものと仮定した。

²⁵ IEA World Energy Statistics and Balances

²⁶ 航空輸送統計年報(令和元年(2019年))

表 18 SAF 種類別のライフサイクル GHG 削減率

製造種 原料種	HEFA		ガス化 FT 合成、AtJ				ガス化 FT 合成		PtL CO ₂ ・水素
	廃棄 油脂	主産物 (油糧作物)	農業 残渣	森林 残渣	製材 残渣	建設発 生木材	一般 廃棄物	産業 廃棄物	
ライフサイクル GHG 削減率	84%	75%	67%	91%	91%	91%	75%	75%	69%

※化石ジェット燃料の排出量は 89 g-CO₂/MJ。CORSIA 既定値等を用いて算出(製材残渣、建設発生木材は森林残渣の既定値)。廃棄物の NBC(Non-biogenic carbon)は 10%とした。

4) SAFによるCO2削減量の将来推計

3)に記載の方法より推計した、本邦エアラインのSAF導入によるCO2削減量(国内給油分)の将来推計を図20に、CO2削減量(外地給油分)の将来推計を図21に示す²⁷。なお、後述するとおりCO2排出パスは国際線旅客/国内線旅客/貨物毎に作成しているが、SAFの削減効果については、各年において推計されたジェット燃料消費量の比率で按分するものとした。

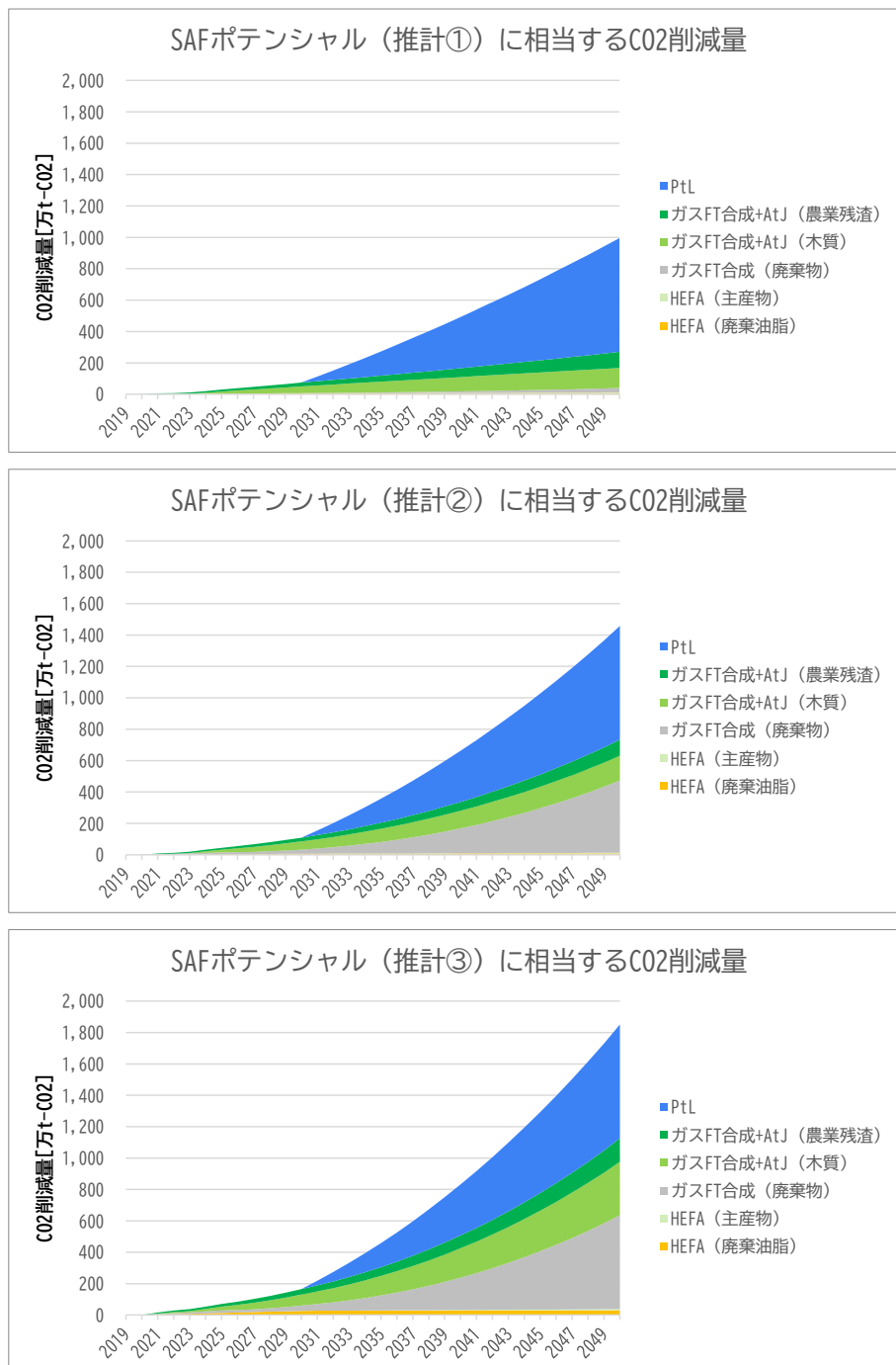


図20 本邦エアラインのSAF導入によるCO2削減量(国内給油分)の将来推計(万トン-CO2)

²⁷ 前述のとおり本推計では2050年以降のポテンシャルは一定としており、図中では省略している。

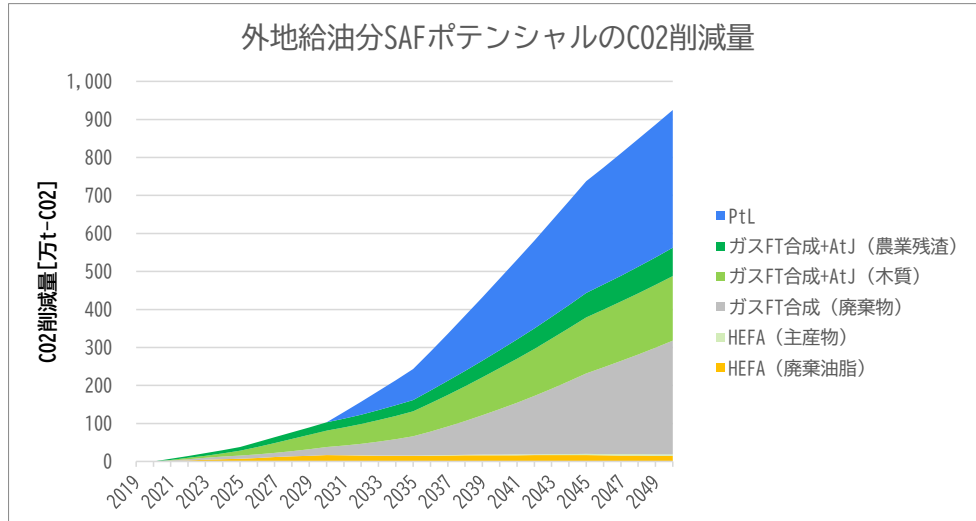


図 21 本邦エアラインの SAF 導入による CO2 削減量(外地給油分)の将来推計(万トン-CO2)

(5) 航空技術・運航技術・SAF 導入後の CO2 排出量の将来推計

航空技術、運航技術及び SAF の各ケースを組み合わせた表 19 の 9 ケースを対象とし、各ケースにおける本邦エアラインの CO2 排出量の将来推計を図 22、図 23 及び図 24 に示す。

表 19 CO2 排出パスの推計ケース全体像

ケース組み合わせ名	航空技術・運航技術	SAF
A-1	A 機材コンポーネントの更新+運航改善	SAF 推計①
A-2	A 機材コンポーネントの更新+運航改善	SAF 推計②
A-3	A 機材コンポーネントの更新+運航改善	SAF 推計③
B-1	B 新概念+電動化+運航改善	SAF 推計①
B-2	B 新概念+電動化+運航改善	SAF 推計②
B-3	B 新概念+電動化+運航改善	SAF 推計③
C-1	C NB 機への水素航空機導入追加+運航改善	SAF 推計①
C-2	C NB 機への水素航空機導入追加+運航改善	SAF 推計②
C-3	C NB 機への水素航空機導入追加+運航改善	SAF 推計③

前述のとおり、SAF は 2050 年で国内ポテンシャル全量が導入される想定のため 2050 年以降は各ケース共に CO2 排出量が増加するパスとなっているが、藻類等は考慮しておらず、PtL は追加のポテンシャルがある可能性がある。

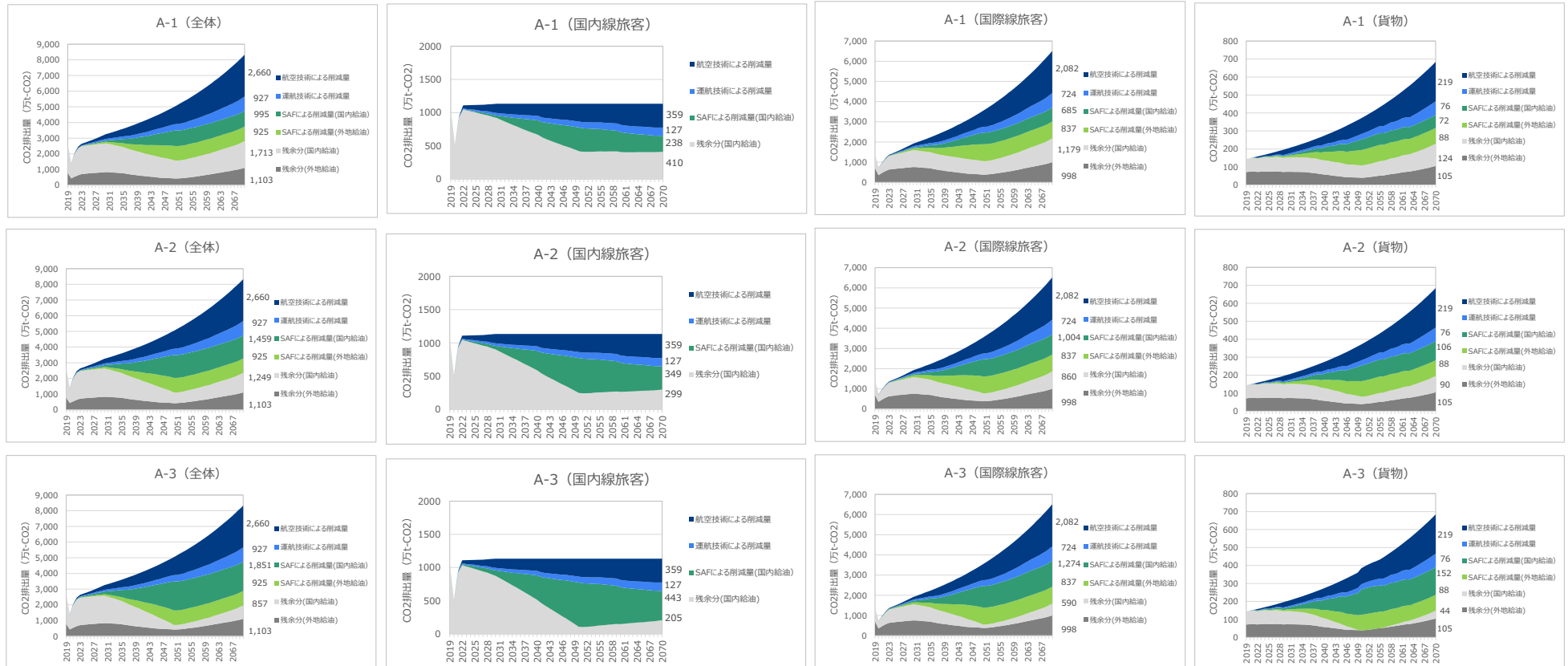


図 22 本邦エアラインの CO2 排出量の将来推計(ケース A. 機材コンポーネントの更新 × SAF 推計①~③)

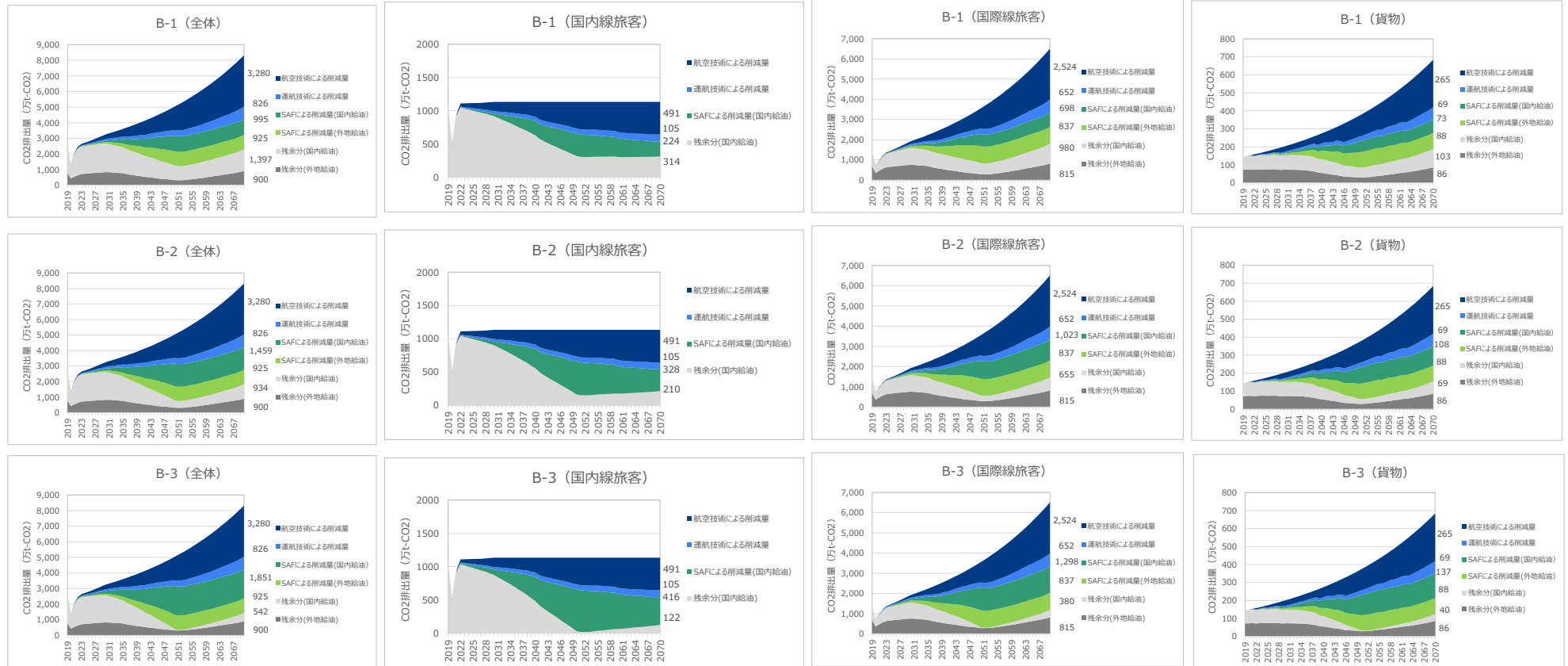


図 23 本邦エアラインの CO2 排出量の将来推計(ケース B 新概念+電動化 × SAF 推計①~③)

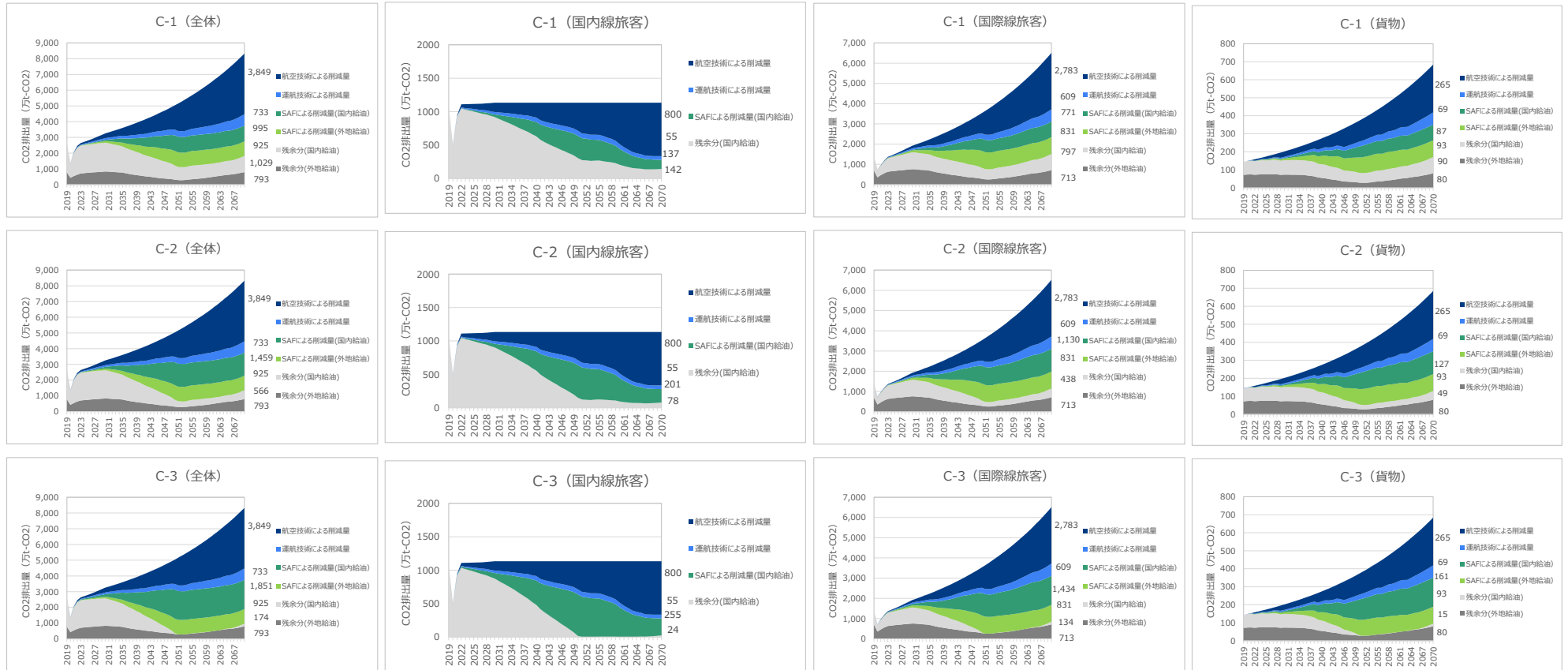


図 24 本邦エアラインの CO2 排出量の将来推計(ケース C. NB 機への水素航空機導入追加 × SAF 推計①~③)

(6) 総括

2030年、2050年及び2070年におけるベースケースのCO₂排出量、航空技術、運航技術及びSAFの導入による削減量並びに残余分をまとめると表20のとおり。

表20 2030年、2050年及び2070年におけるCO₂排出パス

単位[万t-CO ₂]	2030年	2050年	2070年
ベースケース 排出量	3,254	5,038	8,323
航空技術 削減量	299 (9%)	1,146~1,545 (23~31%)	2,660~3,849 (32~46%)
運航技術 削減量	112 (3%)	360~401 (7~8%)	733~927 (9~11%)
SAF 削減量	177~268 (5~8%)	1,920~2,775 (38~55%)	1,920~2,775 (23~33%)
(国内給油)	74~165 (2~5%)	995~1,851 (20~37%)	995~1,851 (12~22%)
(外地給油)	103 (3%)	925 (18%)	925 (11%)
残余分	2,574~2,665 (79~82%)	358~1,571 (7~31%)	966~2,816 (12~34%)
(国内給油)	1,742~1,833 (54~56%)	45~1,148 (1~23%)	174~1,713 (2~21%)
(外地給油)	832 (26%)	313~423 (6~8%)	793~1,103 (10~13%)

航空技術については、2030年、2050年及び2070年のいずれにおいても、削減量の割合が大きい。特に、図25に示すとおり、ATAG Waypoint2050における、航空技術による2050年の排出削減量が全体に占める割合(12~34%)と概ね同じ結果となった。(3)3において考察したとおり、国際線については特にケースA(機材コンポーネントの更新)、国内線については、加えてケースC(特に2050年以降の水素航空機の導入)による削減効果が高く、全体としては、特にケースA(機材コンポーネントの更新)による削減効果が高い。既に、これらの技術を含む国産の環境技術の実証が進められる予定²⁸であるが、本推計結果も踏まえ、我が国航空分野からの長期的な排出削減に向けて、より注力すべき技術や機種種の検討を戦略的に行うことが重要であると考えられる。

運航技術についても、ATAG Waypoint2050のシナリオ(7~10%)(図25参照)と概ね同じ結果となった。引き続き、工程表及びCARATSの目標達成に向けた取組みを進めることが重要となる。

SAFについては、特に2050年に至るまでの削減量の割合が大きいが、ATAG Waypoint2050のシナリオ(53~71%)(図25参照)とは差異がある。この差異の要因としては、本推計は国産原料のポテンシャル等に基づく推計値である一方で、ATAG Waypoint2050におけるSAFのシナリオは2050年ネットゼロ目標を達成するためのバックキャストによる目標値であること、下記1)において推計方法に関する留意点として示した事項等が挙げられる。本推計結果及び「我が国におけるSAFの普及促進に向けた課題・解決策」も踏まえ、国産原料による国産SAFの導入に向けた取組みを促進することに加え、輸入原料による国産SAF及び輸入SAFの導入並びに外地におけるSAFの導入についても取組みを強化していくことが重要となる。

また、将来の航空分野のカーボンニュートラルを念頭に置くと、これらの対策を講じた上で、残る排出

²⁸ 国土交通省航空局、第3回航空機運航分野におけるCO₂削減に関する検討会「資料1 事務局説明資料」(2021年10月)、<https://www.mlit.go.jp/common/001427236.pdf>

量については、炭素クレジットを活用したオフセットを行う必要がある可能性がある。

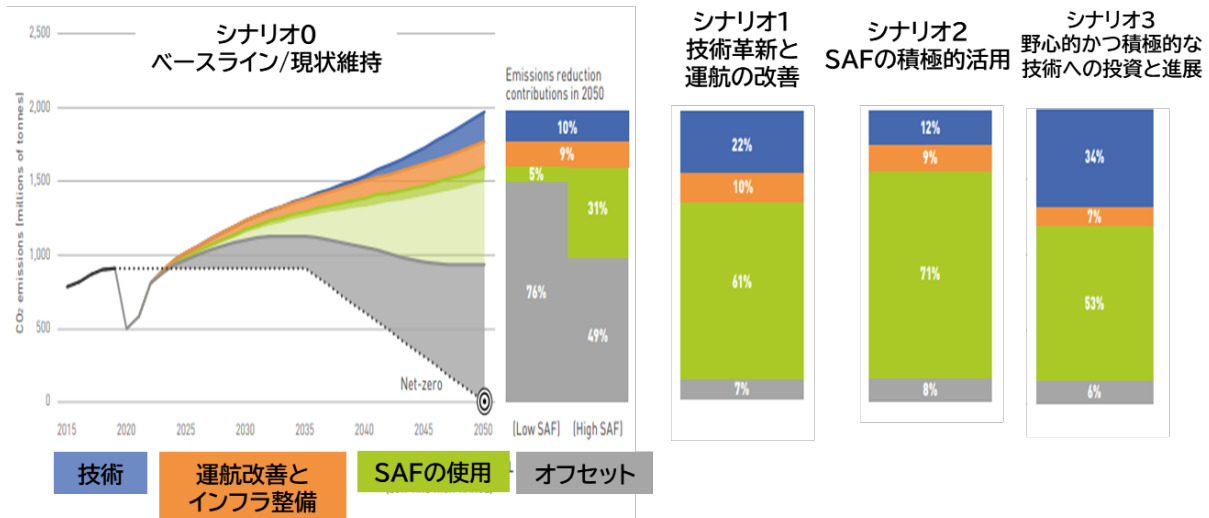


図 25 ATAG Waypoint2050 における 2050 年ネットゼロに向けたシナリオ

ただし、本推計は、下記に示すとおり、様々な仮定の下で行ったものであり、これらの要因に留意する必要がある。特に推計方法については、2022 年秋の ICAO 総会において、CAEP LTAG-TG の検討結果が公表される予定であり、当該検討結果については、今後我が国が目標や対策を検討する上での基本的な方針となると考えられることから、これを踏まえて、推計方法の改良を検討することが重要であると考えられる。

また、本推計結果を踏まえ、インフラ整備の必要性やコスト・投資の分析を行うことにより、我が国航空分野の長期的な排出削減の実現に向けた更なる課題を洗い出すことが重要であると考えられる。

1) 本推計における留意点

a. 機材リストについて

(2)で述べたとおり、今回の検討では、本邦エアラインが保有している機材の一覧の作成に当たって、各国航空局やエアラインのウェブサイト情報を元にとりまとめられたデータを用いた。当該データは非公式のものであることから、各エアラインが保有する機材の実態と完全に整合していない可能性がある点に留意する必要がある。

b. 機材別の燃料消費量の推計について

(2)で述べたとおり、機材の燃料消費量原単位の推計式を導出する際には、限定的なサンプルデータを用いたこと、離陸重量と最大離陸重量が、国際線と国内線でそれぞれ設定される一定の係数による比例関係にあることを仮定した点に留意する必要がある。

c. 機材タイプの構成比率について

(2)で述べたとおり、将来の機材タイプ(ワイドボディ機、ナローボディ機、リージョナル機、ターボプロップ機)の構成比率に関しては、2070年にかけて変化がないものと仮定して分析を行っている。航空技術による削減効果は、機材タイプ別に設定しているため、これらの構成比率が変化すると、削減量の推計結果も異なるものとなる。

例えば、仮に機材タイプが長期的にワイドボディ機からナローボディ機に移行することが想定される場合には、ナローボディ機への水素航空機の導入による削減効果がより大きくなる。

d. 航空技術の導入について

今回の推計では、機材の更新時に、全ての機材が次世代の技術を導入するものと想定し、また、機材コンポーネントの更新については、機材タイプによらず一定の削減率が適用されるものと仮定した。機材の更新時に、どの機材タイプにどの程度の次世代機材が選定されるのか実態を勘案し精査した上で、導入される技術による削減量を反映する必要がある点が今後の課題として挙げられる。

e. 完全電動化航空機・水素航空機による間接排出について

(3)で述べたとおり、今回の推計においては、完全電動化航空機、水素航空機により消費される電力及び水素の製造等に由来する間接排出分を考慮せず、これらのエネルギー源からの排出をゼロとして推計した。一方、SAF に関してはライフサイクル全体での排出量を考慮して計算しており、電力及び水素についても同様の取扱いとすることが望ましいと考えられ、国際的な議論も注視しつつ、今後の課題として整理する必要があると考えられる。

f. 運航技術による削減効果について

(3)で述べたとおり、運航技術の削減効果については、「航空機運航分野における CO₂ 削減に関する検討会」でとりまとめられた管制の高度化による運航方式の改善に係る工程表等に基づく「今後の取組において10%程度のCO₂削減を目指す」という目標を踏まえ、年率0.35%の削減率を設定した。

CARATS の施策による削減率については、各施策の積み上げ(及び積み上げの際の二重計上分の排除)によって精緻化できる可能性がある。また、CARATS には、エアライン単独で実施する運用改善対策が含まれておらず、当該対策による削減率の検討が今後の課題として考えられる。

g. SAF の供給ポテンシャルについて

(4)で述べたとおり、SAF の供給ポテンシャル(国内給油分)は、運輸総合研究所及び三菱総合研究所「我が国における SAF の普及促進に向けた課題・解決策」の推計結果を用いて推計した。

この推計においては、藻類バイオマス、未利用の低質廃棄油脂、海外から輸入することを念頭においた廃棄油脂、PFAD・POME 等を原料とする SAF や輸入 SAF(ニート又は混合後)を含まず、また、PtL については、2030年時点の水素の製造ポテンシャルを用いて推計しているが、2050年にかけて増加が見込まれる水素を活用した合成燃料の製造も考えられる点に留意する必要がある。

SAF の供給ポテンシャル(外地給油分)については、ATAG Waypoint2050 の中位シナリオを用い、また、本邦エアラインがジェット燃料と同じ割合で海外での給油を行うと仮定した。

また、国内給油、外地給油ともに、2050 年以降の供給量は一定であると仮定した。ライフサイクル GHG 削減率については、2050 年に 100%となるよう段階的に改善していくものと仮定した。

そのため、未推計の国産原料、輸入原料等を用いた国産 SAF の製造促進に取り組むとともに、世界本邦エアラインが積極的に海外での SAF の調達(国内に輸入しての国内給油又は外地給油)を行うことにより、SAF による削減量がより大きくなる可能性がある。

h. 推計で用いた方法論について

本検討においては、ATAG Waypoint2050、IATA 技術ロードマップ等の先行研究を参考に推計を行った。

一方、CAEP LTAG-TG では、Technology(航空技術)、Operation(運航技術)及び Fuel(燃料)の 3 分野の対策(in-sector)について分析が行われており、2022 年秋の ICAO 総会において検討結果の公開が予定されている。当該検討結果については、今後我が国が目標や対策を検討する上での基本的な方針となると考えられることから、これを踏まえて、推計方法の改良を検討することが重要であると考えられる。

2) 本推計を活かしたその他の検討可能性

a. インフラ整備の必要性の分析

今回の推計の対象とした、航空技術や SAF に関する対策においては、新コンセプトや水素航空機の導入に必要な空港側のインフラ整備、SAF の導入に必要なプラントやサプライチェーンに要するインフラ等新たなインフラ整備が必要となることが想定される。長期的な排出削減を実現するために必要なインフラ整備を予め想定しておくことは、今後の CO2 削減に向けた課題を特定する上で有用と考えられる。

b. コスト・投資の分析

CAEP LTAG-TG では、コストや投資についても分析を行っている。²⁹具体的には、資本コスト、インフラコスト、燃料コスト(コスト削減)、資産価値の減少、R&D コスト、メーカーによる開発費用(NRC: ノン・リカリング・コスト)等について分析が行われており、CAEP LTAG-TG の検討結果を参考に、我が国における長期的な CO2 削減の実現のために想定されるコストや投資について分析することも重要であると考えられる。

²⁹ https://www.icao.int/Meetings/2021-ICAO-LTAG-GLADS/Documents/LTAG-GLADs_Day-1_2-Progress-of-ICAO-work-on-LTAG.pdf