

#27「電動航空機」

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 航空技術部門
次世代航空イノベーションハブ エミッションフリー航空機技術チ
ーム
西沢啓

再配布やWEBサイトへの転載等は固くお断りします



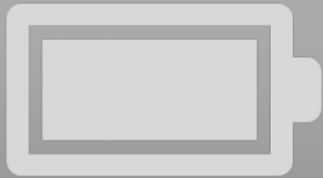
輸送需要の増加

今後20年間で 約**2倍**



CO₂ 排出量削減目標

2050年に2005年比で **半減**



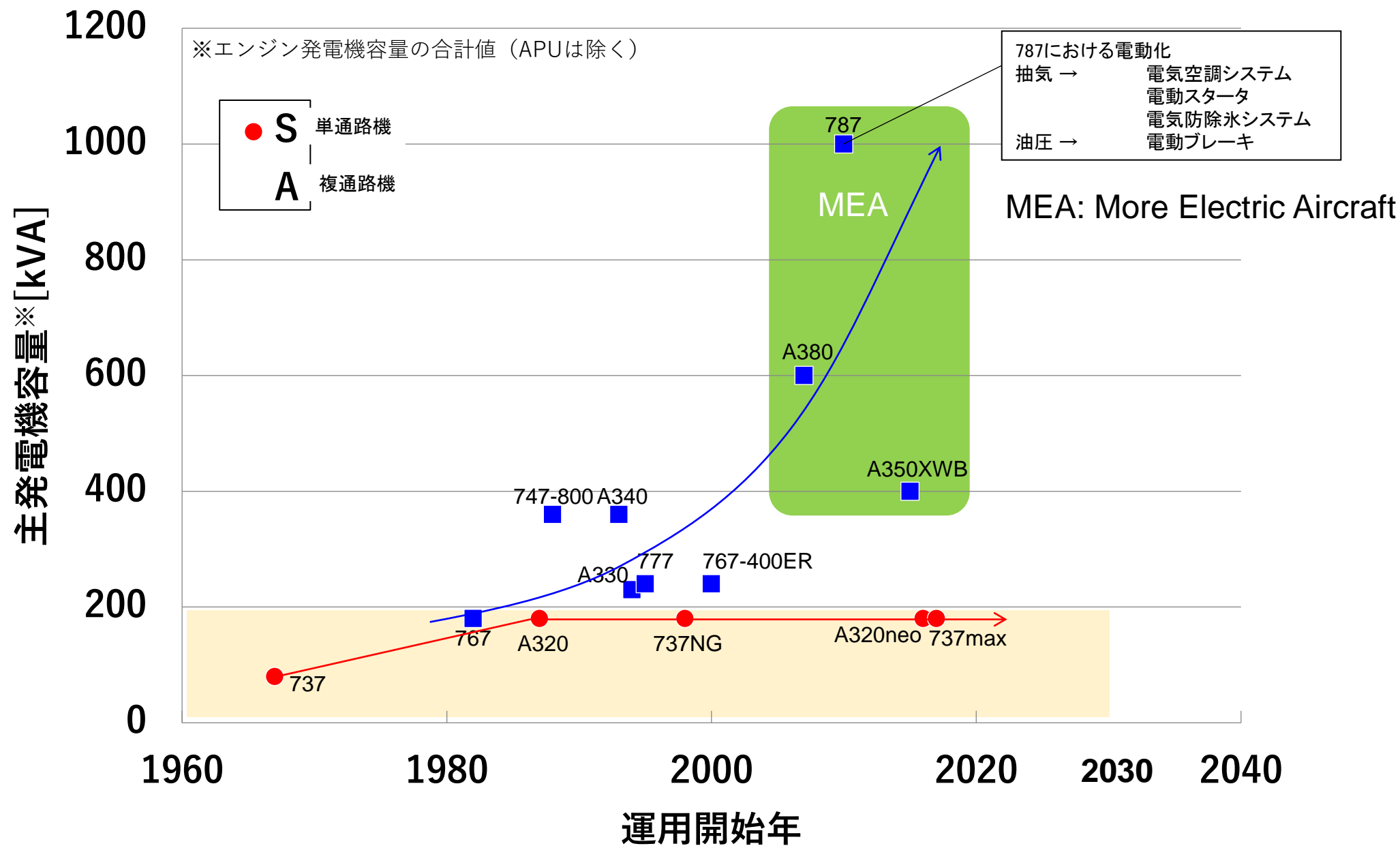
電動化の進歩

(小型機であれば推進系の電動化が可能なレベルに到達)

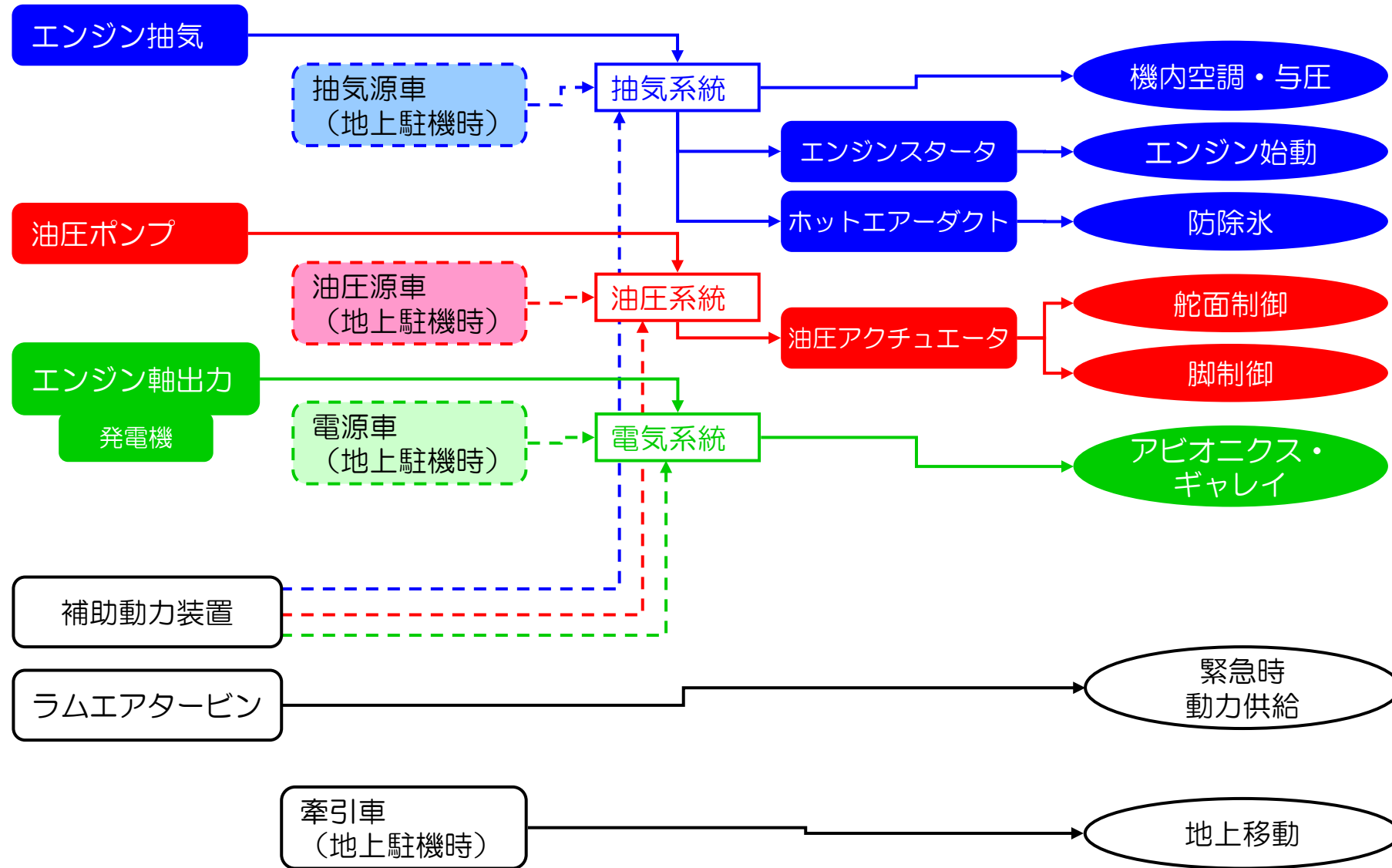
推進系出力規模(kW)は過去20年間で **20倍**

	装備品の電動化	エンジンの電動化（電動航空機）	
	MEA (More Electric Aircraft)	小型電動航空機 (personal aerial vehicle)	電動旅客機
本資料における定義	推進系以外の装備システムを電動化した航空機	推進系を電動化した小型航空機	推進系を電動化した旅客機
目的・意義	<ul style="list-style-type: none"> ✓システム効率向上による数%程度の燃費削減効果 ✓抽気・油圧系統の排除によるシステム簡素化 ✓設計自由度、整備性の向上 	<ul style="list-style-type: none"> ✓運航コスト（主に燃費と整備費）の大幅な削減 ✓運用容易性の向上 ✓空のパーソナルモビリティ（オンデマンドモビリティ）実現 	<ul style="list-style-type: none"> ✓航空機由来のCO₂排出量削減 ✓運航コスト（主に燃費と整備費）の大幅な削減
代表例	Airbus A380, Boeing787	eFlyer, Volocopter	Airbus E-thrust

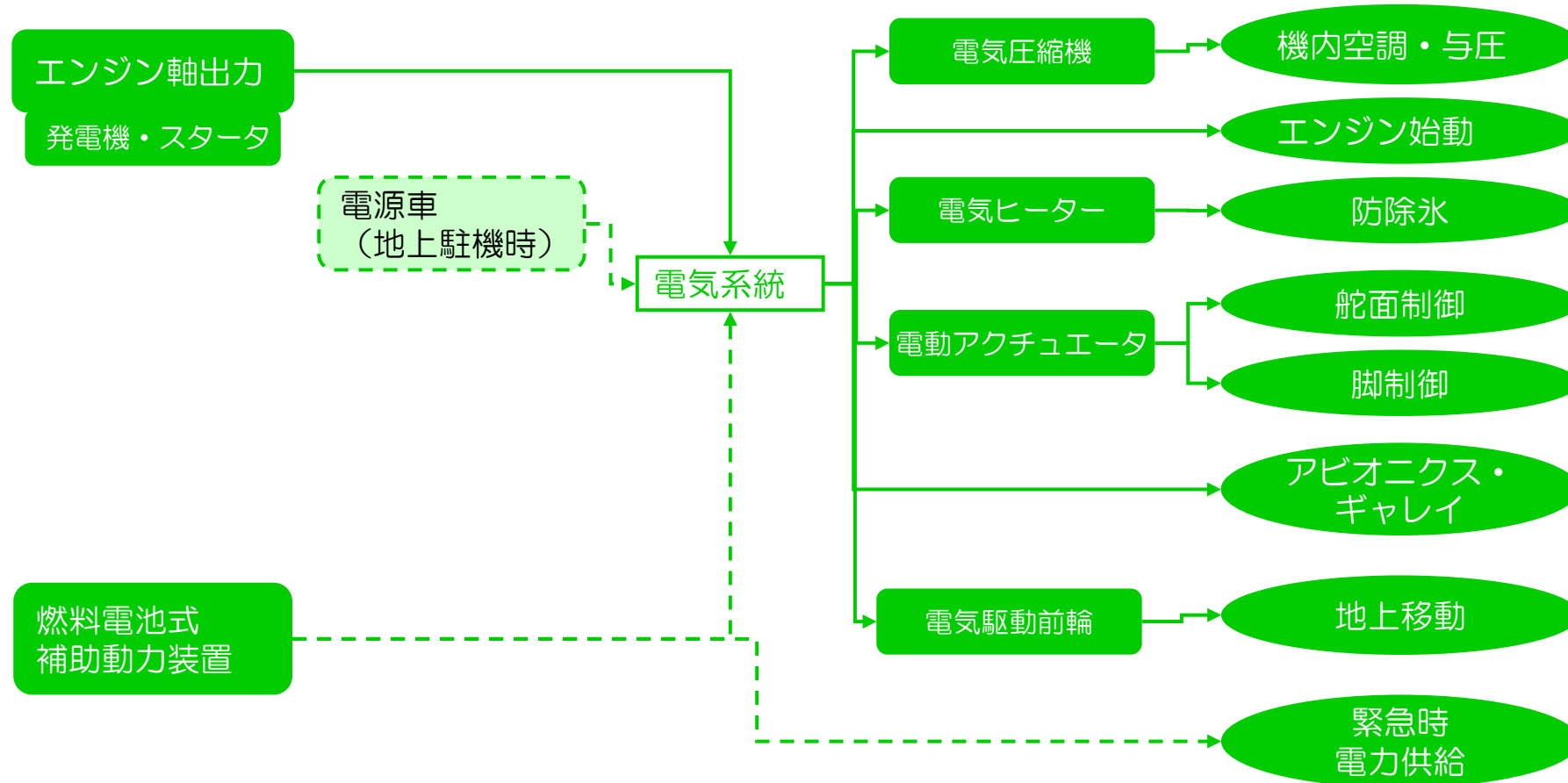
MEA (More Electric Aircraft) の動向



MEAと従来航空機システムの違い

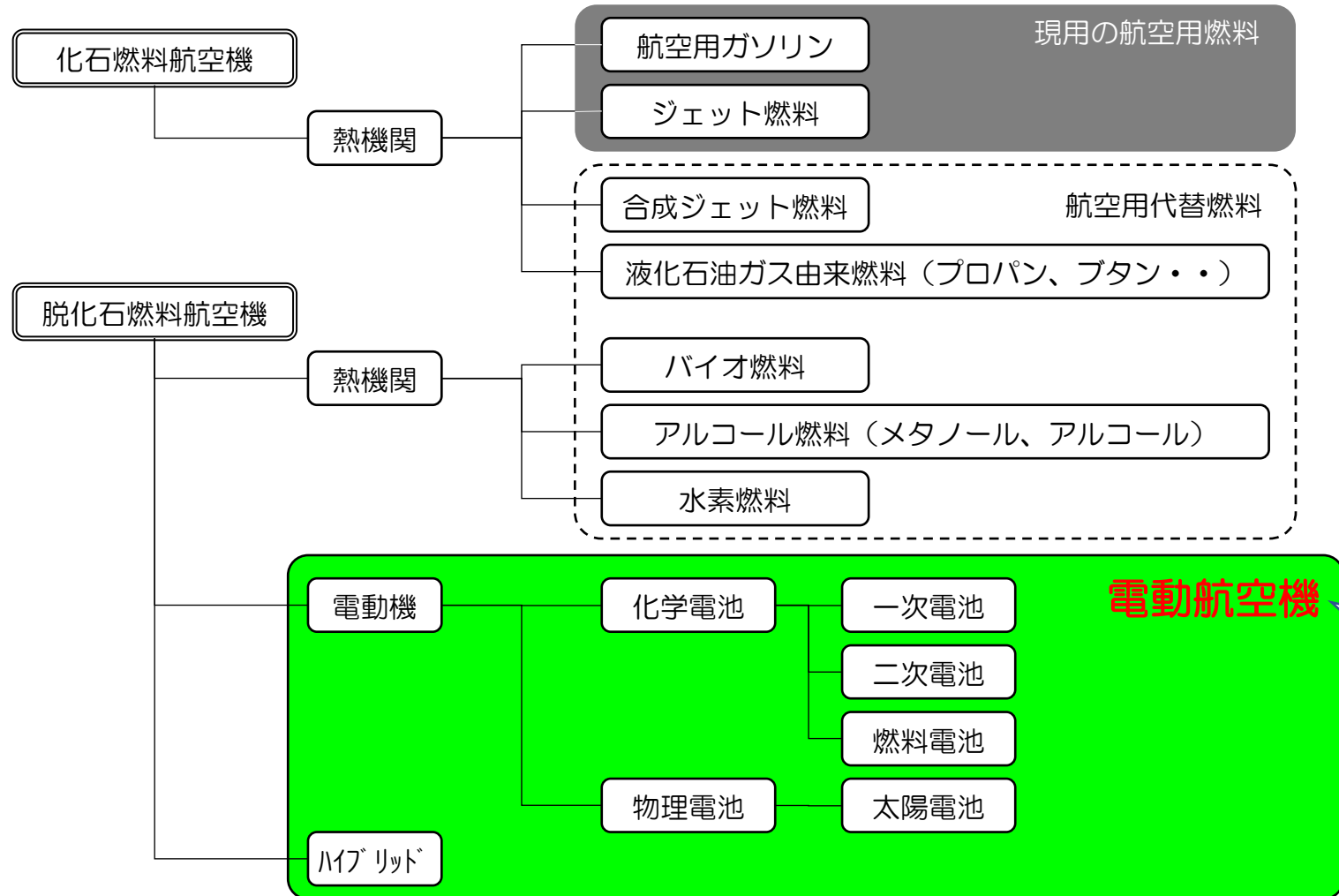


従来型の航空機システム



More Electric Aircraft (MEA) のシステム

推進系の電動化（電動航空機）

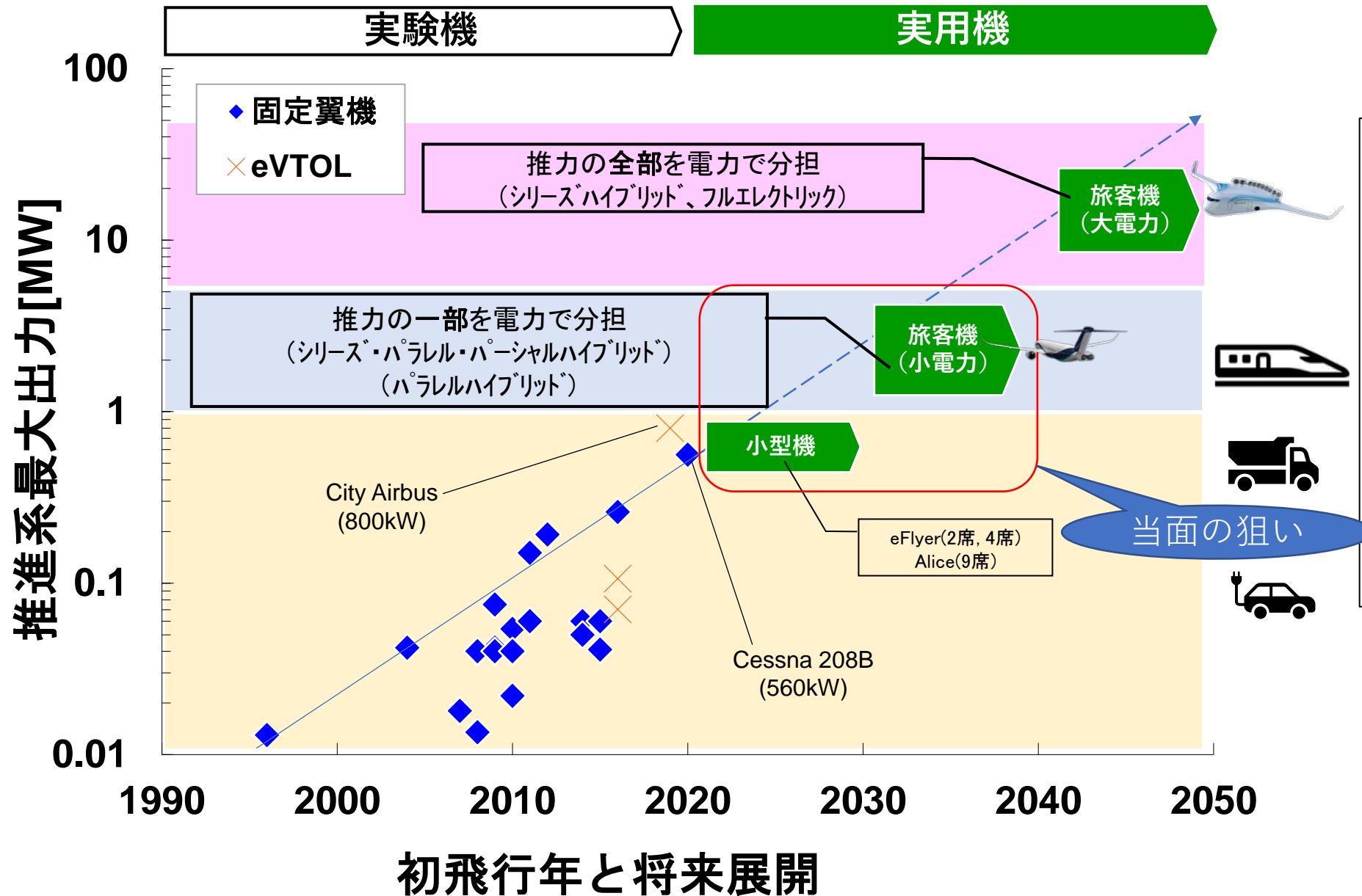


ハイブリッドエンジン
も含めて、推進系まで
電動化した航空機

出典：航空宇宙学会誌 2010年10月号「えあろすぺーすABC 基礎・応用編 脱化石燃料航空機」岡井・西沢

- 脱化石燃料化の選択肢は多数。技術的難易度、効果、適用対象に大きな違いあり

電動航空機の動向



- ここ数年のeVTOLの進歩が目覚ましい
- 小型機ではMWに迫る出力達成
- 旅客機推力の部分電動化に適用可能な要素技術が揃い始めた

航空産業の経済的価値(2017)※1

※1 Source: "AVIATION BENEFITS BEYOND BORDERS", AIR TRANSPORT ACTION GROUP, 2018

- ① 航空産業がもたらす雇用 6550万人
- ② GDPへのインパクト 2.7兆米ドル/年(全世界のGDP合計の3.6%)
- ③ 航空燃料費用 1490億米ドル/年
- ④ 航空燃料消費量 2億7500万トン/年(全液体燃料消費量の約10%)
- ⑤ CO₂排出量(負の経済効果) 8億5900万トン/年(全世界の人為的排出の約2%)

燃料消費を例えば10%削減することのコスト削減効果
全世界: 149億米ドル/年 = 1兆6000億円/年
国内エアライン※2: 約300億円/年

※2 Source: ANA Annual Report 2018,
<https://www.ana.co.jp/group/en/investors/irdata/annual/>
の年間燃料費用を参考に算出

国内航空会社のCO₂排出権の購入費用は、制度開始当初年間十数億円程度から、2035年には年間数百億円程度に段階的に増加する見込み(2021~26年: 国ごとに自発的参加、2027~35年: 義務的参加) ※3

排出クレジット価格: 2020年時点で6~20米ドル/トン、2030年時点で10~33米ドル/トン

※3 Source: 国土交通省プレスリリース“国際航空分野の温室効果ガス排出削減制度への参加を決定”、2016年9月20日

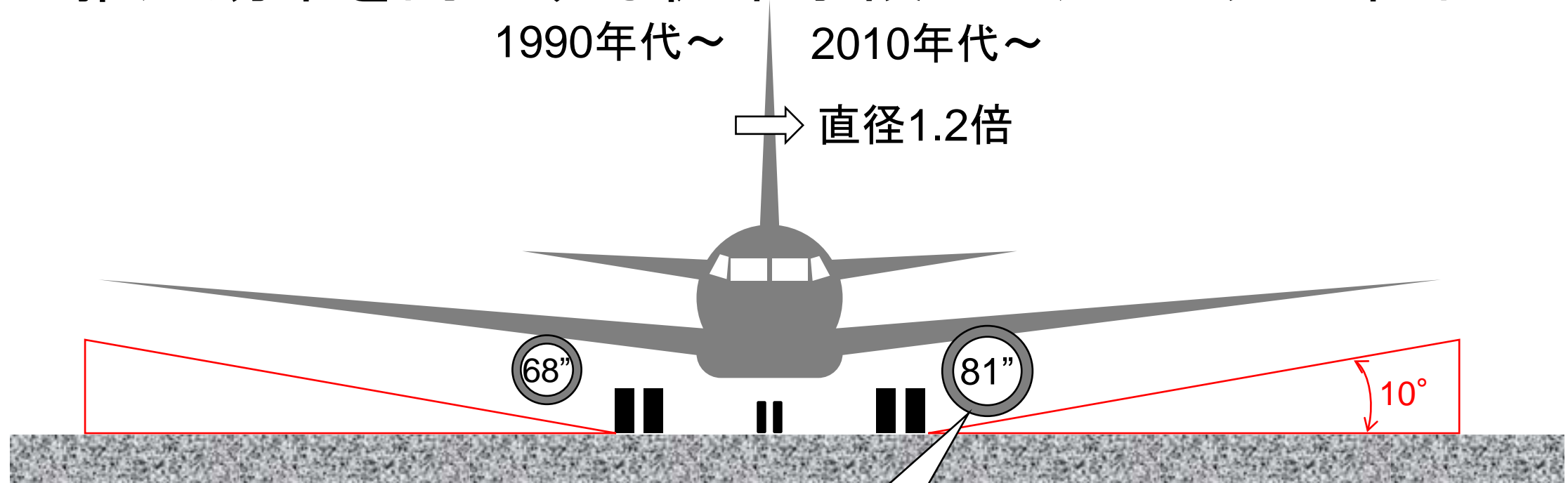
- 航空産業の経済波及効果は大きく、CO₂等の要因で航空輸送が制限される事態は避けたい
- 燃料費とCO₂排出権購入費が二重の負担であり、燃費削減がもたらす経済的効果は高い

推進効率を向上する従来手段＝ファンの大口径化

1990年代～

2010年代～

→ 直径1.2倍

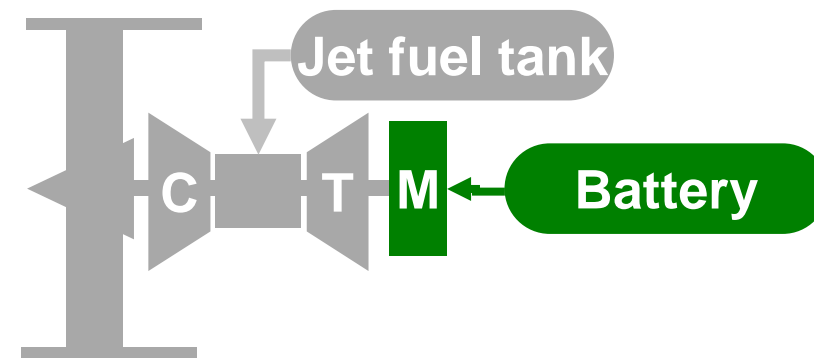
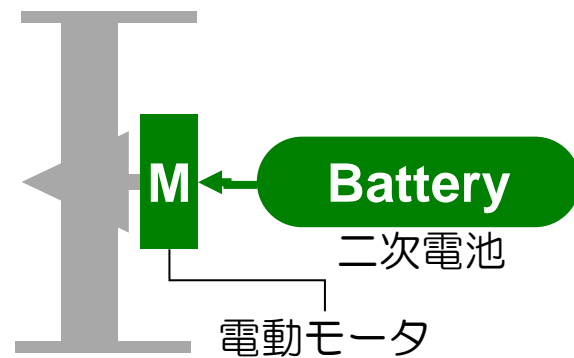
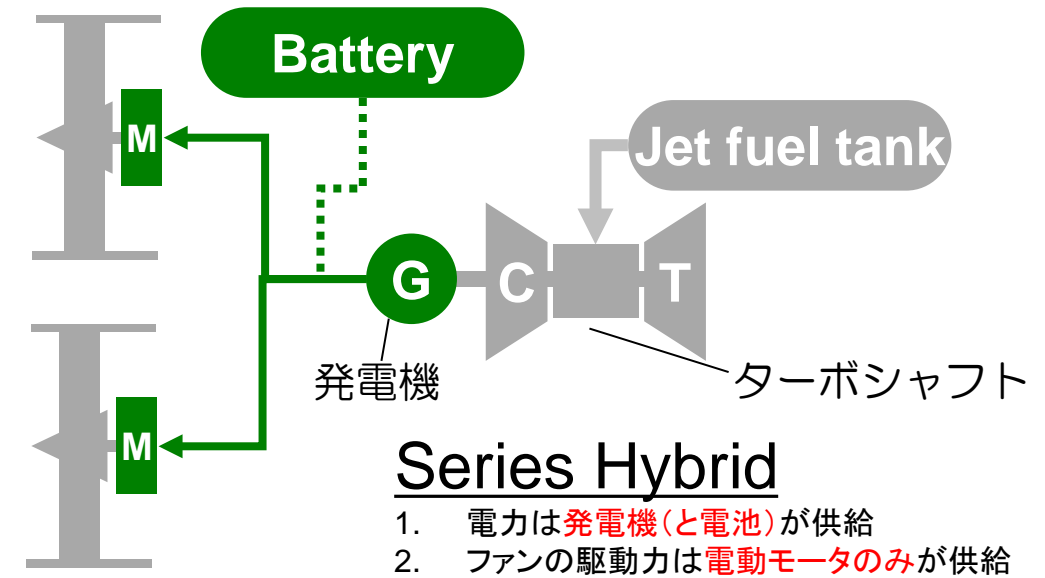
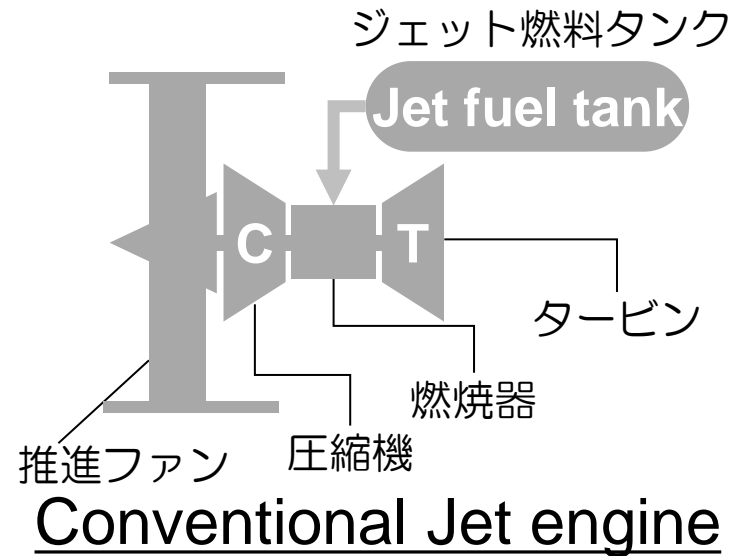


もう大口径化
の限界※

※単通路機(細胴機)

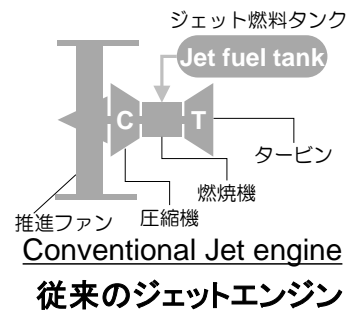
推進系電動化の方式（電動航空機）

電動航空機における推進系の方式 注：減速機や電力変換器等、一部の構成要素は省略して描かれている



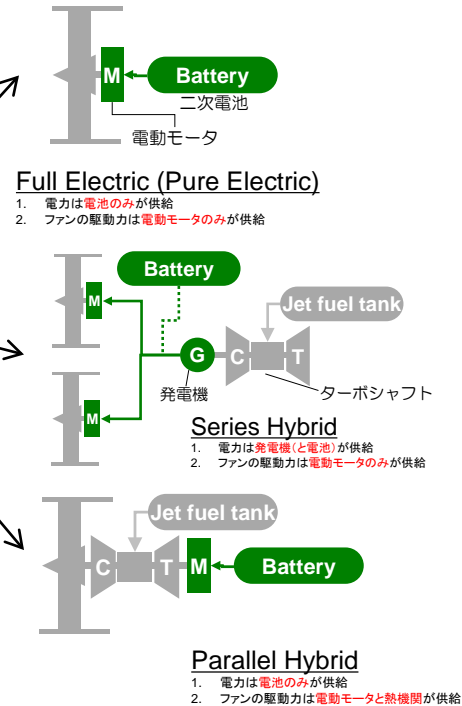
推進系電動化の分類と特徴

注：減速機や電力変換器等、一部の構成要素は省略して描かれている



エンジンの電動化には主に3種類の方式（純電動化、シリーズハイブリッド、パラレルハイブリッド）があり、長所短所が異なる他、推進ファンの個数やレイアウトにも自由度があり、選択肢は多い。

電動化



電動化システム方式の選択肢

電動化システム方式と適用対象の対応

小型プロペラ固定翼航空機
小型VTOL機 (UAM: Urban Air Mobility)
回転翼機

回転翼機
小型ジェット固定翼航空機
リージョナル固定翼航空機 (Turbo Prop & Jet)
ナローボディ旅客機 (細胴機)
ワイドボディ旅客機 (広胴機)

注：上記の分類には例外もある。例えば、旅客機であっても航続距離が短い用途であれば純電動方式が有利になる場合もあり得る。また、適用できる技術のレベル(特に電池の性能)や適用する年代によっても変化する。

- **小型機**で航続距離が短ければ燃費・整備費削減の点で**純電動方式**が最適
- **旅客機**は航続距離が長いのでハイブリッド方式が適する

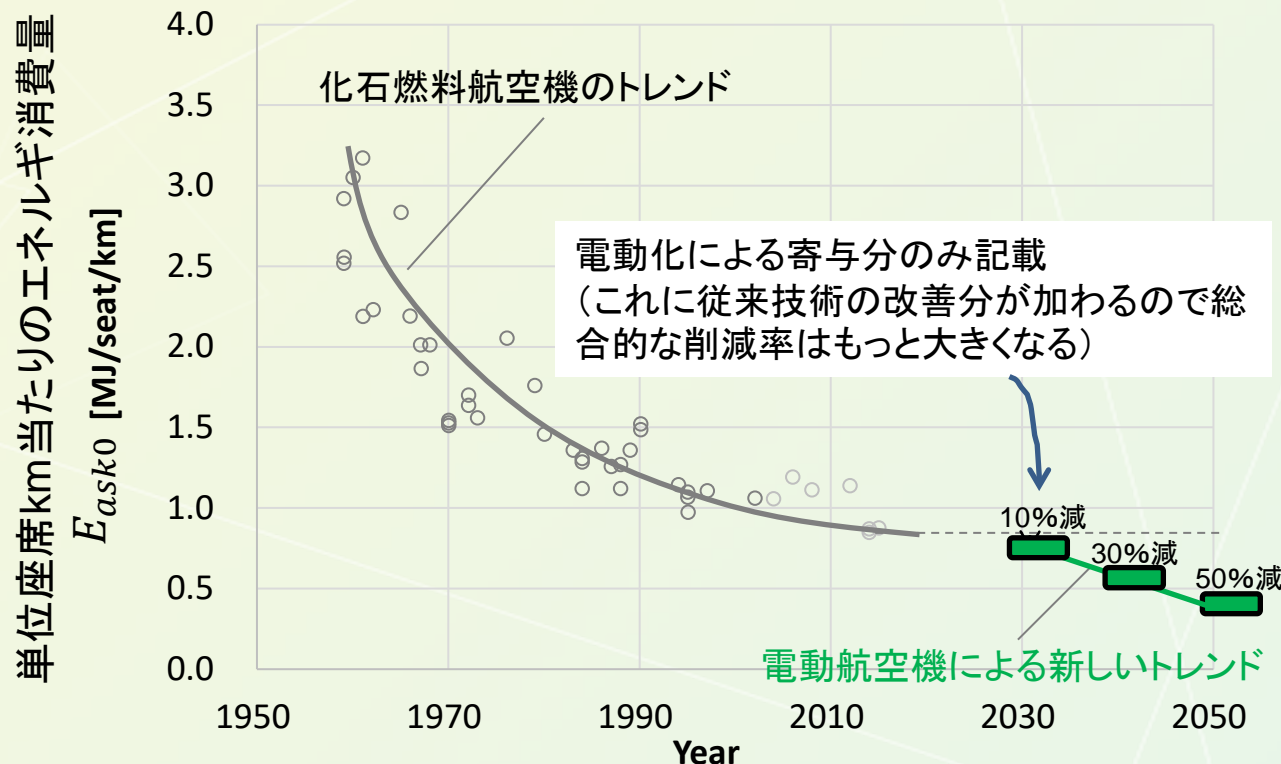
Electrification Challenge for Aircraft



2018年7月「航空機電動化コンソーシアム」を設立

<http://fanfun.jaxa.jp/jaxatv/detail/12230.html>

航空機電動化将来ビジョンにおける燃費削減目標



旅客機における単位エネルギー消費量の推移と開発機の目標

想定する開発機の燃費削減目標

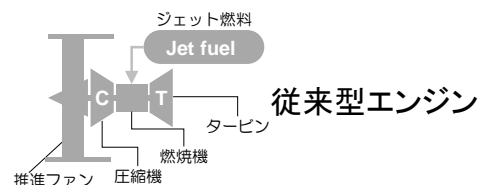
EIS時期	サイズ	燃費削減率
2030年代	細胴機以下	10%
2040年代	全サイズ	30%
2050年代	全サイズ	50%

EIS: Entry Into Service

- 技術リスクが比較的低い細胴機以下のサイズから電動化を開始
- 2040年代には全サイズに適用し電動化による新しいエネルギートレンドへ移行

電動化技術の位置づけ

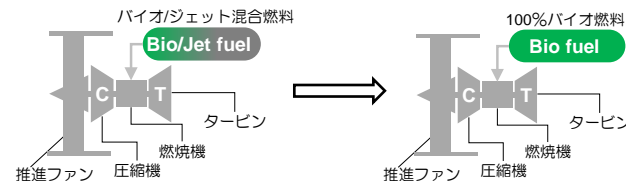
従来技術の改善によるCO₂削減



従来型空力形状
従来型構造材料

次世代技術によるCO₂削減

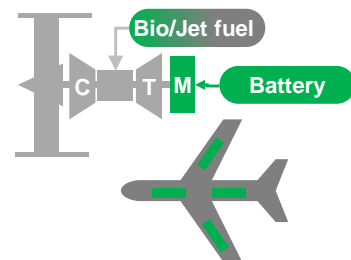
バイオ燃料の導入



電動化

推進系の電動化

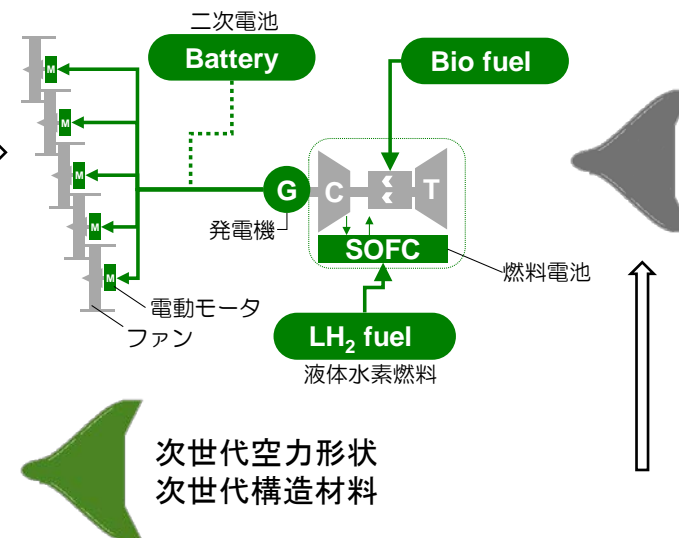
装備品の電動化



電動以外の次世代エンジン

水素燃料の導入

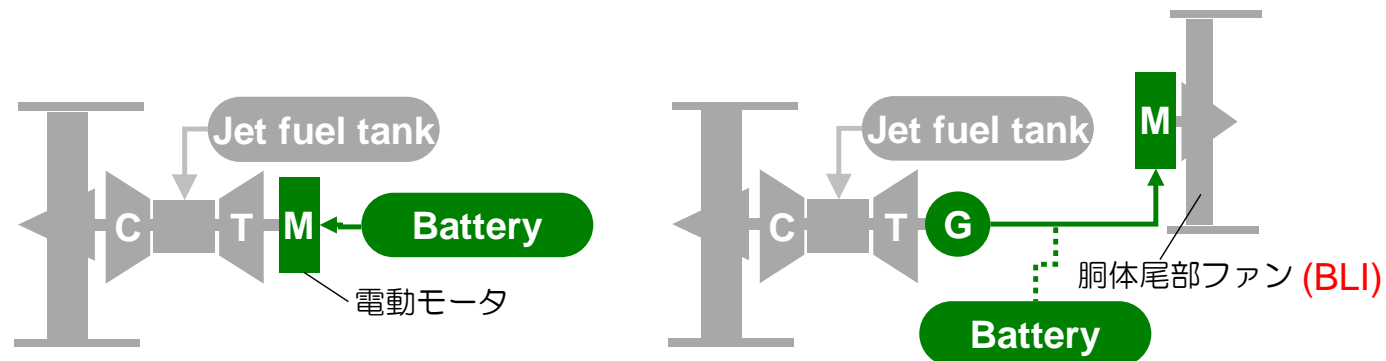
その他の次世代技術



次世代空力形状
次世代構造材料

- 電動化技術は当コンソーシアムにおける直接の研究開発対象
- バイオ燃料、水素燃料、その他の次世代技術を電動化技術と組合せて発展させていくことができる

旅客機に適用し易い初期の電動ハイブリッドシステム

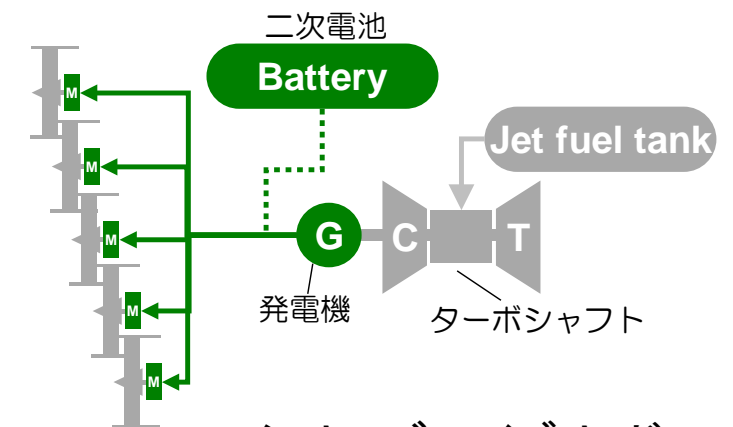


- パラレルハイブリッド
- 双発形態

- シリーズ・パラレル・パーシャルハイブリッド
- 双発＋胴体尾部ファン形態

- ✓ 従来のTube&Wing形態をほぼそのまま踏襲可能
- ✓ 電動化の出力規模を小さく抑えることが可能

比較的高リスクなシステム

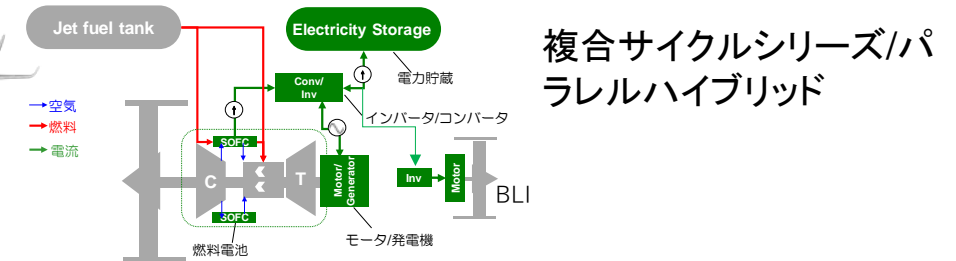
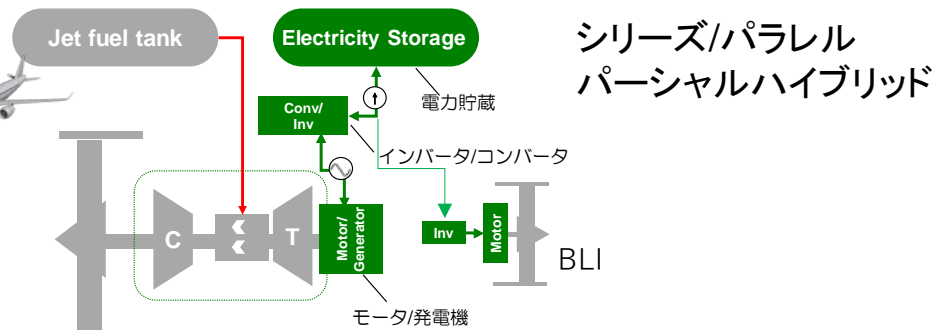
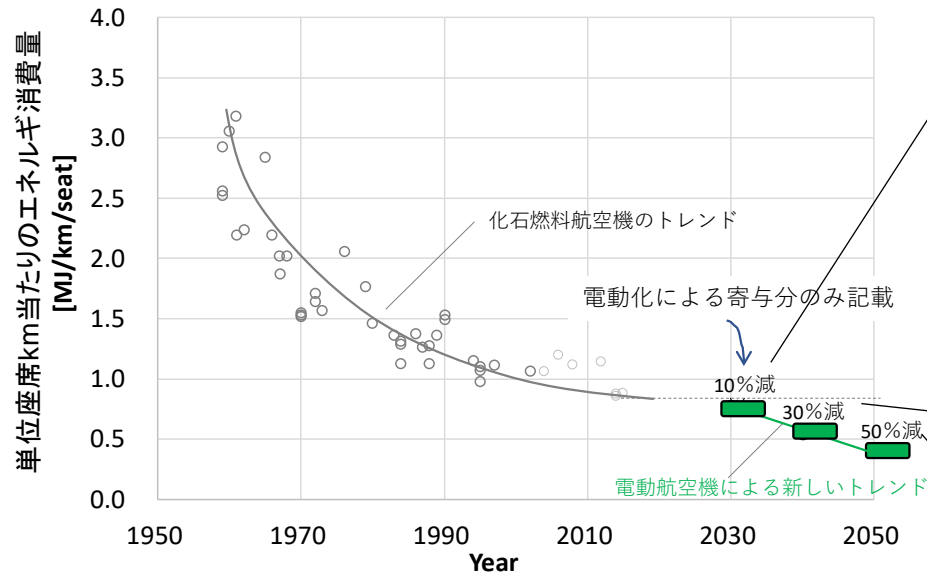


- シリーズハイブリッド
- 多発分散ファン形態

- ✓ 従来のTube&Wing形態から逸脱
- ✓ 電動化の出力規模が最大

- 初期段階の旅客機用電動ハイブリッドシステムとしては、従来のTube&Wing形態を踏襲でき、かつ出力規模も小さく抑えることが可能な**パラレルハイブリッド**や**シリーズ・パラレル・パーシャルハイブリッド**が有力

各方式のエネルギー消費削減への寄与



2030年代:

技術的に導入しやすいパーシャルハイブリッド(電動化率が小さい)が初期段階では有力。エンジン軸動力を電動モータでアシストするパラレルハイブリッドと胴体尾部のBLI※¹(シリーズハイブリッド)が候補となる。機体形態は従来型(Tube&Wing)が有力。

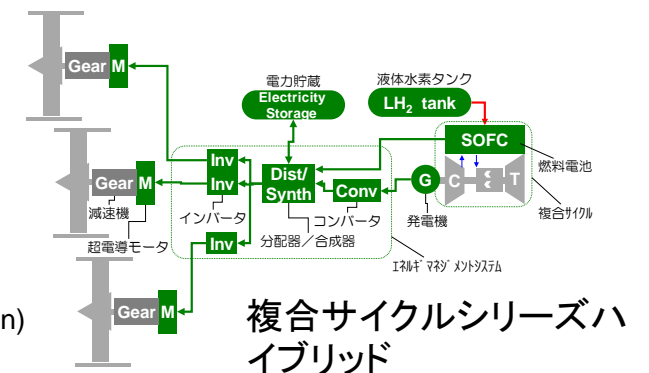
2040年代:

エンジンの熱効率を抜本的に改善する燃料電池とガスタービンの複合サイクルハイブリッド等が候補。エンジン出力に匹敵する電動化率。水素燃料の導入も視野に入るため、機体の形態は従来型とBWB※²等の中間期。

2050年代:

シリーズハイブリッドにより多発分散化を図り、機体の形態もBWB等の革新空力形状を目指す。また、超電導モータ等の革新要素技術導入も視野に。

※¹: BLI(Boundary Layer Ingestion)
※²: BWB(Blended Wing Body)



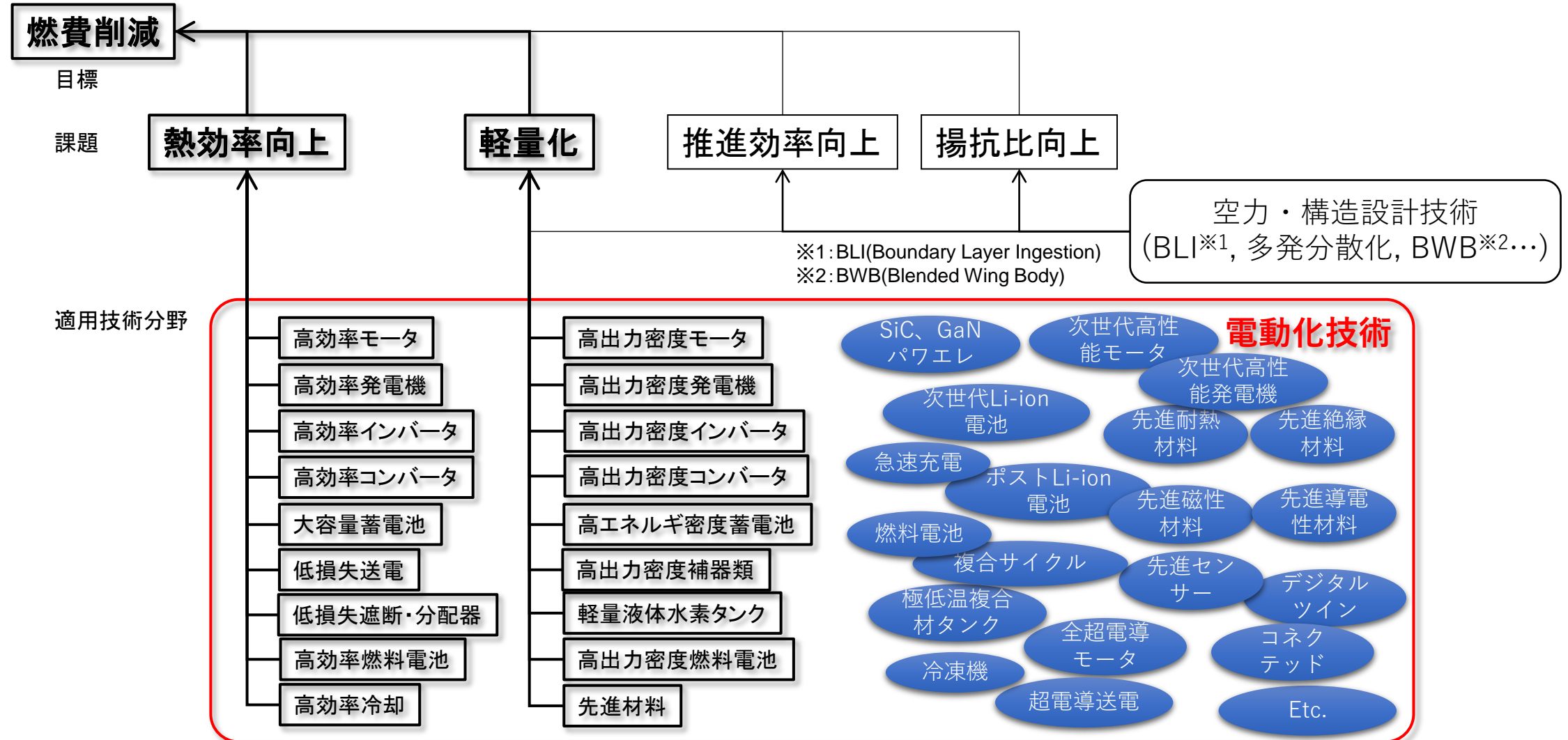
シリーズハイブリッドにより多発分散化を図り、機体の形態もBWB等の革新空力形状を目指す。

また、超電導モータ等の革新要素技術、CO₂フリー水素燃料導入も視野に。



技術マップ (1/2 燃費削減※注)

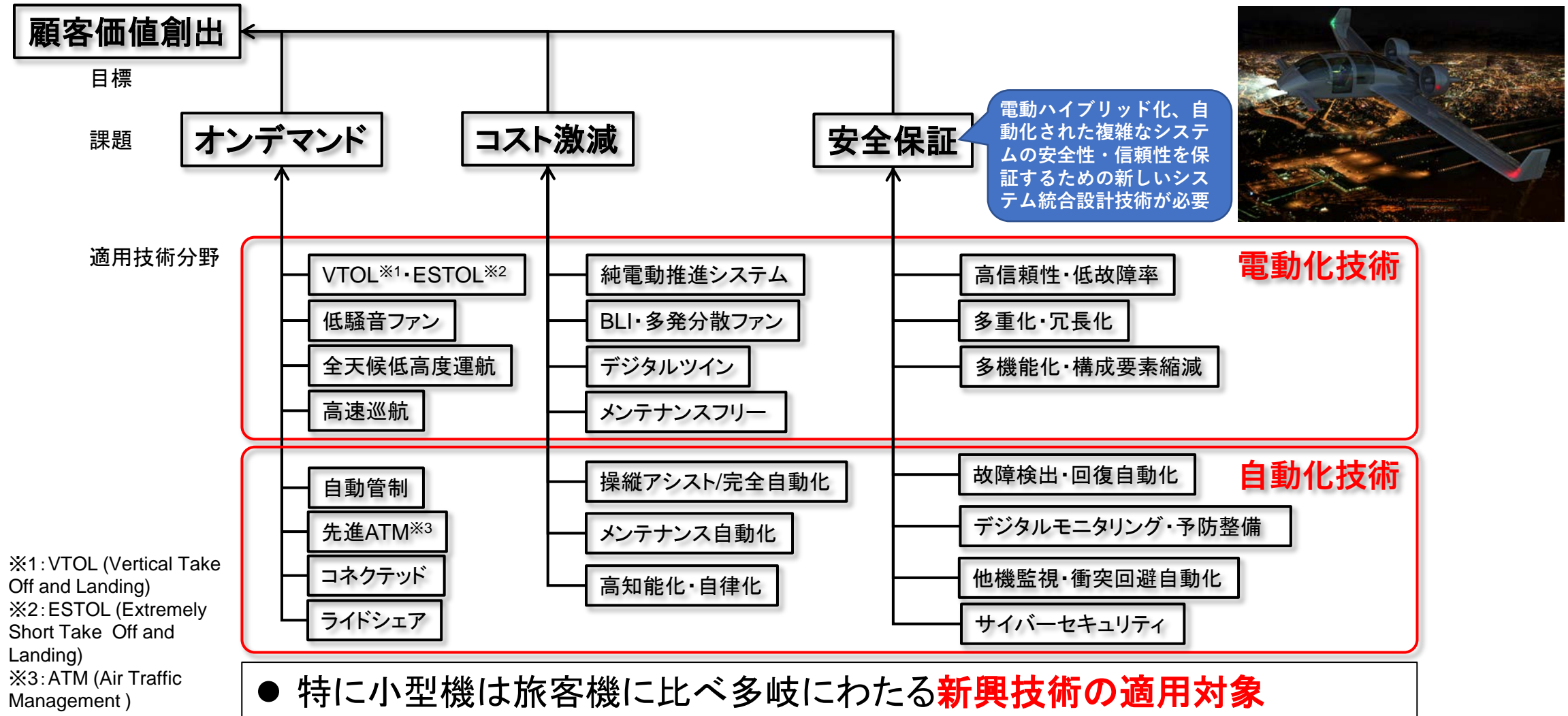
※注:本頁では小型機のための技術も、旅客機・小型機
共通の技術も区別なく記載している



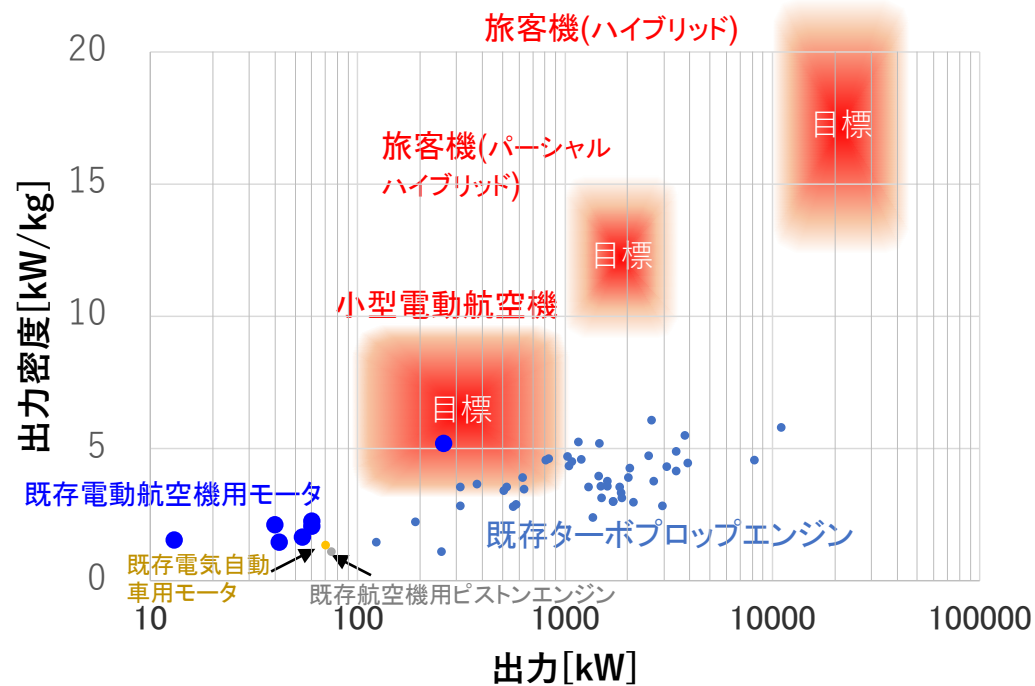
技術マップ (2/2 新しい顧客価値創出※注)



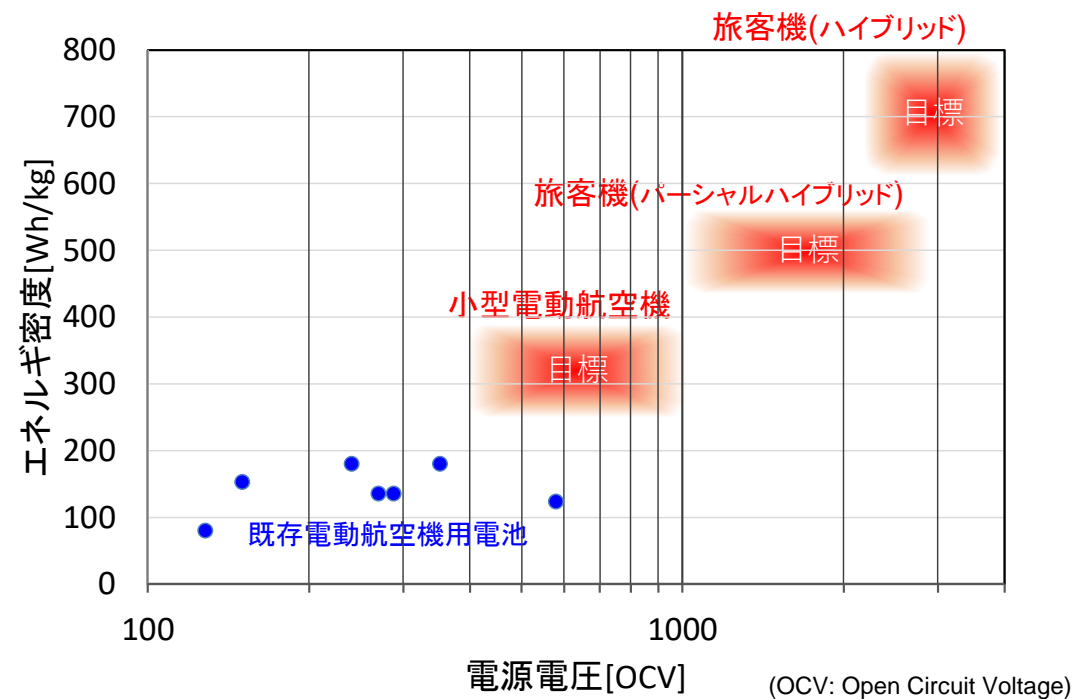
※注:本頁では小型機のための技術も、旅客機・小型機共通の技術も区別なく記載している



各技術の目標内訳(電動モータ、インバータ、電池)



電動モータとインバータの合算出力密度目標



電池の目標

- 旅客機に関しては、現状技術と将来目標の間に著しいギャップがあり技術リスクが高い

1. 小型電動VTOL機

- a. 従来の回転翼機と異なり、オートローテーション機能がないため、エンジン故障時に即座に墜落するリスク
- b. 従来の回転翼機と異なり、操縦系統に機械的機構がないため、たとえパイロットが操縦する場合であってもコンピュータや通信系等の電気系故障時に即座に制御不能になるリスク
- c. 騒音が大きいため低高度の運行が許容されないリスク（過去の回転翼機事業の教訓から、有視界飛行方式の場合は低高度で運行できないと就航率が悪化してエアタクシ事業が経済的に成立しないことがわかっている）

2. 電動旅客機

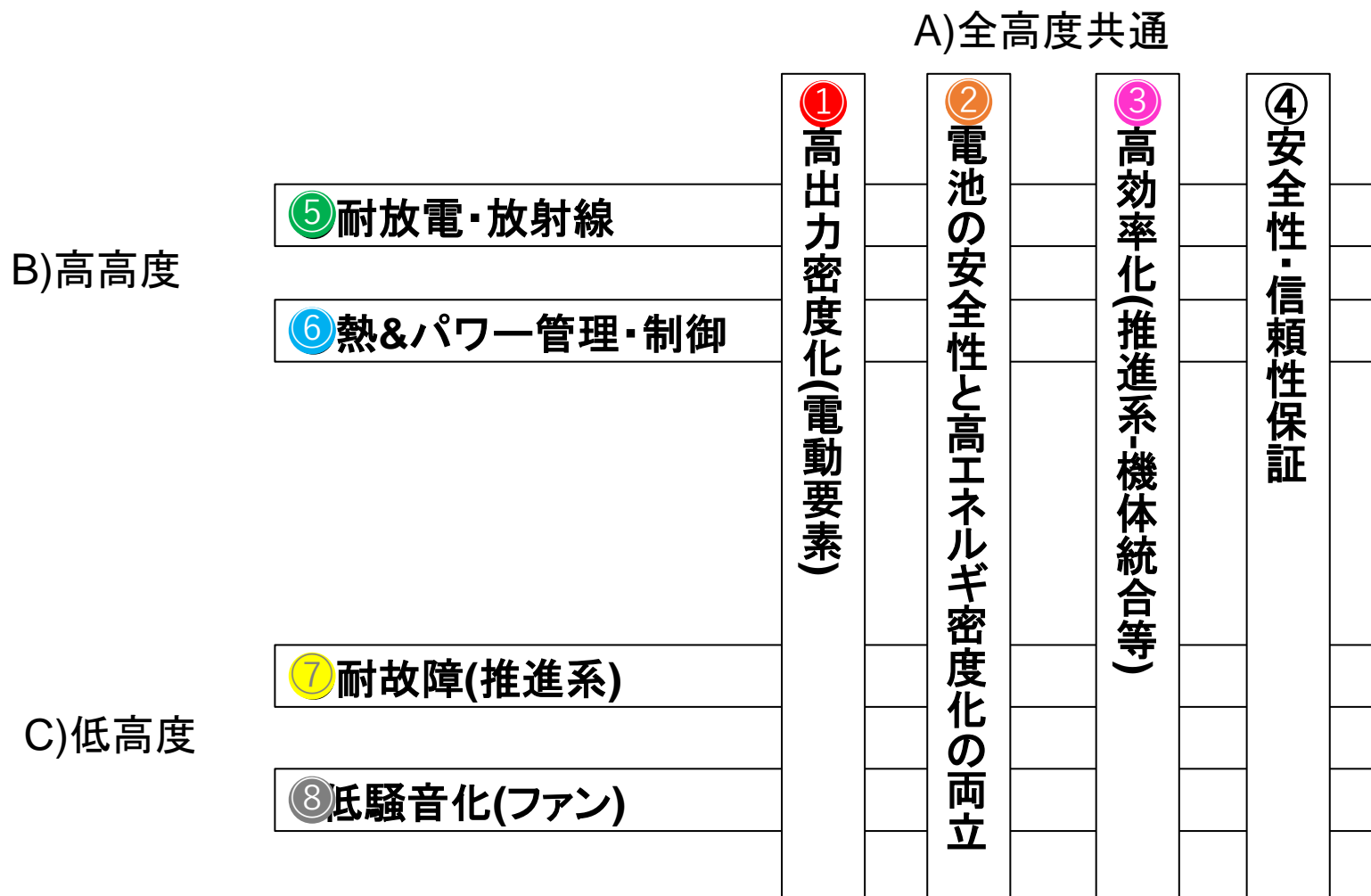
- a. 高高度低圧環境におけるコロナ放電と絶縁破壊のリスク（高電圧になるほどリスクが増大）
- b. 高高度高放射線環境におけるシングルイベント効果増大のリスク（高電圧になるほどリスクが増大）
- c. 高高度低空気密度環境における冷却機能低下のリスク（電動デバイスの排熱処理の問題）
- d. ガスタービンエンジンと併設するため、電動デバイスが高温環境に晒されるリスク
- e. 最大出力持続時間が長い（離陸定格で5分以上）ため、電動デバイスが過熱されるリスク

3. 電動ハイブリッド

- a. システムの構成要素数が増えるために、従来よりも故障確率が増加してしまうリスク

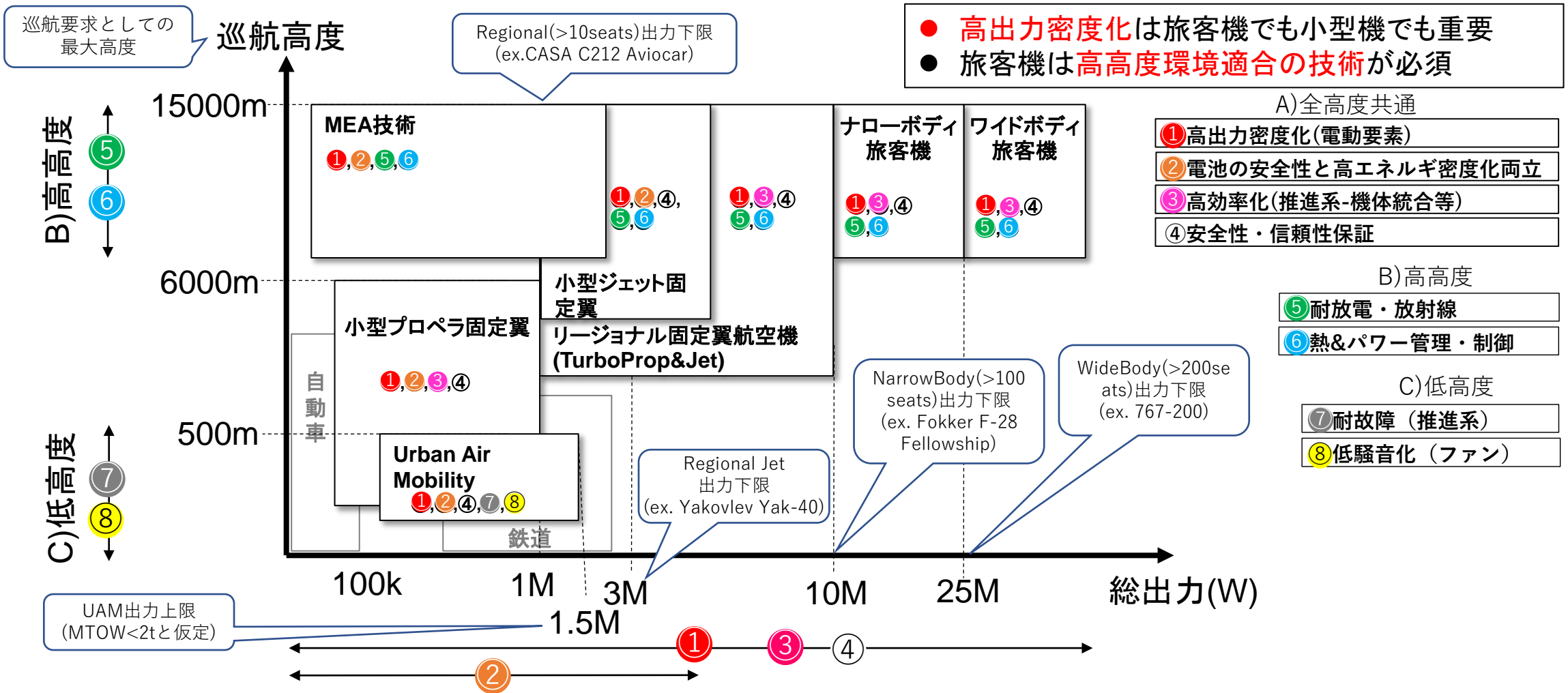
分類	番号	重要技術課題名 (概要)	構成要素/システム
A) 全高度共通 の重要 技術課題	①	高出力密度化 (重量の成立性確保、最大出力運転時間確保のための耐熱・冷却・放熱性)	電動要素 (電動モータ、発電機、 パワーエレクトロニクス、電池、 遮断器、分配器、送配電線等)
	②	電池の安全性と高エネルギー密度化の両立 (熱暴走等の危険封じ込めと電池システム全体としての高エネルギー密度化の両立)	電池 (電力ストレージ)
	③	高効率化 (BLIや多発化による推進効率の向上、推進系熱効率の向上)	推進系-機体統合システム、ハイ ブリッドシステム、電動要素
	④	安全性・信頼性保証 (電動要素追加による故障率増加等に対するシステムの安全性と信頼性の保証)	電動推進システム、ハイブリッ ドシステム、電動要素
B) 高高度 環境特有の 重要技術課題	⑤	耐放電・耐放射線 (高高度環境における高電圧要素及びシステムの放電及び放射線影響への対処)	パワーエレクトロニクス、電動 モータ、発電機、電動要素
	⑥	熱&パワー管理・制御 (低空気密度・ガスタービンエンジン内外高温環境下の熱とパワーマネジメント)	電動要素、電動推進システム、 ハイブリッドシステム、
C) 低高度 運用特有の 重要技術課題	⑦	耐故障 (推進系故障時の緊急着陸または運航継続に対する耐故障や故障許容設計)	電動推進システム
	⑧	低騒音化 (ファン、プロペラの空力騒音低減)	ファン、プロペラ

重要技術課題の抽出



- 航空機電動化の技術課題は運用高度によって明確に異なる課題と高度に依らない共通課題がある。
- 旅客機のエンジン電動化のためには高高度飛行環境適合の技術課題解決が必須。高出力密度化と高高度環境適合の技術は航空分野特有であり優先度が高い。
- Urban Air Mobility(空飛ぶクルマ)実現には低高度運用の技術が重要。

重要技術課題の抽出



- シナリオ1（**旅客機電動化：高難易度の目標に挑戦し、スピノフも狙う**）

1. 高高度航空環境特有の課題を念頭に置きつつ、**低出力**(e.g.100k-1MW)かつ**高電圧**(e.g.1k-3kV)電動パワートレインを対象に、全高度共通の課題(①**高出力密度**(e.g.10k-20kW/kg)、②高エネルギー密度(e.g.500-1000Wh/kg)、③高効率化、④安全性・信頼性保証)を解決する技術を獲得
2. その後、高高度航空環境特有の課題(⑤**耐放電・放射線**、⑥**熱管理**)を解決する技術を1. に融合し、さらに高出力化を図って**旅客機に適用**
3. 途中の技術を小出力用途(MEA、小型機)としてスピノフ

- シナリオ2（**小型電動航空機：今ある技術を最大限活用し迅速な社会実装を狙う**）

1. 既存のパワートレイン技術をベースとして小型航空機用途(固定翼プロペラ機)に適用
2. 低高度利用特有の課題(⑦**耐故障**、⑧**低騒音化**)を解決する技術を1.に融合し UAMに適用
3. 高出力化を図ってシナリオ1にも技術を展開
4. (その後の長期的展開:自動化・自律化を図り市場規模を飛躍的に拡大)

- シナリオ1とシナリオ2を同時に推進することで技術全体のレベルを効率的に向上

技術ロードマップ

国際動向 E-FAN X(2020, 2MW) Zunum Aero(2022, 12pax) Eviation Alice(780kW, 9pax)
FAR Part-23 new(2017~) CO₂ ペナルティ(2021 ~)
EASA VTOL Special Condition(2019~) UBER Air(2023~)

E-Thrust(100pax)

2005年比CO₂
排出量半減

2020年代: **小出力用途**(小型電動航空機とMEA)を対象に電動化技術の社会実装を開始

2030年代: **旅客機**(細胴機以下)にまで電動化技術の適用範囲を拡大

2040年代: 電動化技術を核として**航空機の燃費を大幅に削減**

2050年代: 電動化の**理想形**に到達。**CO₂削減への明確な寄与**

将来ビジョン

開発の進捗

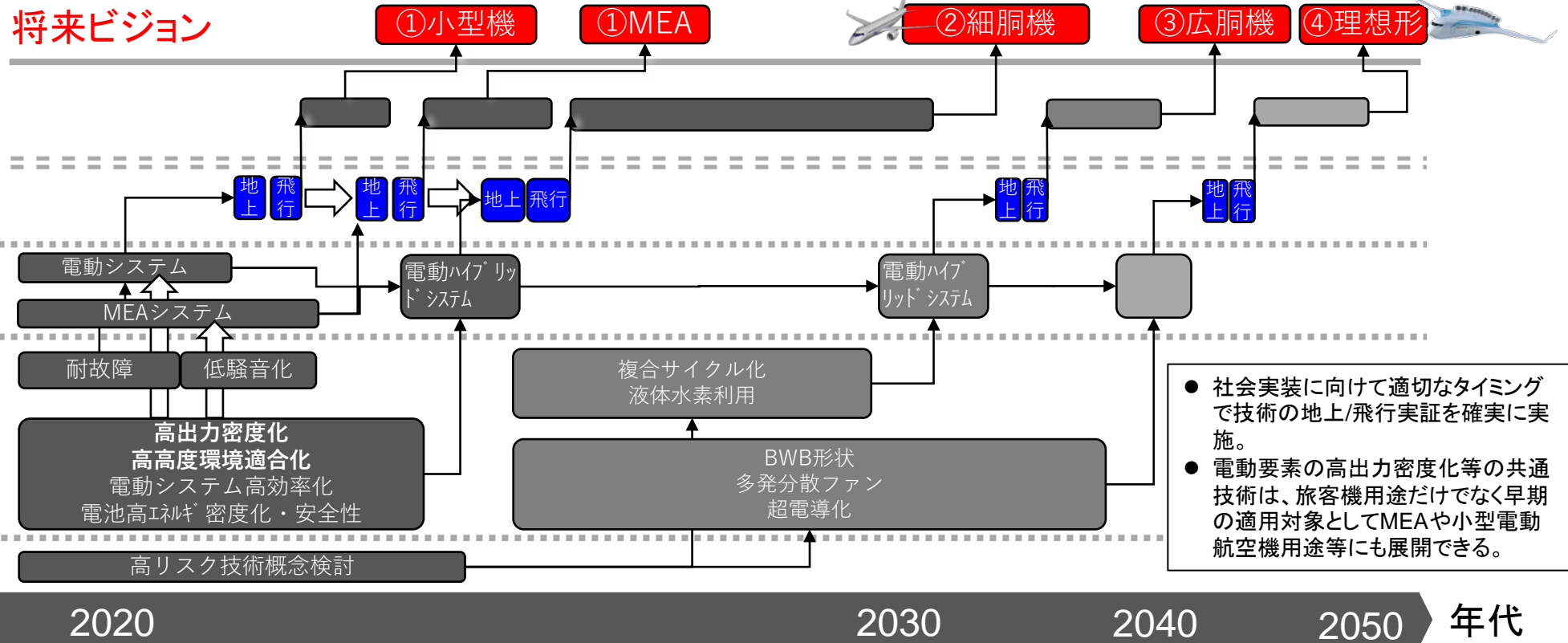
航空機開発

相当環境実証

システム開発・統合

研究開発

方式選定
概念検討
戦略策定



Thank you.



宇宙航空研究開発機構
次世代航空イノベーションハブ



JAXA ECLAIR

<http://www.aero.jaxa.jp/about/hub/eclair/>