

平成30年度省エネルギー等に関する 国際標準の獲得・普及促進事業委託費

新規分野の国際ルールインテリジェンスに関する調査
(「空飛ぶクルマ」含めた電動航空機の国際標準化戦略
に係る調査研究)

経済産業省

平成31年3月5日

目次

電動航空機.....	1
空飛ぶクルマ	6

電動航空機

2018年から2030年の期間に世界の航空機市場は中間層の拡大、低コストキャリア、機体の更新延期によって年率2~3%で成長する見込み

- 中間層(特にアジア太平洋および中南米)の台頭により航空機需要は新興市場で高い
- 先進国市場における航空機需要は(北米などの)低コストキャリアの人気によって拡大
- 近年は多くの航空会社が機体の更新を延期しており、多くが近々更新となる予定

長期的にはEAの成長はすべてのステークホルダーに利益をもたらすと期待される

- 排出量の削減: EAは排出量を削減するため、航空会社、政府、および航空機OEMの排出削減目標に貢献
- 騒音の低減: 都市空港の交通量の増加を可能とする一方で、空港周辺住民の生活を向上
- 総運用コスト(TCO)の削減: 燃料、保守サービス、交換部品に関連するコスト低減によって航空会社の収益性が改善する可能性があり、また燃油価格変動の影響も軽減

4つの技術が開発中でEAへの移行を促進する可能性

- ターボ電気: 従来の航空機同様、ターボエンジンを使用して(一部の)電気推進用に発電
- ハイブリッド: ターボ電気の構成で電気推進の電源を補完するためのバッテリーを搭載
- 完全バッテリー電気: バッテリーのみを電源とする
- 燃料電池: 電気推進用の電力を発生させる代替電源となる代替燃料(例えば水素)

2030年までの4つの技術仕様は飛行距離と乗客人数によって異なるため、技術の進展具合にもよるが、今後10年間では一部セグメントに用途が限られる可能性がある

- 推定される電気推進技術が対応できる航空市場は2030年時点で全体の約55%に過ぎない
- ナローボディ航空機を電化できる可能性がある技術はターボ電気のみ
- ハイブリッド航空機はリージョナルや短距離ビジネス航空機に適している可能性
- 燃料電池とフルバッテリーの電化技術は短距離の少人数旅客機でのみ可能な見込み

電気飛行機のエコシステムは2030年まで限定的と予測される。市場が発展するのはおそらくリージョナルとビジネスであり小規模に留まる

- **限られた需要:** 航空会社は慎重。5～10%のコスト改善では電気への切り替えには不十分。ハイブリッドへの初期コストはさらに高いため普及に課題
- **緩やかな供給の成長:** エアバス、ボーイング、NASAのナローボディ向け電動航空機プロジェクトまだ構想段階
- **未成熟な技術:** TCOを大幅に削減するにはターボ電気技術とハイブリッド技術が成熟化する必要がある。バッテリー電気と燃料電池は大型航空機の実現のためにブレークスルーが必要

基本予測を上回るEA普及の加速に向けては、いくつかの重要な障害の克服と触媒が必要











- **コア技術の飛躍的進歩:** 航空機のボディデザイン、バッテリーテクノロジーまたは燃料電池テクノロジーの飛躍的進歩によって、従来の航空機と比較しても著しく魅力的となる
- **技術革新による新たな市場の開拓:** 短い離着陸ができる革新的な航空機によって短距離航路の航空機に新たな市場を切り開く
- **市場のダイナミクス:** 原油価格の急騰や供給の不確実性により、電気化への意欲に弾みがつく
- **規制による後押し:** 各国政府による電動航空機産業の優先と奨励、および世界の環境規制の厳格化は電動航空機の普及を促進する

航空機の電化の影響は航空機OEMのバリューチェーン全体に及ぶ。推進コンポーネントとシステム統合領域における利益プールは拡大する見込み

- **主要コンポーネントと素材**
 - 電気推進システムでは**全く新しいモジュール(バッテリー、エネルギー貯蔵、熱管理、モータおよび制御など)**が必要となり、推進システムが最も影響を受ける
 - 他のコンポーネント、例えばアビオニクス、着陸装置などはすでに電化されているが、改善の余地がある
 - 電気化を促進するための航空構造物の抜本的な設計変更では、新素材や製造技術が必要となる
- **システム統合**
 - 機械システムと電気システムの統合には専門的な能力が必要となる

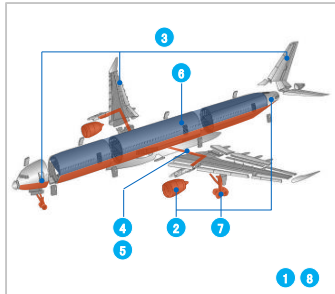








航空機の電気化の影響は航空機OEMのバリューチェーン全体に及ぶ

航空業界での業界全体の動向

役割	予想される電気化の影響	相対的なインパクトの大きさ
 納入と組立の管理	<ul style="list-style-type: none"> 過去データがない中でOEMは新たな認定の道筋を構築する必要がある 	
 システム統合	<ul style="list-style-type: none"> ハードウェアアーキテクチャ設計—電気システムの最適な機械的統合に必要な新しい技術 大規模バッテリーとモーターの制御に必要な新しい技術 複数のサブシステムの電気化対応例、飛行アクチュエーション、着陸装置など さらなるモジュール化によって、サブアセンブリレベルでのテストと認証の要件が増加 	
 主要コンポーネント	<ul style="list-style-type: none"> 電気推進システムでは全く新しいモジュール(バッテリー、エネルギー貯蔵、熱管理、モータおよび制御など)が必要となり、推進システムが最も影響を受ける FADECは電気系と燃料系のシステムの切り替えをマネジメントする必要がある 大規模バッテリー、電気モーター、発電機の機械構造と制御を開発する新たな技術的キャパシティが必要 	
 主要材料	<ul style="list-style-type: none"> 素材はより軽量化と高性能化に移行する必要がある。複合材料、セラミックスなどの使用が増加 	
 サービス(アフターマーケットなど)	<ul style="list-style-type: none"> エンジン部品からバッテリーシステムまで、よりコモディティ化された製品への移行はアフターマーケット事業に大きく影響 全く新しいサービスを提供する必要がある <ul style="list-style-type: none"> バッテリーの状態管理と交換 発電機の状態管理と交換 エンジンのメンテナンスにはハイブリッド推進システムのモニタリングと保守の新しい技術が必要 	

1 システム・オペレーションを重視
 資料: 記事検索、エクスパートインタビュー

在来型の航空機の電気化では推進システムへの影響が最も大きい

	コンポーネント	電気化の影響	全体としての変化の規模
	1 航空機構造物 <ul style="list-style-type: none"> 胴体、翼、尾翼を含む機体 ナセルとスラストリバーサ 	<ul style="list-style-type: none"> 抜本的な構造変更と軽量化によって独自開発材料と技術の機会が生まれる可能性 	
	2 推進システム <ul style="list-style-type: none"> エンジンステータ、ロータ、ハウジング、燃焼室 エンジンコントロール(FADEC)、エンジン燃料システム アクセサリおよび制御エレクトロニクスを含むAPU 	<ul style="list-style-type: none"> バッテリー、エネルギー貯蔵、熱管理、モータ、コントロールなどの全く新しいモジュール FADECは電気系と燃料系のシステムの切り替えをマネジメントする必要がある 大規模バッテリー、電気モーター、発電機の機械構造と制御を開発する新たな技術的キャパシティが必要 タービンと発電機に必要な先端技術 純粋な電気推進では、燃料システムと在来エンジンは除去 	
	3 アビオニクス、フライトコントロール <ul style="list-style-type: none"> フライト管理/ナビゲーションを含む フライト管理のコンピュータとソフトウェア、アクチュエータ、パイロットインセプタ 	<ul style="list-style-type: none"> 既に相当の電化が進んでおり影響は限定的 	
	4 電気システム <ul style="list-style-type: none"> アクチュエーションを除く発電、管理、配電 	<ul style="list-style-type: none"> 電気系システムがバックアップではなく主力となる可能性 	
	5 油圧システム <ul style="list-style-type: none"> アクチュエーションを除く油圧力の生成と分配 	<ul style="list-style-type: none"> 純粋な電気航空機(例、eVTOL)では油圧システムは完全に除去 	
	6 インテリア <ul style="list-style-type: none"> 座席および内装仕上げ、コントロール/ディスプレイ、エンターテインメントシステム 電気コントロールを含む空調、加熱、加圧、酸素システム 貨物処理システム 	<ul style="list-style-type: none"> 既に相当電気化されているが、さらなる改良余地が存在 	
	7 着陸装置 <ul style="list-style-type: none"> 電子コントロール、ステアリング、車輪、ブレーキを含む 	<ul style="list-style-type: none"> 既に相当電気化されているが、さらなる改良余地が存在 	
	8 その他システム <ul style="list-style-type: none"> 燃料システムおよびアクセサリを含む、照明からドアのアクチュエーションを含むサブセグメントの多様な選択肢 	<ul style="list-style-type: none"> 該当するあらゆる場所で油圧から電気への移行 	

資料: OEMの購買の組織図、ATAチャプター

航空機のバリューチェーンはコンポーネントシステムのモジュール化により、システムインテグレーターがOEMに勝る勢いで進化している

- OEMは垂直統合によって新システムの設計・統合での主導権を取り戻し、追加の利益を取り込む可能性(例、ボーイングがアビオニクスをインソースするなど)
- システムインテグレーターは一層のモジュール化によって航空機OEMから利益を獲得

- システムインテグレーターが水平統合(例えば、UTC)によってより収益性の高い分野に移行して得意分野を強化
- (全てのシステムセグメントで)バリューチェーン川上への移行が進み、より大きなマージンとバリューチェーンへの影響力を拡大
- OEMやシステムインテグレーター(GEなど)がアフターマーケットのサービスに参入(予測保守など)

電動航空業界のエコシステムが出現し始めている: 先行勢は企業を横断したパートナーシップ構築に取り組んでいる

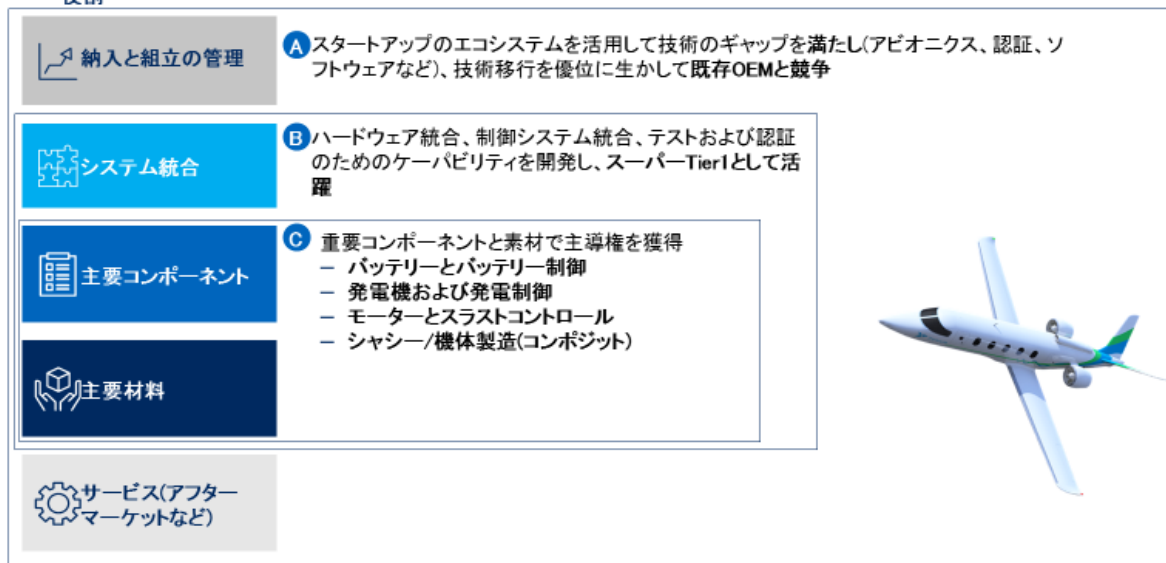
- E-FanXパートナーシップ: エアバス、ロールスロイス、シーメンスは2020年までにデモ用の50~100人乗りのハイブリッド航空機を開発
- Zunumコラボレーション: 2022年と2025に市場に登場予定の10名用と50名用のハイブリッドの旅客機を開発するZunum Aero、サフラン、ボーイング、JetBlueの連合
- UTC: プラット&ホイットニーとUTASは10人乗り地域型ハイブリッド航空機案を開発
- 他にも様々なコラボレーションがEAの推進に向けて既に実施され、あるいは今後実施される(例、スタートアップ企業同士、あるいは中国などの国、または大手企業とスタートアップ間)

国内産業はいくつかの方法でエコシステムに参画するためのロードマップを策定する必要がある

- コンポーネントや素材の供給に注力: バッテリー、モーター、発電機、軽量機体などの主要コンポーネントや、機体用の複合材などの素材を開発することで競争優位性を獲得する
- システムインテグレーターとなるためのバリューチェーンの上方移動: ハードウェアのインテグレーション、システムインテグレーションの管理、テストと認証の能力を開発し、スーパーティア1となる
- スタートアップと提携してOEM事業を創出: スタートアップのエコシステムを活用して機能のギャップ(アビオニクス、認証、ソフトウェアなど)を解消し、技術の移行を捉えて既存の航空機OEMと競合し伝統的なOEMに変革をもたらす

日本の産業ロードマップは、バリューチェーン上でどの地位を目指すかに依存する

役割



空飛ぶクルマ

既存のエコシステム内で徐々に変化していく電動航空機とは異なり、空飛ぶクルマはまったく新しい新興エコシステム。空飛ぶクルマ・アーバンエアモビリティのエコシステムの進化は6つの重要な要素に左右される

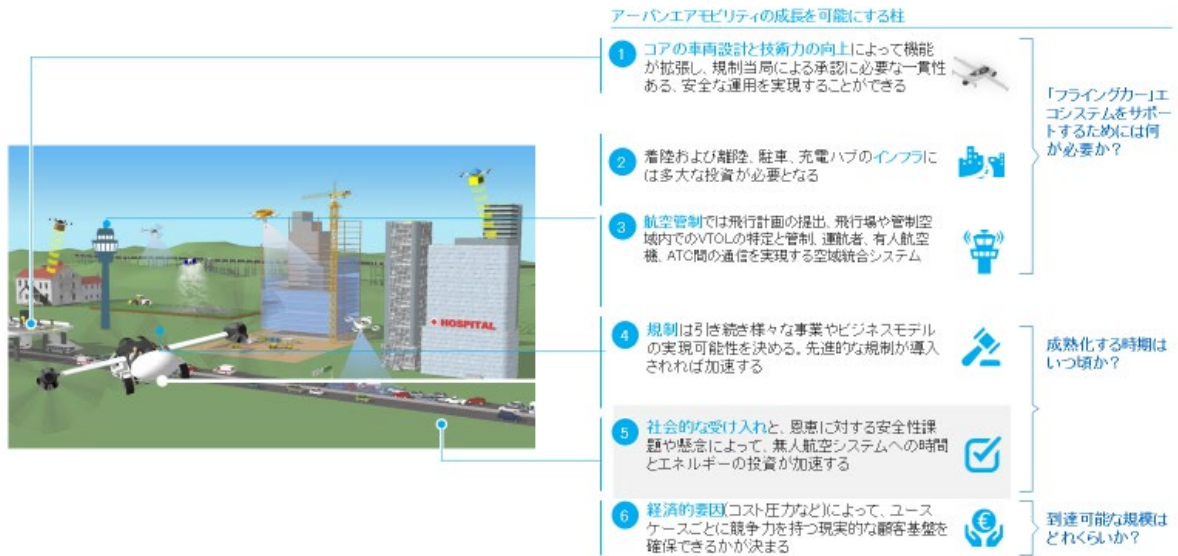
1. 投資とスケールアップを容易にする**コア車両設計**の標準化と、機能性を拡張し経済的な採算性を拡大する**技術**
2. 着陸および離陸、駐車、充電ハブの**インフラ**には多大な投資が必要となる
3. **航空管制**
4. **規制と認証**は引き続き様々な事業やビジネスモデルの実現可能性を決める。先進的な規制が導入されれば加速する
5. **社会的な受容性**と、安全性課題が払しょくできれば、無人航空システムへの投資が加速する
6. **全体的な経済性**によって、現実的な顧客基盤を確保できるかが決まる

コアの車両設計

- **空飛ぶクルマの設計では2つの明確に定義された概念が浮上しつつある: ティルティング技術、マルチコプター、両者の融合**
 - ティルティング型はより速いスピードを実現するが、マルチコプターはヘリコプターとの類似性から認証がより容易
 - VTOLは過去2年間でいくつかの大規模な投資を受けており、より多くの企業がティルティング技術により高額の資金を投じている
 - 「エアータクシー」用途の場合、目的により適しているため**ティルティング設計が標準**になると考えられる(前方移動での効率性が高く、飛行距離が長い)
- **基本となる空飛ぶクルマの設計は以下のシステムで構成**
 - **航空構造物**: 胴体、尾翼、ナセルを含む軽量のエアフレーム
 - **エンジンとAPU**: ローター・ウイング、ハウジング、エンジン制御、アクセサリーと制御電子機器を含むAPU
 - **アビオニクス、飛行制御**: 部分的または完全自動の飛行管理、ナビゲーション、飛行制御コンピュータおよびソフトウェア、アクチュエータ(センサー – 操縦を補助するライト、光学、音響)
 - **電気推進システム**: 重量、密度、航空(安全性)を考慮してVTOL要件に準拠した専用設計のバッテリー、発電および配給、バッテリー管理
 - **インテリア**: 座席、エアコン、制御装置・ディスプレイ、加圧、貨物対応
 - **着陸装置**: 電子制御、ステアリングホイールおよびブレーキ

- その他: 騒音と気象緩和技術
- 5つの主要分野における**技術力の向上**は、「エアータクシー」の商業化を阻害する**安全性、騒音、費用**の3つの主な課題を解決し、同時に空飛ぶクルマの普及をさらに拡大させる可能性がある
 - **高度なバッテリー技術**: より高い重量・体積に対するエネルギー密度、より高速な充電。バッテリー技術の限界を考慮すると、現実的には**200～300マイル(500km)**が純粋な電気推進機で予想される最長飛行距離。いくつかのスタートアップがハイブリッドのソリューションを検討中
 - **安全性向上のためのセンサーを活用した障害物の検知と回避**
 - **軽量の複合機体**: 航空機の重量を軽減し、より広い飛行範囲またはより大きな積載量を実現
 - **GPSが使用不可環境での運用**
 - **自律飛行**: 運用コストを大幅に削減
- **バッテリー、軽量コンポジット機体、センサー**の技術開発は、低コストで安全な運行を実現するために不可欠で、**国内産業**にとって興味深い機会。複合構造物、アビオニクスおよびセンサーは**VTOL**コストの大部分を占める。バッテリーは初期費用の**10%**を占めるが、交換用バッテリーはさらに大きな付加価値を占める
 - **バッテリー**: リチウムイオン電池は開発の**S**カーブの終わりが近い。エネルギー密度を約**400kwh/kg**まで引き上げるには、リチウム空気、複合アノード、リチウム金属アノードなど次世代技術が必要
 - **軽量機体**による最大限の軽量化設計が必要となるが、安全性レベルも維持する必要がある(雷の衝撃、ノックダウン効果を吸収するなど)。これには複合材料および製造技術の進歩が必要となる
 - **センサー**: **VTOL**では都市部エリアを安全に航行するために、幅広いセンサが必要(例、LiDar、光学、赤外線、熱など)

「フライングカー」のエコシステムの未来を決める6つの重要要素



VTOL(垂直離着陸機)市場で、主流をなす2種類の構造(ティルト型・マルチコプター)が展開。前者は前進速度で勝るが、後者は認可が下りやすい

マルチコプター

- メインローターが揚力、推進力を発生させるヘリコプター型の構造
- ローターが大型のため、効率的な垂直離着陸を実現
- 固定翼機と比較すると低速で、飛行効率が低い
- 従来のヘリコプターと類似していることから認可を受けやすい



ティルト型

- 巡航飛行時は固定翼モード、離着陸時はローターをティルト(傾転)することにより得る推進力で垂直離着陸が可能
- 固定翼により巡航時の飛行効率がよく、航続距離が長い
- ティルティング技術は複雑かつ運用経験が乏しいため、認可がより難しい



両構造の要素を取り混ぜた設計もあり

技術的ケーパビリティの拡張によって実現可能なユースケースが拡大する

■ 5年未満 ■ 5~10年 □ 10年以上

ケーパビリティ	概要	商用化までの 実現期間	商用利用のための要件
A バッテリー性能	耐久性を高めコストを削減するため、バッテリーエネルギー、充電レート、サイクル寿命、およびエネルギー単価を向上	■	<ul style="list-style-type: none"> 充電無しで最低でも1時間の飛行を可能とする商用VTOLを実現するバッテリー
B 検知と回避	「見て回避する」機能の確立によって、自動間隔確保と衝突回避を提供	■	<ul style="list-style-type: none"> 最新のセンサー技術を使用して有人飛行の安全レベルに到達
C 軽量コンポジットの機体	航空機の重量を軽減。より大きなペイロードまたは飛行範囲が実現。天候や衝撃からの安全性も確保	■	<ul style="list-style-type: none"> 安全で耐久性があり、製造性に優れた軽量複合材料および機体設計
D GPSが使用不可環境での運用	GPS信号を受信できない場合でも、航空機が正確な位置を決定し、インプットを受け取り、航行を可能とする	□	<ul style="list-style-type: none"> VTOLセンサーは高密度の環境でも動く物体を正確に検出可能
E 自律飛行	VTOLがパイロットなしで事前にプログラムされた飛行経路を飛行することが可能	■	<ul style="list-style-type: none"> VTOLは緊急事態、航空力学的な変化、ダイナミックな環境への対応が必要

資料: エキスパートインタビュー、ウェブ検索

着陸および離陸、駐車、充電ハブの**インフラ**には多大な投資が必要となる

- Vertiport (離陸、着陸、充電、駐車)はインフラの中でも最も重要な要素
- インフラの構築において大きな技術的な障壁はない。ただしインフラの標準化は、採算性の確保のためには不可欠であり、電気自動車で見られるような競合する充電テクノロジーを使用することは回避
- ヘリポートや飛行場の設計に関する既存の基準を活用し、インフラ設計と導入を行うことが可能
- 初期の注力先は既存のインフラの改造となる。駐車場などの立地がより望ましく、建物の屋上などはコストがかかり、スペースが少なく、重量に耐えられない可能性がある
- 大規模なメガハブ構想は課題が多い。より分散した小さいポートを設置する方が実現性が高く、侵襲性も低く、より広範囲をカバーできる
- 都市と政府はUAMを奨励するためにまずインフラに資金を提供する必要がある

航空管制は飛行計画の提出、飛行場や管制空域内でのVTOLの特定と管制、運航者、有人航空機、ATC間の通信を実現する空域統合システム

- 各国当局はこの取り組みに着手しており、開発会社もテストと評価のため最初のソリューションを市場に投入している
- 現在の航空管制システムは初期的に予想される航空交通を処理するためには十分成熟している
- 将来の超高頻度で高密度のネットワークでは更なる開発が必要

規制と認証

- ステークホルダーは規制がUAMサービスの主要な障壁と考えており、技術は最大の懸念点ではない
- 主要国での現在の規制ではUAV/e-VTOLによる旅客が許可されていない
- 車両認証についてはある程度の動きがみられるが、運用認証は具体的にBVLOSに限定されている
 - **車両認証:** いくつかの車両設計は成熟化しており、2021年までに設計が認証される可能性がある
 - Volocopter (マルチコプターデザイン)が認証に最も近い
 - Ehangは中国で認定されたが、現在の設計が欧米諸国で認定される可能性は不透明
 - **運用認証:** 現在は進展が遅い。試験導入の展開に応じて、ガイドラインとプロセスが正式化される。エキスパートは2025年までにエアータクシー事業が商業化されると予想
 - インフラとオペレーションの基準は地域固有に発展しており、現時点では世界的な基準は存在しない
 - シンガポール、ドバイ、他の東諸国では政治的な決断によって素早い法整備が可能のため、急速な進展がみられる
 - どのような距離であっても自動化された旅客輸送のためには現時点では認められていない目視見通し外(BVLOS)および耐空性の要件がある
 - 多くのユースケースで人の上空を飛行する必要がある。安全性と騒音が運用認証に向けた大きなハードル
- FAAとEASAはまだUAMポリシーを正式に策定していないが、規制当局の活動は産業界からの圧力に対応して加速している

経済的要因

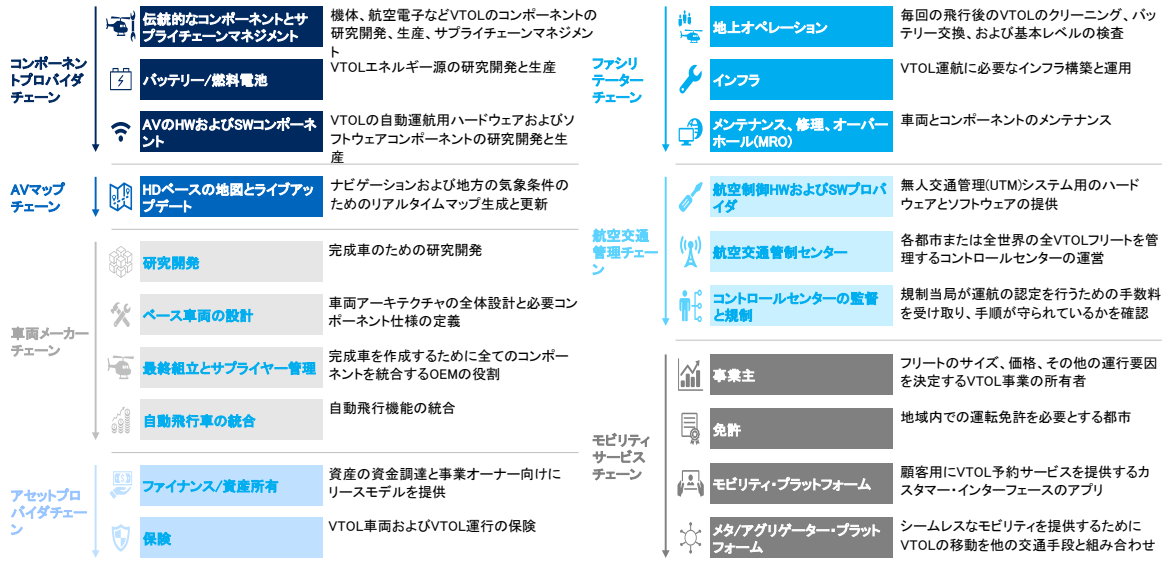
- 「エアータクシー」のビジネスモデルの潜在的な規模は、達成可能な価格帯によって異なる。タクシーのような交通手段と比較し、エアータクシーの価格がいくらになるかで、エアータクシーがニッチな高級サービスに留まるか、移動において高いシェアを持つ主流サービスになるかどうかが決まる
- 空飛ぶクルマのバリューチェーンには様々な経験や専門分野を持つ多様なプレイヤーが集結
 - **コンポーネントプロバイダー:** 機体、アビオニクス、推進システム、バッテリー・燃料電池、バッテリー管理/自動運用などのためのハードウェアとソフトウェア
 - **AVマップ:** リアルタイムマップとナビゲーションプロバイダー
 - **車両製造:** 研究開発、ベース車両デザイン、OEM、自動システムの統合
 - **アセットプロバイダー:** ファイナンス、保険

- **ファシリテーター:** インフラ、MRO、地上業務
- **航空管制:** 航空管制ハードウェアおよびソフトウェアプロバイダー、管制センターの監督と規制
- **モビリティサービス:** 機体所有者、モビリティプラットフォーム(アプリ)、アグリゲータプラットフォーム(他のモードとの組み合わせ)、都市の許認可
- **予備的な分析:** エアータクシーサービスではVertiportインフラとモビリティサービスプロバイダは、顧客が負担するコストの大部分を占める可能性が高い。交換用電池も重要な要素となる
- エキスパートは、**モビリティサービスプロバイダとインフラファシリテータ**が空飛ぶクルマの利益プールの中でOEMと比較しても高いシェアを獲得すると予想している

空飛ぶクルマの日本のロードマップに対する重要なインサイトと潜在的意味合い

- 国内産業はバッテリーとコンポジット機体の製造では本来優位性があるが、独自設計で共同開発を進めるためには早期のパートナーシップ形成が必要となる
- 空飛ぶクルマのOEMは、インフラと認証で支援的な国に惹きつけられる。日本はVertiportに交通予算を当初から投資するなど、都市部でのUAM普及に向けてより大胆なアプローチを採用することも可能である
- 早期の採択により、日本は運用ルールの標準化を推進し、日本企業が世界市場で競争するための優位性を生み出すことが可能
- バッテリー交換は、日本企業が世界的に事業を構築するにあたって魅力的な製品でありサービスの機会でもある
- 国内市場では、日本はフリート所有者とモビリティプラットフォームに向けたロードマップを策定する必要がある。国産モビリティプラットフォームを支援することで、より多くの価値を保持することが可能

VTOLモビリティのバリューチェーンには様々な経験や専門分野を持つ多様なプレーヤーが集結



資料: VTOLチームの分析