宇宙旅客輸送推進協議会
-宇宙旅客輸送推進協議会 第3回シンポジウム-

「2040年の社会ニーズに対応する有人宇宙輸送サービス構想と必要技術の検討」

Naga Tomo

2022年6月6日

㈱SPACE WALKER

SPACE WALKER

目 次 (1/2)

1. 技術検討要請仕様の確認

<補足1-1：本作業のアウトカムとその後の展開>
<補足1-2：地上～LEO施設，オービタル，P2Pを一つの輸送体系として検討>
<補足1-3：輸送サービスおよび技術検討の要考慮条件>
<補足1-4：技術要件の主要観点と考慮すべき事項>
<補足1-5：PKG2.のアウトプットイメージ(2/2)>

2.宇宙輸送体系の将来像と技術要件

2.1 年代順の構想

＜補足2.1-1：SPACE WALKER＞

2.2 技術要件

2.3 技術課題と難易度

2.4 研究開発計画

目 次 (2/2)

3. 付録

<付録A-1：低軌道領域の将来宇宙輸送システムの発展経路>
<付録A-2：宇宙輸送系ロードマップ(再使用化)>
<付録A-3：(補足2)個別・技術ロードマップ(素案)>
<付録A-4：革新的将来宇宙輸送システムロードマップ(案)>
<付録A-5：JAXA革新的将来宇宙輸送プログラム 第1回RFIにて募集するテーマ>
<付録A-6：JAXA革新的将来宇宙輸送プログラム 第2回RFIにて募集するテーマ>

1. 技術検討要請仕様

補足1-1～4 参照

a

本PKG2へのインプットに基づき、輸送インフラや輸送サービス、輸送システムを含めた輸送体系の将来像を構想し、これを実現するための技術要件を具体化(定量化)することを要請

*具体化の対象は大量高頻度の宇宙輸送が事業として成立するための輸送サービスや運航形態、安全性の担保等幅広い視点での検討を期待

b

aで構想した将来像の実現に必要な主要アーキテクチャ及びその選択肢、クリアすべき技術課題の抽出及び難易度やリスクを現時点の技術レベルと比較して整理することを要請

*アーキテクチャとは採用するシステムや推進など輸送機を構成する技術のことで複数の可能性や組み合わせがあることを共有。これらのうちから選定する方法および抽出・検討する選択肢の件数や相互の比較については受託者の裁量で行うことを期待

c

aで構想した輸送事業が2040年にサービス・インすることを条件とし、bで検討した主要技課題に対して事業立上げ時の判断に使用できる技術レベルまで向上させる解決策としての研究・開発計画の立案を要請

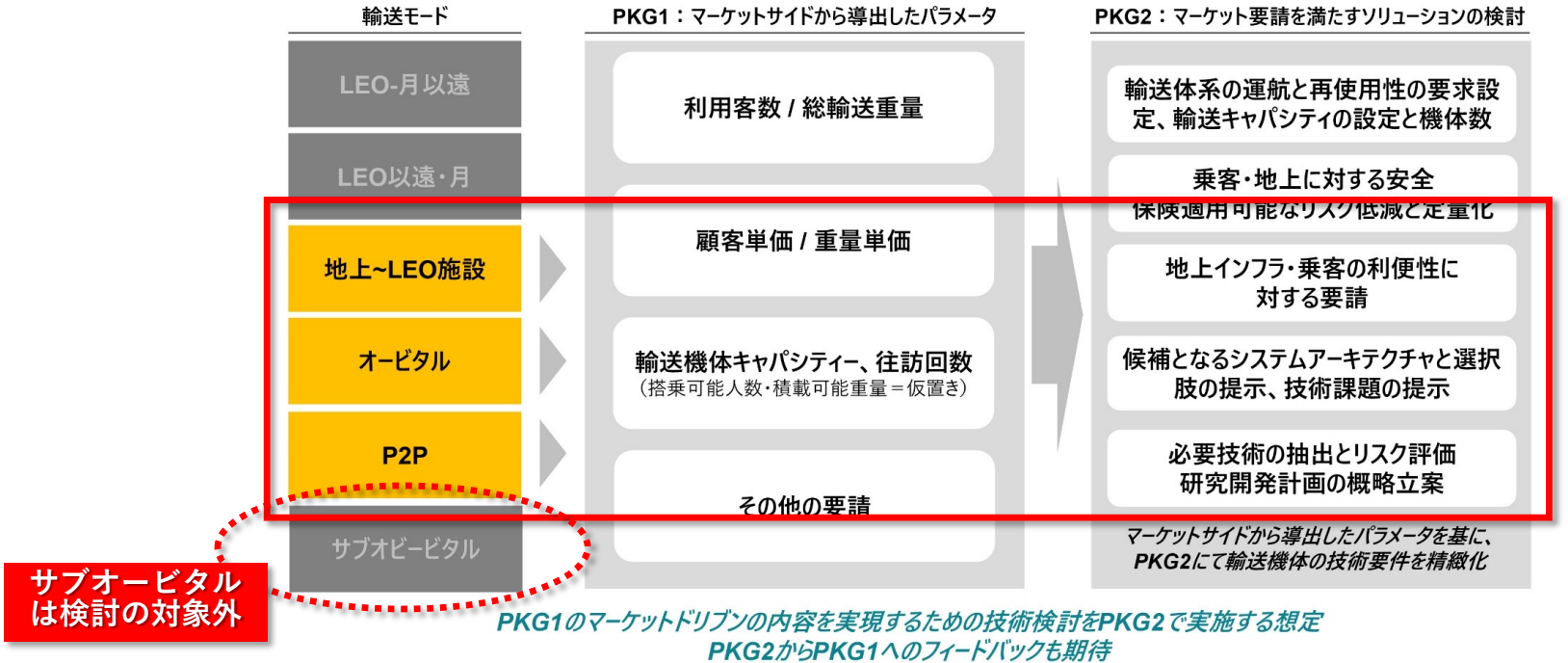
*事業立上げ時点は現在~サービス・インまでの中間時点(およそ2030年)と設定し、研究開発計画は研究開発・実証等の課題解決ステップとそれらの難易度やリスク、規模感の見える化を要請(綿密な費用見積は求めない)

引用：＊「2040年の社会ニーズに対応する有人宇宙輸送サービス構想と必要技術」検討（PKG2)要請へのインプット（PKG2-2021-001-NC），pp14.

<補足1-2：地上～LEO施設，オービタル，P2Pを一つの輸送体系として検討>

4 （参考-1）PKG1から２への流れ

各輸送モード毎にマーケットサイド(マーケットドリブン)で導出したパラメータを基に、同一の技術体系で行うLEO輸送とP2Pのマーケットを前提に技術検討。PKG1とPKG2間で必要な情報連携。



引用：＊「2040年の社会ニーズに対応する有人宇宙輸送サービス構想と必要技術」検討（PKG2)要請へのインプット（PKG2-2021-001-NC），pp11.

<補足1-4：技術要件の主要観点と考慮すべき事項>

4 （参考-3）．技術要件の検討に際し考慮すべき観点の例示

技術要件検討において宇宙へのアクセスの一般大衆化と安全の確保、環境適合性。および日本の強みを発揮できる訴求観点などを考慮することで、2040年の宇宙産業を日本の基幹産業としグローバルに"勝ち戦"を繰り広げることを企図

技術要件検討時に考慮すべき観点

主要観点	主要観点の概要
1「有人高頻度大量輸送の追求」	■ 旅客輸送の安全と社会が許容する輸送体系を実現し、宇宙輸送の高頻度かつ大量輸送システムによる一般大衆化を実現することを企図 （最終的には民間航空輸送と同様な運航の実現を企図）
2 「環境適合性の追求」	■ グローバルの重点課題であるカーボンニュートラル政策との整合性を取るために、水素をはじめとするクリーンエネルギーを燃料とする機体システムの実現を企図 （特に水素社会構築の国際的なムーブメントとの連携及び加速を企図）
3 「地上インフラ整備の追求」	■ スペースポートの建設場所(立地)や利便性、既存空港との併存、航空交通管制の独立/一体運用といった地上インフラの整備の実現を企図 (輸送サービスにおける集客や収入の基盤となるビジネスモデル構築を企図)
4 「日本の優位性の追求」	■ 日本の強みである材料技術などを活かし超軽量構造材料や超高温耐熱材料等、次世代マテリアルによる機体の軽量化・高性能化の実現を企図 ■ AIやBig Data等の先端技術を故障検知・予防にエアラインのノウハウも活用し、輸送体系の安全性や定期運航に対する高い信頼性獲得の実現を企図

上記観点を考慮し日本の強みを活かしつつ、米民間を中心とした先行者と差別化した目標設定を測ることで、2040年の宇宙産業を日本の基幹産業とするだけでなくグローバルにおいて"勝ち戦"を繰り広げることを企画する

引用：＊「2040年の社会ニーズに対応する有人宇宙輸送サービス構想と必要技術」検討（PKG2)要請へのインプット（PKG2-2021-001-NC），pp13.

＜補足1-5

PKG2. のアウトプットイメージ（2／2）
候補となり得る高頻度往還システム形態の選択と比較の例（評価などは例示）＞

マーケットドライブの高頻度大量輸送のポテンシャルと技術各形態の難易度および技術課題

水平/垂直離着陸など他のバリエーションはこれらの中に含む

2040年代に目指すべき輸送系の将来像

	＋RBCC エアブリーザ単段式往還機	ロケット単段式往還機	エアロンチ＋単段ロケット	高速エアブリーザ下段＋ロケット上段	2段式ロケット
高頻度大量輸送・クイックターンアラウンド運航のポテンシャル	◎	◎	○	△	△
空港立地問題の解決	○	△	◎	△	△
技術的難易度	Very High	Medium/High	Medium	Medium/High	Low /Medium
技術課題	RAM/SCRAM+ rocket Combined Cycle engine Thermal management	Light weight structure Higher Isp Engine/Nozzles Tri-propellant rocket		High speed AB engine Staging difficulty	Vertical landing from Orbital reentry For Starship, Operation of Huge Vehicles

Based on the considerations in "NASA Access to Space Study 1994:NASA TM-109693"

引用： SLA PKG2インプットパッケージ説明会(画面キャプチャー) 2021-11-11

2. 宇宙輸送体系の将来像と技術要件

2.1 年代順の構想（図2.1-1）

2020年代：

・ロケットエンジンベースの無人/有人サブオービタル
　スペースプレーンの実用化

・エアブリージングエンジンの研究開発

2030年代：

・エアブリージングエンジンを搭載したサブオービタル/
　オービタルスペースプレーンの技術実証

2040年代：

・エアブリージングエンジンを推進系の基軸にした
　／TSTO(Two-Stage-To-Orbit)
　／SSTO(Single-Stage-To-Orbit)の実用化

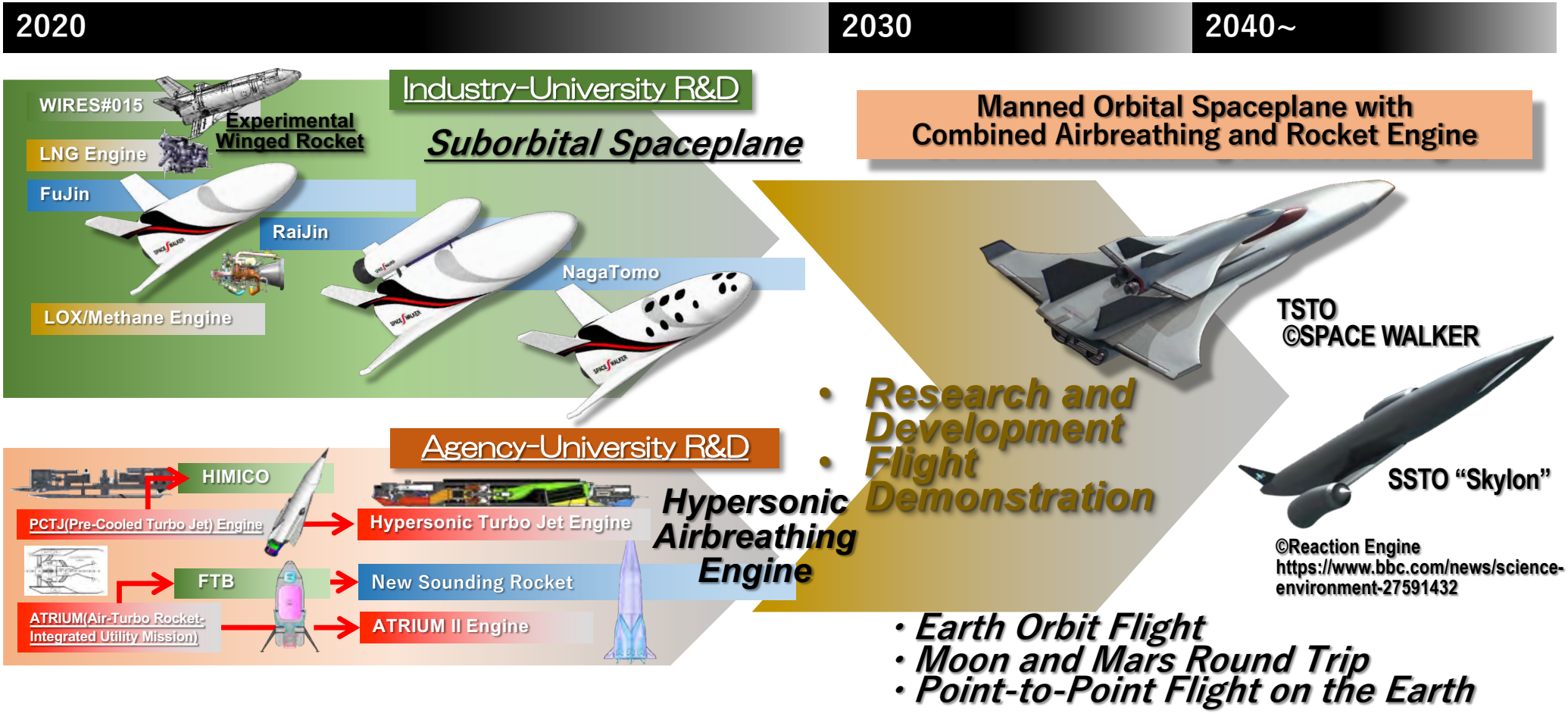
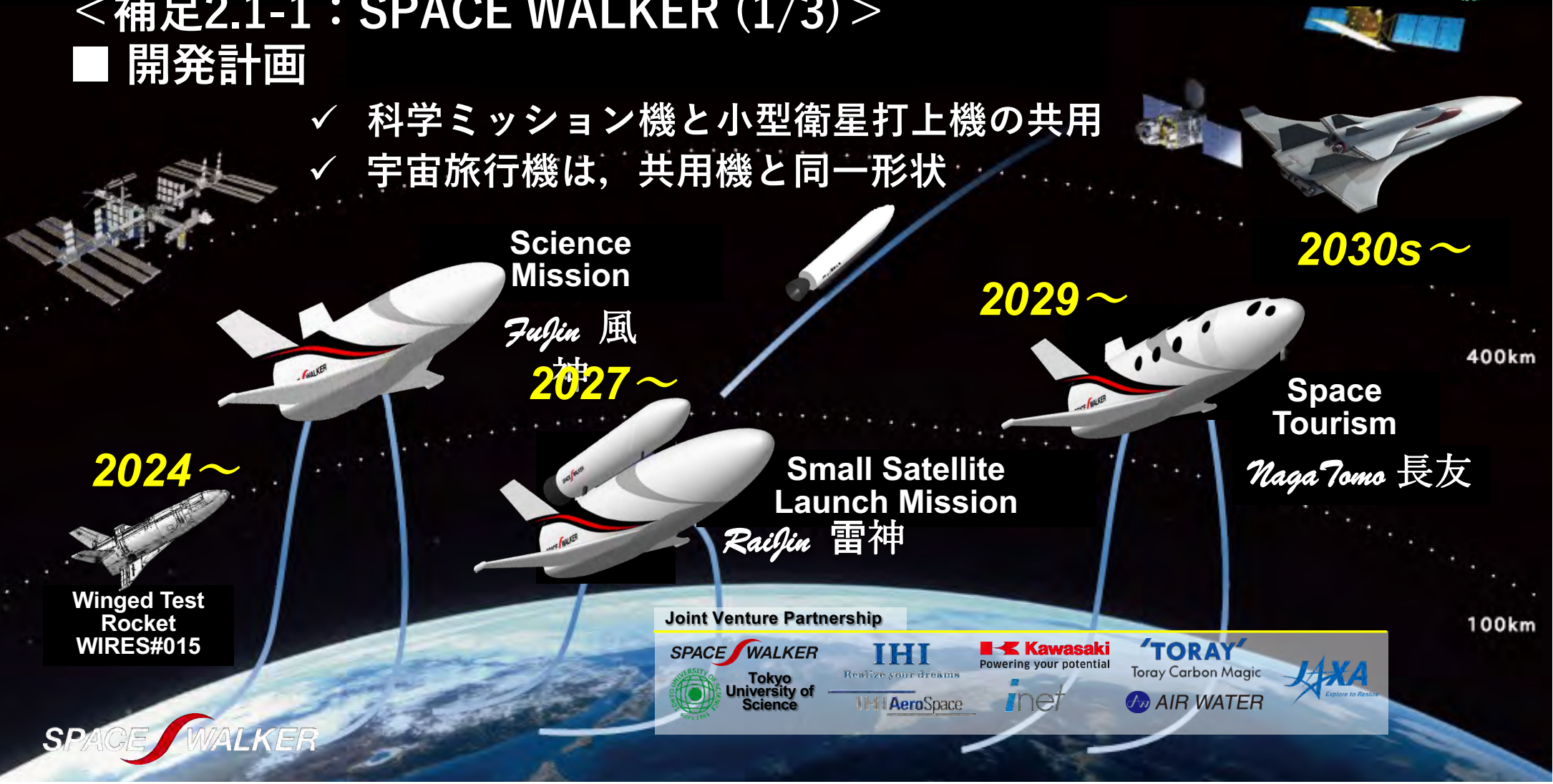


図2.1-1　宇宙輸送体系の将来構想

＜補足2.1-1：SPACE WALKER (1/3)＞

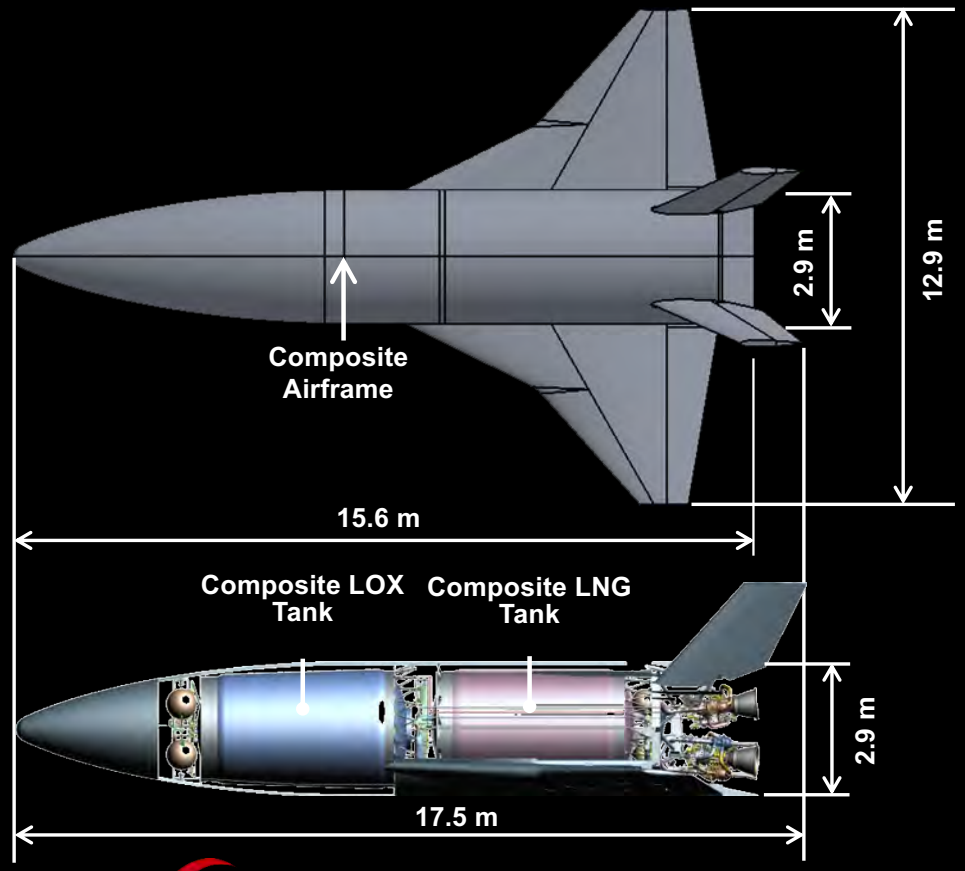
■ 開発計画

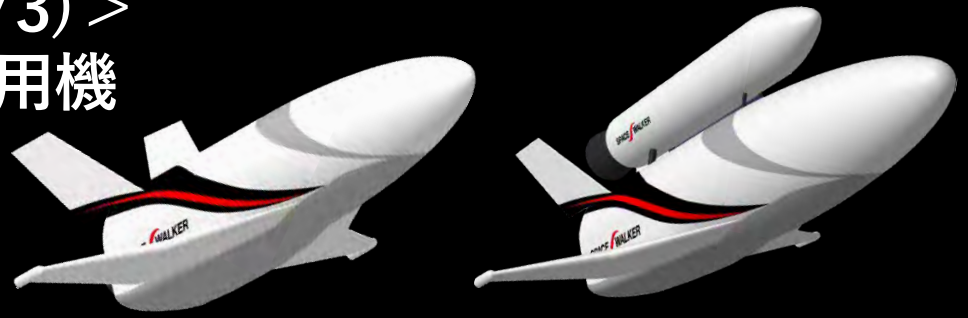
- ✓ 科学ミッション機と小型衛星打上機の共用
- ✓ 宇宙旅行機は，共用機と同一形状



＜補足2.1-1：SPACE WALKER (2/3)＞

■ 科学ミッション/小型衛星打上共用機





Suborbital Spaceplane Mass [kg]		
Dry		13,081
Propellant Mass	LOX	24,687
	LNG	8,967
Propulsion Gas	He	4
	N2	95
RCS Gas	N2	176
Total		47,010

SPACE WALKER

＜補足2.1-1：SPACE WALKER (3/3)＞

■ 世界と戦う先端技術

	技術分野	項目	分担
1	インテグレーション	● Airframe/System Integration & GSE's, Operation	SPACE WALKER
2	システム最適化*	● System Optimization Methodologies (Vehicle/Propulsion System/Trajectory)	Tokyo University of Science
3	故障許容設計	● Manned/Unmanned Fault Tolerant System (NGC, Structure, Engine-Propulsion System, Mechanical & Electrical Equipment, Communication System)	SPACE WALKER, IHI Realize your dreams, Kawasaki Powering your potential, IHI AeroSpace, inet, AIR WATER, TORAY Toray Carbon Magic, JAXA
4	LOX/LNG エンジン*	● Reusability (Reliability, Health Monitoring, Thrust Augmentation, Reignition), ● Clean Propellant	IHI Realize your dreams, IHI AeroSpace, AIR WATER
5	自動航行技術*	● Failure Tolerant Navigation System ● Real-time Optimal Trajectory Generation and Guidance ● Adaptive Attitude Control Theory	Tokyo University of Science
6	複合材構造	● Complex Airframe Composite Molding	Kawasaki Powering your potential, TORAY Toray Carbon Magic
	複合材製 推進薬タンク*	● LOX Compatible Composite Tank (CFRTP-PC) ● Super-pressure Composite Gas Tanks	SPACE WALKER, Tokyo University of Science
7	Legalization	● Public-private council led by Cabinet Office/ Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism	SPACE WALKER

* World Competitive Technologies

2.3 技術課題と難易度 (1/14)

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件	技術課題	難易度	日本の優位性
1 設計と製造	1.1 システム設計	(1) システム最適化	a. 進化計算を援用した多目的複合領域システム最適化 ・最適軌道生成 ・最適機体形状 ・エンジン推進系の最適化	・多様な最適軌道の導出 ・Multi-Fedelity空力特性推算 ・機体質量特性推算モデル ・エンジン特性推算モデル	大	○
		(2) 耐故障性設計	a. 安全性設計基準（確率論的安全性と故障許容設計） ・FAT (Functional Hazard Analysis)/FTA (Fault Tree Analysis)/FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)	-	-	-
		(3) 安全飛行運用	a. ミッションアボートと条件設定 ・FDIR (Fault Detection Isolation and Recovery) ・遠隔誘導制御支援　・エンジン停止と再着火 ・滑走路非常着陸　・洋上着水	-	-	-
		(4) 耐空性維持設計	a. 点検と整備計画 ・永久寿命設計該当部品の選定と寿命予測 ・故障許容設計該当部品の選定と点検/整備/修理期間の予測	-	-	-
		(5) ヘルスモニタリング	a. 機体構造および構造部品	-	-	-
			b. エンジンおよび推進系	-	-	-
			c. 空力舵面，機械装備品	-	-	-
			d. アビオニクスおよび電気電子装備品ヘルスモニタリング	-	-	-

2.3 技術課題と難易度 (2/14)

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件	技術課題	難易度	日本の優位性
1 設計と製造	1.2 空力設計		a. 遺伝的手法を用いた最適翼型 ・トリム範囲の広い超音速翼型の最適化	・Multi-Fedelity空力特性推算 ・風洞試験による検証	大	○
			b. 亜音速，遷音速，超音速と極超音速飛行を可能とする最適飛行形状 ・亜音速領域：最大揚抗比の向上，高迎角翼単失速の回避 ・遷音速，超音速領域：最適翼型設計によるトリム範囲の拡大 ・極超音速領域：高迎角トリムと縦，横・方向安静性と制御性の確保	・システム最適化と強く関連 ・Multi-Fedelity空力特性推算 ・風洞試験による検証	大	○
			c. 二段式スペースプレーン（小型衛星打上）の分離解析 ・CFD (Computational Fluid Dynamics) を用いた空力干渉 ・最適配置と分離運動解析（軌道および姿勢制御）	・CFD，誘導および姿勢制御との連成解析	大	○
			d. 極超音速インテークの設計 ・亜音速および超音速燃焼条件の確立　・胴体下面圧縮効果	-	-	-
			e. 空力加熱の推定と低減技術 ・主として断熱圧縮，表面摩擦に加えてイオン化混合気体の加熱 ・ノーズおよび主翼前縁等の空力加熱形状の最適設計	-	-	-
			f. 離着陸騒音予測と低減技術 ・スペースポート周辺環境アセスメント	-	-	-
			g. 柔軟な耐熱ガラスコーティングによる摩擦抵抗の低減 ・柔軟ガラスコーティングによる摩擦抵抗の低減	・風洞試験での摩擦抵抗低減検証 ・複合材構造コーティング技術	大	○
			h. 風洞試験技術 ・CFD (Computational Fluid Dynamics) を援用したベースドラッグの推定と風洞試験結果の補正技術	-	-	-

2.3 技術課題と難易度 (3/14)

技術分野			項目	技術要件 ■：重点技術要件	技術課題	難易度	日本の優位性
1 設計と製造	1.3	航法誘導制御	(1) 航法	a. 複合航法 ・慣性航法とGNSS(Global Navigation Satellite System)	-	-	-
				b. FADS (Flash-type Air Data Sensing) System ・対気速度，マッハ数，気圧高度，迎角，横滑り角の推定 ・多孔式(17孔)による２故障許容システムの実現 ・３Dプリンターを活用した２層基準圧室構造による計測精度の向上	各音速域における ・CFD精度検証 ・風洞試験による実証 ・飛行実証実験	大	○
				c. 電波航法 ・レーダ，自動方向探知機 (ADF: Automatic Direction Finder)，超短波全方向式無線標識 (VOR: Very High Frequency Omni-directional Range)，距離測定装置 (DME: Distance Measuring Equipment)，マイクロ波着陸装置 (MLS: Microwave Landing System)	-	-	-
				d. SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) ・リアルタイムカメラ ・LIDAR (Light Detection and Ranging)	-	-	-

2.3 技術課題と難易度 (4/14)

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件	技術課題	難易度	日本の優位性
1 設計と製造	1.3 航法誘導制御	(2) 誘導	a. 上昇動力飛行時の多様な最適軌道生成と誘導 ・進化計算による最適軌道と誘導コマンドの実時間生成 ・エンジンジンバルと空力舵面の最適制御力配分	・多様な上昇軌道の実時間生成 ・誘導コマンドの連続性 ・多制御入力問題の最適化	大	○
			b. 再突入飛行経路の誘導 ・空力加熱コリドーの設定 ・最大飛行荷重条件の設定 ・平行滑空条件の設定	-	-	-
			c. 滑空およびエネルギー調整フェーズの多様な最適軌道生成と誘導 ・凸二次計画法と進化計算による最適軌道と誘導コマンドの実時間生成 ・平衡滑空とエネルギ調整飛行軌道の最適化 ・滑走路への経路および方位のアライン	・多様なエネルギー調整軌道の実時間生成 ・誘導コマンドの連続性	大	○
			d. 着陸経路への誘導 ・最大揚抗比フロントサイドにおける経路修正荷重と平衡滑空条件の設定 ・フレア高度の設定	-	-	-
		(3) 制御	a. 多階層ダイナミックインバージョン理論を用いた適応姿勢制御 ・幅広い飛行環境およびアボートモードに対応した姿勢制御 ・事前の飛行制御解析等による姿勢制御ゲインスケジューリングの回避 ・オンボードでのリアルタイム安定余裕補償	・ゲインスケジューリングに依存しない適応制御 ・リアルタイム安定余裕の補償法	大	○

2.3 技術課題と難易度 (5/14)

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件	技術課題	難易度	日本の優位性
1 設計と製造	1.4 構造	(1) 機体構造	a. サブオービタル/オービタルスペースプレーン ・ハニカム(モノリシック/アルミニウム/アラミド)サンドイッチ複合材構造 ・複合材製主翼/複合材製胴体/複合材製尾翼/複合材製推力構造	-	-	-
			b. 高電気伝導性を有する複合材料 ・耐雷複合材構造	・高電気伝導複合材の機体構造への応用	大	○
		(2) 熱防御構造	a. C/C (Carbon Reinforced Carbon) 耐熱構造 ・機首構造/主翼前縁構造/尾翼前縁構造	-	-	-
			b. C/SiC (Carbon Reinforced Silicon Carbide) 耐熱構造 ・胴体一般部	-	-	-
			c. 可撓断熱材 (シリカ系フェルト/アルミノボロシリケート系クロス材アウタスキン/カラス系インナスキン) ・胴体背面/アクセスパネル部/胴体後端面	-	-	-
			d. 高熱伝導性を有する複合材料 ・耐熱構造と組み合わせて熱防護系を構成	・高熱伝導複合材による耐熱複合材機体構造の設計最適化	大	○

2.3 技術課題と難易度 (6/14)

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件	技術課題	難易度	日本の優位性
1 設計と製造	1.4 構造	(4) 推進薬タンク	a. 複合材製液体酸素タンク（LOX: Liquid Oxygen） ・液体酸素適合ピッチ系炭素繊維強化熱可塑樹脂 ・3D Printing技術（AM: Additive Manufacturing）による ATP（Automated Tape Placement）成形	・世界で初めての複合材製液体酸素タンクの実現と成形技術の確立	大	○
			b. 複合材製液化天然ガスタンク（LNG: Liquefied Natural Gas） ・液体酸素適合PAN系炭素繊維強化熱可塑樹脂 ・3D Printing技術（AM: Additive Manufacturing）による ATP（Automated Tape Placement）成形	-	-	-
			c. 複合材製液体水素タンク ・液体酸素適合PAN系炭素繊維強化熱可塑樹脂 ・粘土結晶を用いた水素ガスバリア材 ・3D Printing技術（AM: Additive Manufacturing）による ATP（Automated Tape Placement）成形	-	-	-
		(5) 高圧気蓄器	a. 複合材製超高圧He/N2ガスタンク（Type IV） ・FW（Filament Winding）補強した回転成形ポリエチレンライナー	・最大充填圧力105MPa複合材製水素ガスタンク技術を軽量な宇宙用ガスタンクに応用	大	○
			b. 複合材製超高圧GOX/NGガスタンク（Type IV） ・FW（Filament Winding）補強した回転成形ポリエチレンライナー			

2.3 技術課題と難易度 (7/14)

技術分野	項目	技術要件 ■：重点技術要件	技術課題	難易度	日本の優位性
1 設計と製造 1.5 動力システム	(1) LOX/LNG ロケットエンジン	a. 燃焼室 ・TCA(Thrust Camber Assembly) ・ポンプ/点火器/電動バルブ/配管 b. TVC(Thrust Vector Control) ・ジンバル機構/電動アクチュエータ c. 推進系 ・推進薬供給系/推進薬排出系/推進薬ドレイン系 ・推進薬自己加圧系/推進薬予冷系 ・再着火システム d. 推力制御電子機器 ・ECU(Engine Control Unit) ・EDU(Engine Driver Unit)	・世界のLOX/LNGエンジン開発競争に肩を並べる技術力 ／JAXA研究開発エンジン ＊真空中推力３トン級 ＊有翼ロケット実験機 WIRES#015で飛行実証 ／IHI自社開発エンジン ＊真空中推力１０トン級 ＊フライト品として開発	大	○
	(2) エアブリージングエンジン	a. ATREX(Expander cycle Air Tubo Ramjet) ・ターボポンプ/プリクーラ/内部熱交換器/再生冷却燃焼器/タービン/排気ノズル b. ATRIUM(Air-Turbo Rocket-Integrated Utility Mission) ・GGサイクルエアターボエンジン/ロケットエンジン	・PCJT(Pre-Cooled Turbo Jet)の研究開発においては，国際的優位性を確保	大	○
	(3) 反動制御系/RCS (Reaction Conrol System)	a. コールドRCS(LN2) ・スラスター/電磁弁/配管	-	-	-
		b. ホットRCS(GOX/NG) ・燃焼室/点火器/スラスター/電磁弁/配管	-	-	-
		c. ホットRCS(LOX/LNG) ・ポンプ/燃焼室/点火器/スラスター/電磁弁/配管	-	-	-

2.3 技術課題と難易度 (8/14)

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件	技術課題	難易度	日本の優位性
1 設計と製造	1.6 機械装備	(1) 空力舵面	a. エレボン/ラダー ・複合材製舵面/電動アクチュエータ/減速機/複合材製トルクチューブ	-	-	-
			c. スピードブレーキ ・複合材製舵面/電動アクチュエータ/減速機/複合材製リンク機構	-	-	-
		(2) 空力制動装置	a. 制動シュート ・シュート本体/収納ボックス/射出機構	-	-	-
		(3) 降着装置	a. 前脚/主脚 ・複合材製脚本体/脚および脚扉展開機構 /電動ステアリング系統/電動ブレーキ系統	-	-	-
		(4) コクピット/キャビン装備	a. 座席 ・コクピットシート/客席座席	-	-	-
			b. 空調・照明・防火・防氷・徐雨系統 ・与圧装置/温度制御装置/緊急酸素供給装置 ・コクピット照明/キャビン照明　・消火器 ・風防の耐防氷加熱装置/揮発コーティング	-	-	-
		(5) ペイロード装備	a. インタフェース ・構造インタフェース：取付構造/分離機構 ・環境インタフェース：機械環境/温度環境 ・電気インタフェース：電力/信号	-	-	-

2.3 技術課題と難易度 (9/14)

技術分野			項目		技術要件 ■：重点技術要件	技術課題	難易度	日本の優位性
1	設計と製造	1.7	電気電子装備	(1) アビオニクス（含ソフトウエア）	a. 航法誘導制御システム ・航法計算機/誘導計算機/制御計算機/非常系計算機（故障検知自己診断機能）	-	-	-
					b. データ記録システム ・FDR(Flight Data Recorder)　・CVR(Cockpit Voice Recorder)	-	-	-
					c. 航法センサ ・INS(Inertial Navigation System) ・GNSS(Global Navigation Satellite System) ・FADS(Flach-type Airdata Sensing)・RA(Radio Alitimeter)	-	-	-
					d. ヘルスモニタリング ・構造歪/温度/加速度/回転数/流量	-	-	-
				(2) 表示（含ソフトウエア）	a. コクピット ・デジタルディスプレイ/HUD:Head Up Display/操縦操作端	-	-	-
					b. キャビン ・パーソナルディスプレイ	-	-	-
				(3) 電源	a. バッテリ ・アビオニクス/動力系/推進系/非常系	-	-	-
					b. 電力分配器	-	-	-
					c. 外部電源インタフェース	-	-	-
		1.8	通信	(1) 遠距離通信	a. 通信計算機 ・HF/VHF/衛星通信　・非常系通信(HF/VHF/衛星通信)	-	-	-
					b. リアルタイム画像送信 ・モニタカメラ/送信機	-	-	-
				(2) 機内外通信	a. 機内/機外交話装置 ・受話器/スピーカ/ヘッドセット/通信ジャック	-	-	-

2.3 技術課題と難易度 (10/14)

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件	技術課題	難易度	日本の優位性
3 試験	3.1 開発試験	(1) 風洞試験	a. 全機空力特性試験 ・低速風洞試験/遷音速風洞試験/超音速風洞試験/極超音速風洞試験	-	-	-
			b. フラッタ風洞試験 ・遷音速風洞試験/超音速風洞試験/極超音速風洞試験	-	-	-
		(2) 構造試作試験	a. 機械的材料特性試験 ・室温材料特性 ・極低温材料特性 ・熱伝導率特性 ・電気伝導率特性	-	-	-
			b. 機体構造強度試験 ・部分構造強度 ・全機構造強度	-	-	-
			c. 熱防御構造試験 ・アーク加熱試験	-	-	-
		(3) 推進薬タンク試験	a. 複合材製推進薬タンク試験 ・LOX/LNG/LH2	-	-	-
			b. タンク内部デバイス試験 ・スロッシング機構/渦流防止装置/再着火燃料保持機構	-	-	-
			c. 超高圧ガスタンク試験 ・GHe/GN2/GOX/NG	-	-	-
		(4) 動力システム試験	a. LOX/LNGロケットエンジン ・燃焼室/TVC/推進系/推進制御電子機器	-	-	-
			b. エアブリージングエンジン	-	-	-

2.3 技術課題と難易度 (11/14)

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件	技術課題	難易度	日本の優位性
3 試験	3.1 開発試験	(5) 機械装備試験	a. 空力舵面駆動機構試験 ・舵面/アクチュエータ/減速機/トルクチューブ/リンク機構	-	-	-
			b. 空力制動装置試験 ・シュート本体/収納ボックス/射出機構	-	-	-
			c. 降着装置試験 ・脚本体制動衝撃/脚および脚扉展開機構/電動ステアリング系統/電動ブレーキ系統	-	-	-
			d. コクピット/キャビン装備試験 ・座席/空調/照明/防火/防氷/徐雨	-	-	-
			e. ペイロード装備試験 ・インタフェース(構造/環境/電気)	-	-	-
		(6) 電気電子装備試験	a. 計算機試験 ・航法計算機/誘導計算機/制御計算機/非常系計算機/データ記録計算機 ・推力制御電子機器	-	-	-
			b. センサ試験 ・航法センサ/ヘルスモニタリングセンサ	-	-	-
			c. 通信試験 ・HF/VHF/衛星通信　・非常系通信(HF/VHF/衛星通信) ・リアルタイム画像送信　・機内/機外交話装置	-	-	-
		(7) 通信機試験	a. 遠距離通信 ・HF/VHF/衛星通信　・非常系通信(HF/VHF/衛星通信) ・リアルタイムモニタカメラ/送信機	-	-	-
			b. 機内外交話 ・受話器/スピーカ/ヘッドセット/通信ジャック	-	-	-

2.3 技術課題と難易度 (12/14)

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件	技術課題	難易度	日本の優位性
3 試験	3.2 システム試験	(1) 全機電気電子系試験	a. 機能特性試験 ・計算機間通信/FDIR (Fault Detection Isolation and Recovery) ・外部インタフェース(電源，通信，ペイロード等)	-	-	-
			b. 電波特性試験 ・アンテナ覆域(HF/VHF/衛星通信)	-	-	-
			c. 電磁環境適合性試験 ・高強度放射電界HIRF(High Intensity Radiated Fields)	-	-	-
			d. 地上模擬飛行試験 ・HILS(Hardware-In-the-Loop Simulation)	-	-	-
		(2) 全機構造試験	a. 全機荷重試験 ・制限荷重範囲内の負荷	-	-	-
			b. 全機振動試験 ・振動数/振動モード	-	-	-
		(3) 全機推進系試験	a. 推力特性試験 ・予冷機能/起動特性/推力制御応答/推力カットオフ	-	-	-
			b. 推力非常停止試験 ・プログラム停止/強制停止	-	-	-
	3.3 飛行試験	(1) 射場燃焼試験	a. ランチャ固定短秒時燃焼試験	-	-	-
		(2) 地上走行試験	a. 滑走路での推力加速停止試験	-	-	-
		(3) 飛行試験	a. フライトエンベーロープの拡大試験 ・亜音速/遷音速/超音速/極超音速	-	-	-
			b. アボート飛行試験	-	-	-

2.3 技術課題と難易度 (13/14)

技術分野		項目		技術要件 ■：重点技術要件	技術課題	難易度	日本の優位性
4 地上設備	4.1 宇宙港	(1)	旅客設備	a. チェックインカウンター	-	-	-
				b. 搭乗準備/待合室	-	-	-
				c. ボーディングブリッジ	-	-	-
		(2)	ペイロード設備	a. ペイロード準備作業室	-	-	-
				b. インタフェースチェック確認室	-	-	-
		(3)	機体ハンガー	a. 点検整備	-	-	-
				b. 地上支援装置 ・外部電源/高圧ガス充填(GHe/GN2/GOX/NG)装置	-	-	-
				c. 機体移動用トレーラ	-	-	-
		(4)	射場	a. ランチャー ・発射台/煙道	-	-	-
				b. 地上支援装置 ・進剤供給設備(LOX/LNG/LH2)/外部電源	-	-	-
		(5)	滑走路	a. 滑走路面	-	-	-
				b. 非常制動装置(Arresting Hook)	-	-	-
				c. 地上支援装置 ・牽引車/排推進薬設備	-	-	-
		(6)	運航管制設備	a. 通信設備 ・HF/VHF/衛星通信　・非常系通信(HF/VHF/衛星通信)	-	-	-
				b. 航法支援設備 ・無線標識	-	-	-
				c. 気象計測装置 ・地上風/高々度風(LiDAR:Light Detection and Ranging)	-	-	-
		(7)	飛行管制運用	a. 航空機と宇宙機の横断的航空管制	-	-	-

2.3 技術課題と難易度 (14/14)

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件	技術課題	難易度	日本の優位性
5 法制化	5.1 商業宇宙輸送法	(1) 宇宙輸送法(仮)	a. 宇宙活動法および航空法との融合	・世界的に先行している米国商業宇宙輸送法を手本に，日本の宇宙活動法および航空法に照らして法制化作業を急ぐ必要がある ・ICAOおよび欧州の動向についても引き続き詳しい調査研究が必要である	大	○
		(2) 宇宙輸送施行規則(仮)	a. 宇宙輸送型式等についての定義			
		(3) 宇宙輸送審査要領(仮)	a. 飛行ライセンス，型式証明等に関する審査要領の策定			

2.4 研究開発計画 (1/14)

注記：研究開発規模は，基礎的な研究および試作範囲とする

■は研究機関

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件		研究開発規模[億円]	2020年代 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	2030年代 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	2040年代 1Q	2Q	3Q	4Q
1 設計と製造	1.1 システム設計	(1) システム最適化	a. 進化計算を援用した多目的複合領域システム最適化 ・最適軌道生成 ・最適機体形状 ・エンジン推進系の最適化	図2.4-1																									
		(2) 耐故障性設計	a. 安全性設計基準（確率論的安全性と故障許容設計） ・FAT (Functional Hazard Analysis)/FTA (Fault Tree Analysis)/FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)																										
		(3) 安全飛行運用	a. ミッションアボートと条件設定 ・FDIR (Fault Detection Isolation and Recovery) ・遠隔誘導制御支援　・エンジン停止と再着火 ・滑走路非常着陸　・洋上着水																										
		(4) 耐空性維持設計	a. 点検と整備計画 ・永久寿命設計該当部品の選定と寿命予測 ・故障許容設計該当部品の選定と点検/整備/修理期間の予測																										
		(5) ヘルスモニタリング	a. 機体構造および構造部品																										
			b. エンジンおよび推進系																										
			c. 空力舵面，機械装備品																										
			d. アビオニクスおよび電気電子装備品ヘルスモニタリング																										

2.4 研究開発計画 (2/14)

注記：研究開発規模は，基礎的な研究および試作範囲とする

■は研究機関

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件		研究開発規模[億円]	2020年代 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	2030年代 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	2040年代 1Q 2Q 3Q 4Q
1 設計と製造	1.2 空力設計		a. 遺伝的手法を用いた最適翼型 ・トリム範囲の広い超音速翼型の最適化	図2.4-2				
			b. 亜音速，遷音速，超音速と極超音速飛行を可能とする最適飛行形状 ・亜音速領域：最大揚抗比の向上，高迎角翼単失速の回避 ・遷音速，超音速領域：最適翼型設計によるトリム範囲の拡大 ・極超音速領域：高迎角トリムと縦，横・方向安静性と制御性の確保	図2.4-3				
			c. 二段式スペースプレーン（小型衛星打上）の分離解析 ・CFD (Computational Fluid Dynamics) を用いた空力干渉 ・最適配置と分離運動解析（軌道および姿勢制御）	図2.4-4				
			d. 極超音速インテークの設計 ・亜音速および超音速燃焼条件の確立　・胴体下面圧縮効果					
			e. 空力加熱の推定と低減技術 ・主として断熱圧縮，表面摩擦に加えてイオン化混合気体の加熱 ・ノーズおよび主翼前縁等の空力加熱形状の最適設計					
			f. 離着陸騒音予測と低減技術 ・スペースポート周辺環境アセスメント					
			g. 柔軟な耐熱ガラスコーティングによる摩擦抵抗の低減 ・柔軟ガラスコーティングによる摩擦抵抗の低減	Classified				
			h. 風洞試験技術 ・CFD (Computational Fluid Dynamics) を援用したベースドラッグの推定と風洞試験結果の補正技術					

2.4 研究開発計画 (3/14)

注記：研究開発規模は，基礎的な研究および試作範囲とする

■は研究機関

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件		研究開発規模[億円]	2020年代 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	2030年代 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	2040年代 1Q 2Q 3Q 4Q
1 設計と製造	1.3 航法誘導制御	(1) 航法	a. 複合航法 ・慣性航法とGNSS(Global Navigation Satellite System)					
			b. FADS (Flash-type Air Data Sensing) System ・対気速度，マッハ数，気圧高度，迎角，横滑り角の推定 ・多孔式(17孔)による２故障許容システムの実現 ・３Dプリンターを活用した２層基準圧室構造による計測精度の向上	図2.4-5				
			c. 電波航法 ・レーダ，自動方向探知機 (ADF: Automatic Direction Finder)，超短波全方向式無線標識 (VOR: Very High Frequency Omni-directional Range)，距離測定装置 (DME: Distance Measuring Equipment)，マイクロ波着陸装置 (MLS: Microwave Landing System)					
			d. SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) ・リアルタイムカメラ ・LIDAR (Light Detection and Ranging)					

2.4 研究開発計画 (4/14)

注記：研究開発規模は，基礎的な研究および試作範囲とする

■は研究機関

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件		研究開発規模[億円]	2020年代 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	2030年代 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	2040年代 1Q 2Q 3Q 4Q
1 設計と製造	1.3 航法誘導制御	(2) 誘導	a. 上昇動力飛行時の多様な最適軌道生成と誘導 ・進化計算による最適軌道と誘導コマンドの実時間生成 ・エンジンジンバルと空力舵面の最適制御力配分	図2.4-6				
			b. 再突入飛行経路の誘導 ・空力加熱コリドーの設定 ・最大飛行荷重条件の設定 ・平行滑空条件の設定					
			c. 滑空およびエネルギー調整フェーズの多様な最適軌道生成と誘導 ・凸二次計画法と進化計算による最適軌道と誘導コマンドの実時間生成 ・平衡滑空とエネルギ調整飛行軌道の最適化 ・滑走路への経路および方位のアライン	図2.4-6				
			d. 着陸経路への誘導 ・最大揚抗比フロントサイドにおける経路修正荷重と平衡滑空条件の設定 ・フレア高度の設定					
		(3) 制御	a. 多階層ダイナミックインバージョン理論を用いた適応姿勢制御 ・幅広い飛行環境およびアボートモードに対応した姿勢制御 ・事前の飛行制御解析等による姿勢制御ゲインスケジューリングの回避 ・オンボードでのリアルタイム安定余裕補償	図2.4-7				

2.4 研究開発計画 (5/14)

注記：研究開発規模は，基礎的な研究および試作範囲とする

■は研究機関

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件		研究開発規模[億円]	2020年代 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	2030年代 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	2040年代 1Q	2Q	3Q	4Q
1 設計と製造	1.4 構造	(1) 機体構造	a. サブオービタル/オービタルスペースプレーン ・ハニカム(モノリシック/アルミニウム/アラミド)サンドイッチ複合材構造 ・複合材製主翼/複合材製胴体/複合材製尾翼/複合材製推力構造																										
			b. 高電気伝導性を有する複合材料 ・耐雷複合材構造	Classified																									
		(2) 熱防御構造	a. C/C (Carbon Reinforced Carbon) 耐熱構造 ・機首構造/主翼前縁構造/尾翼前縁構造																										
			b. C/SiC (Carbon Reinforced Silicon Carbide) 耐熱構造 ・胴体一般部																										
			c. 可撓断熱材 (シリカ系フェルト/アルミノボロシリケート系クロス材アウタスキン/カラス系インナスキン) ・胴体背面/アクセスパネル部/胴体後端面																										
			d. 高熱伝導性を有する複合材料 ・耐熱構造と組み合わせて熱防護系を構成	Classified																									

2.4 研究開発計画 (6/14)

注記：研究開発規模は，基礎的な研究および試作範囲とする

■は研究機関

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件		研究開発規模[億円]	2020年代										2030年代										2040年代			
						0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1Q	2Q	3Q	4Q
1 設計と製造	1.4 構造	(4) 推進薬タンク	a. 複合材製液体酸素タンク（LOX: Liquid Oxygen） ・液体酸素適合ピッチ系炭素繊維強化熱可塑樹脂 ・3D Printing技術（AM: Additive Manufacturing）による ATP（Automated Tape Placement）成形	図2.4-8																									
			b. 複合材製液化天然ガスタンク（LNG: Liquefied Natural Gas） ・液体酸素適合PAN系炭素繊維強化熱可塑樹脂 ・3D Printing技術（AM: Additive Manufacturing）による ATP（Automated Tape Placement）成形																									
			c. 複合材製液体水素タンク ・液体酸素適合PAN系炭素繊維強化熱可塑樹脂 ・粘土結晶を用いた水素ガスバリア材 ・3D Printing技術（AM: Additive Manufacturing）による ATP（Automated Tape Placement）成形																									
		(5) 高圧気蓄器	a. 複合材製超高圧He/N2ガスタンク（Type IV） ・FW（Filament Winding）補強した回転成形ポリエチレンライナー	図2.4-9																								
			b. 複合材製超高圧GOX/NGガスタンク（Type IV） ・FW（Filament Winding）補強した回転成形ポリエチレンライナー																									

2.4 研究開発計画 (7/14)

注記：研究開発規模は，基礎的な研究および試作範囲とする

■は研究機関

技術分野	項目	技術要件 ■：重点技術要件		研究開発規模[億円]	2020年代 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	2030年代 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	2040年代 1Q 2Q 3Q 4Q
1 設計と製造 / 1.5 動力システム	(1) LOX/LNGロケットエンジン	a. 燃焼室 ・TCA(Thrust Camber Assembly) ・ポンプ/点火器/電動バルブ/配管	Classified				
		b. TVC(Thrust Vector Control) ・ジンバル機構/電動アクチュエータ					
		c. 推進系 ・推進薬供給系/推進薬排出系/推進薬ドレイン系 ・推進薬自己加圧系/推進薬予冷系 ・再着火システム					
		d. 推力制御電子機器 ・ECU(Engine Control Unit) ・EDU(Engine Driver Unit)					
	(2) エアブリージングエンジン	a. ATREX(Expander cycle Air Tubo Ramjet) ・ターボポンプ/プリクーラ/内部熱交換器/再生冷却燃焼器/タービン/排気ノズル	図2.4-10				
		b. ATRIUM(Air-Turbo Rocket-Integrated Utility Mission) ・GGサイクルエアターボエンジン/ロケットエンジン					
	(3) 反動制御系/RCS (Reaction Conrol System)	a. コールドRCS(LN2) ・スラスター/電磁弁/配管					
		b. ホットRCS(GOX/NG) ・燃焼室/点火器/スラスター/電磁弁/配管					
		c. ホットRCS(LOX/LNG) ・ポンプ/燃焼室/点火器/スラスター/電磁弁/配管					

2.4 研究開発計画 (8/14)

注記：研究開発規模は，基礎的な研究および試作範囲とする

■は研究機関

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件	研究開発規模[億円]	2020年代										2030年代										2040年代			
					0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1Q	2Q	3Q	4Q
1 設計と製造	1.6 機械装備	(1) 空力舵面	a. エレボン/ラダー ・複合材製舵面/電動アクチュエータ/減速機/複合材製トルクチューブ																									
			c. スピードブレーキ ・複合材製舵面/電動アクチュエータ/減速機/複合材製リンク機構																									
		(2) 空力制動装置	a. 制動シュート ・シュート本体/収納ボックス/射出機構																									
		(3) 降着装置	a. 前脚/主脚 ・複合材製脚本体/脚および脚扉展開機構 /電動ステアリング系統/電動ブレーキ系統																									
		(4) コクピット/キャビン装備	a. 座席 ・コクピットシート/客席座席																									
			b. 空調・照明・防火・防水・徐雨系統 ・与圧装置/温度制御装置/緊急酸素供給装置 ・コクピット照明/キャビン照明　・消火器 ・風防の耐防氷加熱装置/揮発コーティング																									
		(5) ペイロード装備	a. インタフェース ・構造インタフェース：取付構造/分離機構 ・環境インタフェース：機械環境/温度環境 ・電気インタフェース：電力/信号																									

2.4 研究開発計画 (9/14)

注記：研究開発規模は，基礎的な研究および試作範囲とする

■は研究機関

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件	研究開発規模[億円]	2020年代 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	2030年代 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	2040年代 1Q 2Q 3Q 4Q
1 設計と製造	1.7 電気電子装備	(1) アビオニクス（含ソフトウエア）	a. 航法誘導制御システム ・航法計算機/誘導計算機/制御計算機/非常系計算機 （故障検知自己診断機能）				
			b. データ記録システム ・FDR(Flight Data Recorder)　・CVR(Cockpit Voice Recorder)				
			c. 航法センサ ・INS(Inertial Navigation System) ・GNSS(Global Navigation Satellite System) ・FADS(Flach-type Airdata Sensing)・RA(Radio Alitimeter)				
			d. ヘルスモニタリング ・構造歪/温度/加速度/回転数/流量				
		(2) 表示（含ソフトウエア）	a. コクピット ・デジタルディスプレイ/HUD:Head Up Display/操縦操作端				
			b. キャビン ・パーソナルディスプレイ				
		(3) 電源	a. バッテリ ・アビオニクス/動力系/推進系/非常系				
			b. 電力分配器				
			c. 外部電源インタフェース				
	1.8 通信	(1) 遠距離通信	a. 通信計算機 ・HF/VHF/衛星通信　・非常系通信(HF/VHF/衛星通信)				
			b. リアルタイム画像送信 ・モニタカメラ/送信機				
		(2) 機内外通信	a. 機内/機外交話装置 ・受話器/スピーカ/ヘッドセット/通信ジャック				

2.4 研究開発計画（10/14） 注記：研究開発規模は，基礎的な研究および試作範囲とする

■は研究機関

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件	研究開発規模[億円]	2020年代										2030年代										2040年代			
					0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1Q	2Q	3Q	4Q
3 試験	3.1 開発試験	(1) 風洞試験	a. 全機空力特性試験 ・低速風洞試験/遷音速風洞試験/超音速風洞試験/極超音速風洞試験																									
			b. フラッタ風洞試験 ・遷音速風洞試験/超音速風洞試験/極超音速風洞試験																									
		(2) 構造試作試験	a. 機械的材料特性試験 ・室温材料特性 ・極低温材料特性 ・熱伝導率特性 ・電気伝導率特性																									
			b. 機体構造強度試験 ・部分構造強度 ・全機構造強度																									
			c. 熱防御構造試験 ・アーク加熱試験																									
		(3) 推進薬タンク試験	a. 複合材製推進薬タンク試験 ・LOX/LNG/LH2																									
			b. タンク内部デバイス試験 ・スロッシング機構/渦流防止装置/再着火燃料保持機構																									
			c. 超高圧ガスタンク試験 ・GHe/GN2/GOX/NG																									
		(4) 動力システム試験	a. LOX/LNGロケットエンジン ・燃焼室/TVC/推進系/推進制御電子機器																									
			b. エアブリージングエンジン																									

2.4 研究開発計画（11/14） 注記：研究開発規模は，基礎的な研究および試作範囲とする

■は研究機関

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件	研究開発規模[億円]	2020年代 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	2030年代 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	2040年代 1Q 2Q 3Q 4Q
3 試験	3.1 開発試験	(5) 機械装備試験	a. 空力舵面駆動機構試験 ・舵面/アクチュエータ/減速機/トルクチューブ/リンク機構				
			b. 空力制動装置試験 ・シュート本体/収納ボックス/射出機構				
			c. 降着装置試験 ・脚本体制動衝撃/脚および脚扉展開機構/電動ステアリング系統/電動ブレーキ系統				
			d. コクピット/キャビン装備試験 ・座席/空調/照明/防火/防氷/徐雨				
			e. ペイロード装備試験 ・インタフェース(構造/環境/電気)				
		(6) 電気電子装備試験	a. 計算機試験 ・航法計算機/誘導計算機/制御計算機/非常系計算機/データ記録計算機 ・推力制御電子機器				
			b. センサ試験 ・航法センサ/ヘルスモニタリングセンサ				
			c. 通信試験 ・HF/VHF/衛星通信　・非常系通信(HF/VHF/衛星通信) ・リアルタイム画像送信　・機内/機外交話装置				
		(7) 通信機試験	a. 遠距離通信 ・HF/VHF/衛星通信　・非常系通信(HF/VHF/衛星通信) ・リアルタイムモニタカメラ/送信機				
			b. 機内外交話 ・受話器/スピーカ/ヘッドセット/通信ジャック				

2.4 研究開発計画（12/14） 注記：研究開発規模は，基礎的な研究および試作範囲とする

■は研究機関

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件	研究開発規模[億円]	2020年代 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	2030年代 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	2040年代 1Q 2Q 3Q 4Q
3 試験	3.2 システム試験	(1) 全機電気電子系試験	a. 機能特性試験 ・計算機間通信/FDIR (Fault Detection Isolation and Recovery) ・外部インタフェース(電源，通信，ペイロード等)				
			b. 電波特性試験 ・アンテナ覆域(HF/VHF/衛星通信)				
			c. 電磁環境適合性試験 ・高強度放射電界HIRF(High Intensity Radiated Fields)				
			d. 地上模擬飛行試験 ・HILS(Hardware-In-the-Loop Simulation)				
		(2) 全機構造試験	a. 全機荷重試験 ・制限荷重範囲内の負荷				
			b. 全機振動試験 ・振動数/振動モード				
		(3) 全機推進系試験	a. 推力特性試験 ・予冷機能/起動特性/推力制御応答/推力カットオフ				
			b. 推力非常停止試験 ・プログラム停止/強制停止				
	3.3 飛行試験	(1) 射場燃焼試験	a. ランチャ固定短秒時燃焼試験				
		(2) 地上走行試験	a. 滑走路での推力加速停止試験				
		(3) 飛行試験	a. フライトエンベーロープの拡大試験 ・亜音速/遷音速/超音速/極超音速				
			b. アポート飛行試験				

2.4 研究開発計画（13/14）

注記：研究開発規模は，基礎的な研究および試作範囲とする

■は研究機関

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件	研究開発規模[億円]	2020年代										2030年代										2040年代			
					0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1Q	2Q	3Q	4Q
4 地上設備	4.1 宇宙港	(1) 旅客設備	a. チェックインカウンター																									
			b. 搭乗準備/待合室																									
			c. ボーディングブリッジ																									
		(2) ペイロード設備	a. ペイロード準備作業室																									
			b. インタフェースチェック確認室																									
		(3) 機体ハンガー	a. 点検整備																									
			b. 地上支援装置 ・外部電源/高圧ガス充填(GHe/GN2/GOX/NG)装置																									
			c. 機体移動用トレーラ																									
		(4) 射場	a. ランチャー ・発射台/煙道																									
			b. 地上支援装置 ・進剤供給設備(LOX/LNG/LH2)/外部電源																									
		(5) 滑走路	a. 滑走路面																									
			b. 非常制動装置(Arresting Hook)																									
			c. 地上支援装置 ・牽引車/排推進薬設備																									
		(6) 運航管制設備	a. 通信設備 ・HF/VHF/衛星通信　・非常系通信(HF/VHF/衛星通信)																									
			b. 航法支援設備 ・無線標識																									
			c. 気象計測装置 ・地上風/高々度風(LiDAR:Light Detection and Ranging)																									
		(7) 飛行管制運用	a. 航空機と宇宙機の横断的航空管制																									

2.4 研究開発計画（14/14）

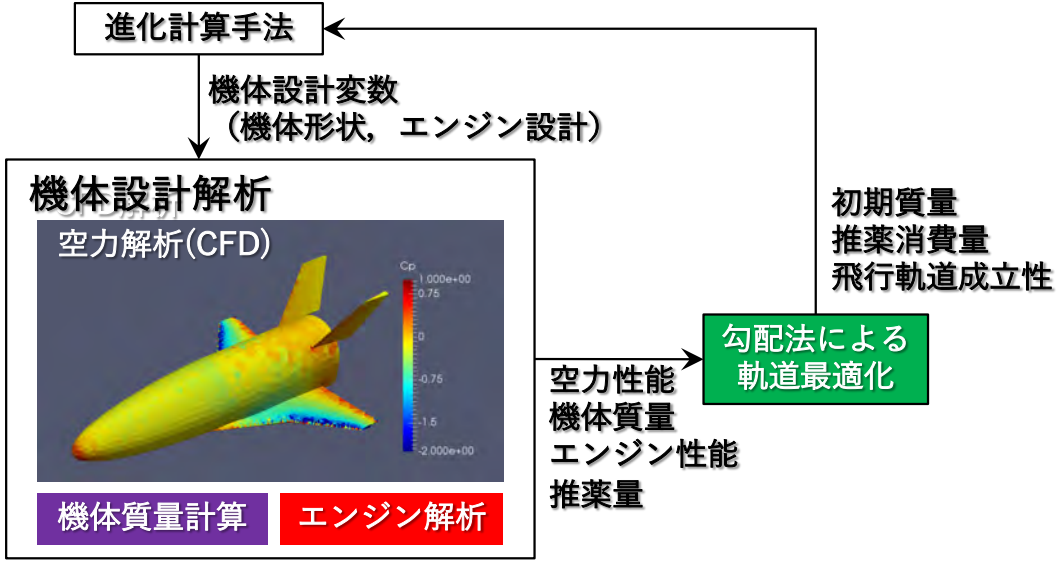
注記：研究開発規模は，基礎的な研究および試作範囲とする

■は研究機関

技術分野		項目	技術要件 ■：重点技術要件		研究開発規模[億円]	2020年代										2030年代										2040年代			
						0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1Q	2Q	3Q	4Q
5 法制化	5.1 商業宇宙輸送法	(1) 宇宙輸送法(仮)	a. 宇宙活動法および航空法との融合	図2.4-11																									
		(2) 宇宙輸送施行規則(仮)	a. 宇宙輸送型式等についての定義																										
		(3) 宇宙輸送審査要領(仮)	a. 飛行ライセンス，型式証明等に関する審査要領の策定																										

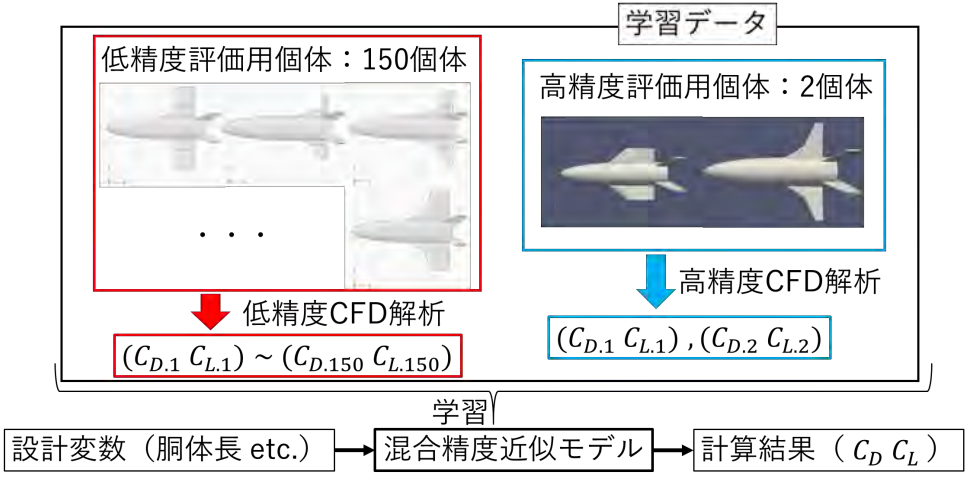
進化計算手法

・生物の進化メカニズムを摸擬したような探索アルゴリズム
・多目的問題を扱うことが可能で，大域的な解探索性能に優れるため，機体設計変数に適用



提案手法

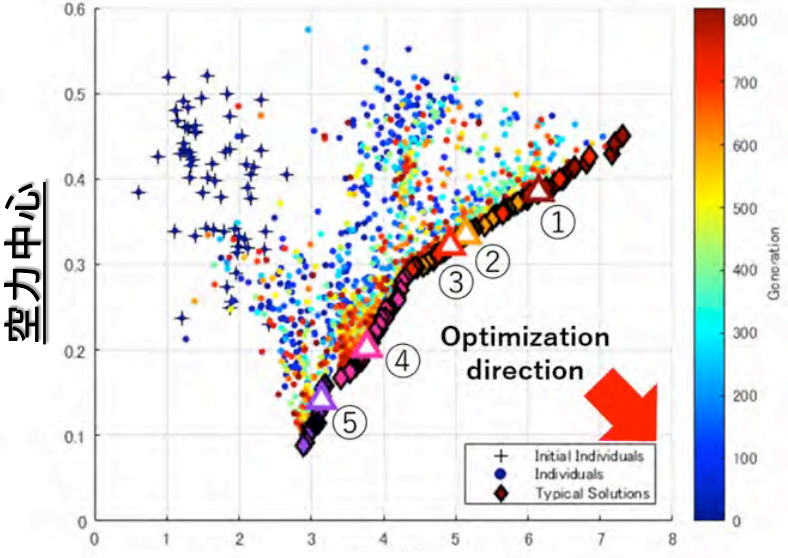
空力解析で近似モデルの利用
→入出力関係を表すデータを用いて代数計算を行い目的関数の推定値を計算する



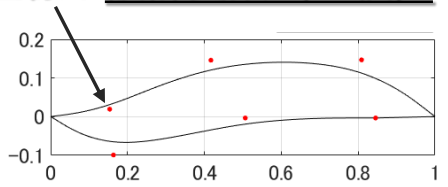
課題
・計算コストの制約から低コスト低精度のCFD解析
・詳細な空力形状の最適化はしていない

図2.4-1　進化計算を援用した多目的複合領域システム最適化

[研究背景]
スペースプレーンの機体形状は様々な飛行領域においての要求を満たす性能が必要
→ 自由度の高い3次元形状での最適化計算が必要
設計変数・計算コスト増加



[提案手法：主成分分析]
制御点（赤点）を定義する座標が設計変数（12個）



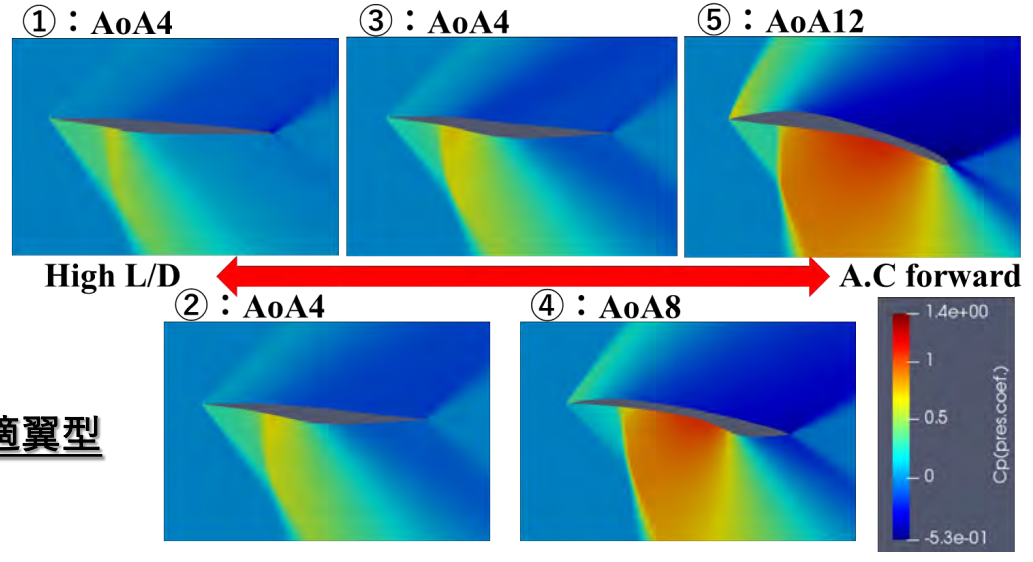


図2.4-2 遺伝的手法を用いた最適翼型(超音速)

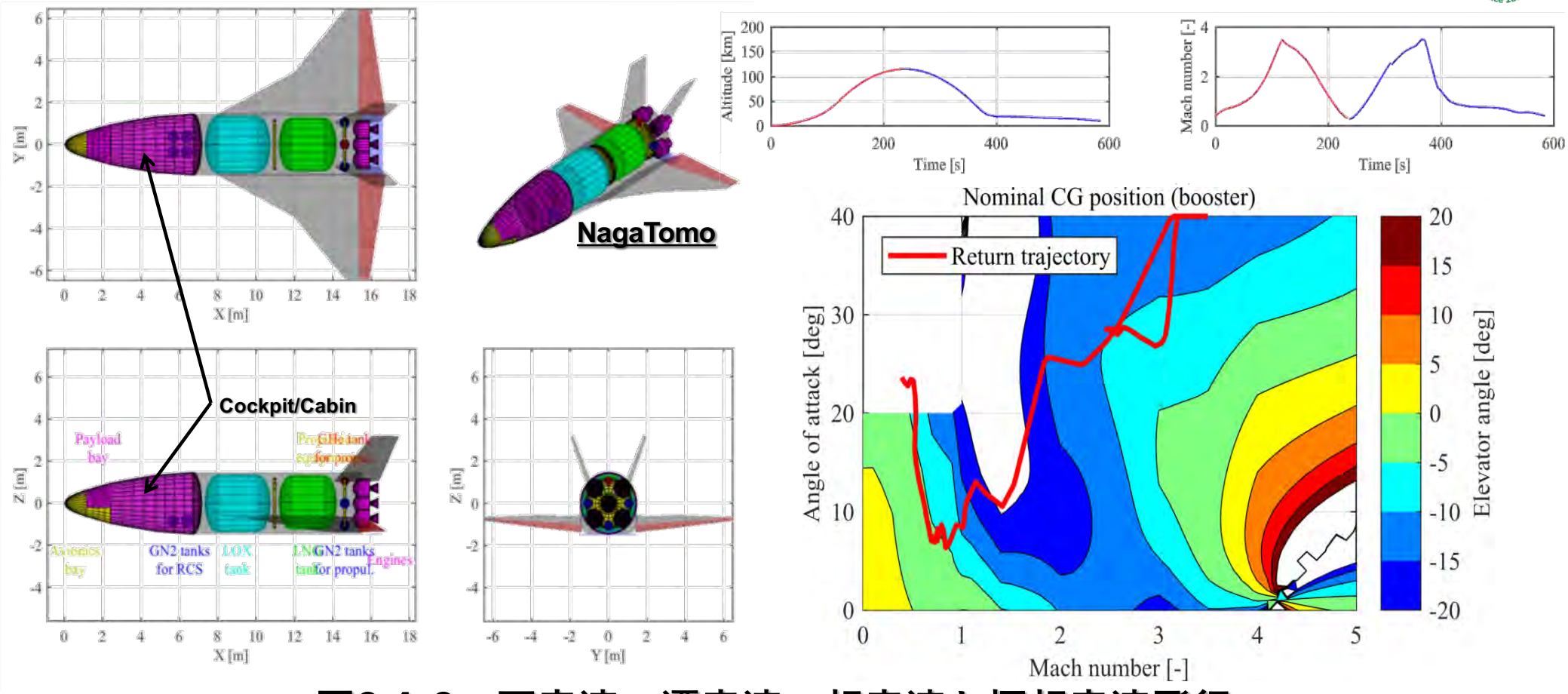
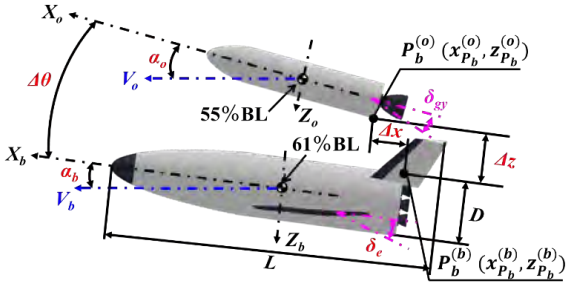
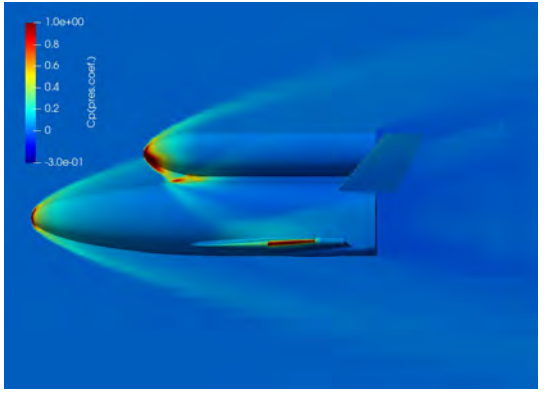


図2.4-3　亜音速，遷音速，超音速と極超音速飛行を可能とする最適飛行形状

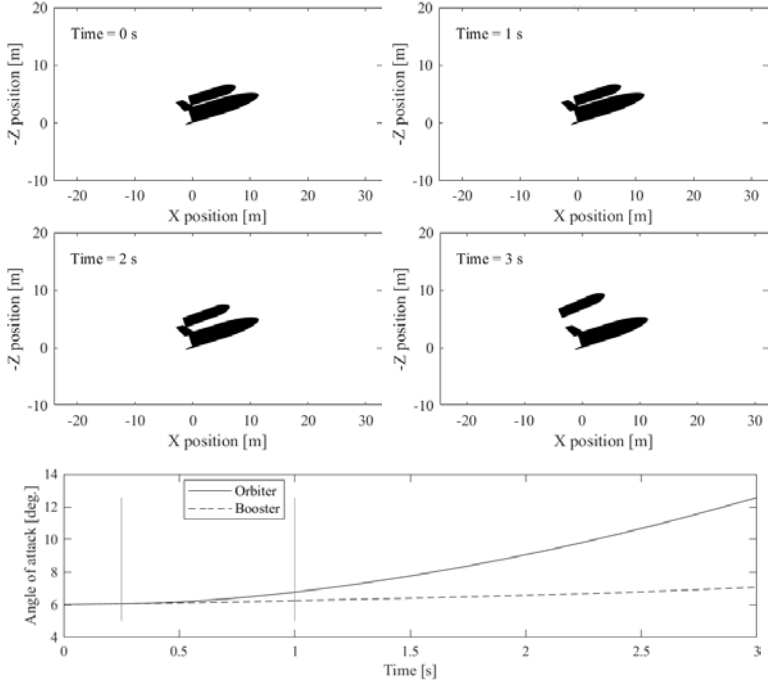
小型衛星打ち上げ用二段式有翼ロケットの空力干渉効果を考慮した分離解析
→対象機体において分離に適した結合位置および迎角を決定する.





機体間の相対位置を変化させたCFD解析

CFD解析によって得られた空力係数を計算プログラムに内挿.
さらに，CFD解析の結果から分離に適した相対位置を決めてシミュレーション.



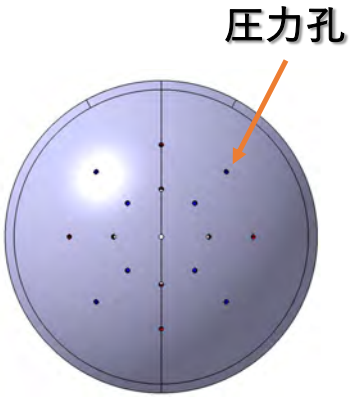
運動計算を含めた分離飛行シミュレーション

図2.4-4　二段式スペースプレーン（小型衛星打上）の分離解析

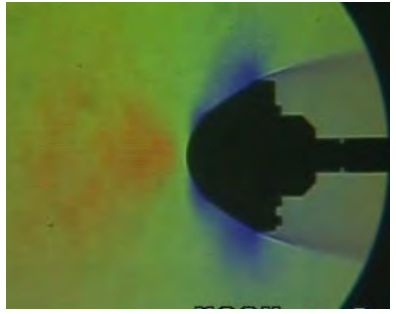
FADS (Flush-type Air Data Sensing)：

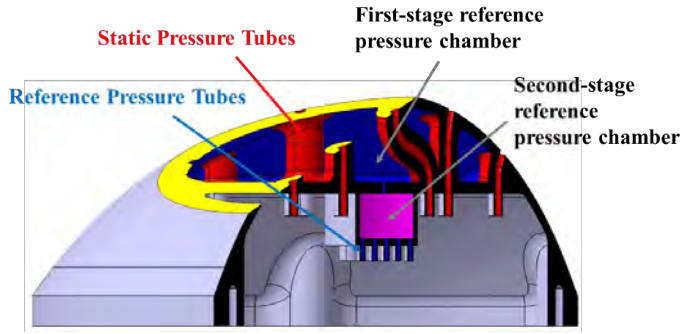
亜音速から極超音速を飛行する機体において，誘導制御に必要なエアデータを取得

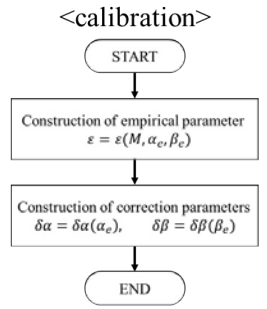
- **センサの1故障許容と2故障判別，極度な低動圧により推定精度の低下を判別**
- **２層基準圧室による幅広い動圧域で高精度推定を実現**
- **３Dプリンターによる製造**



FADS正面図







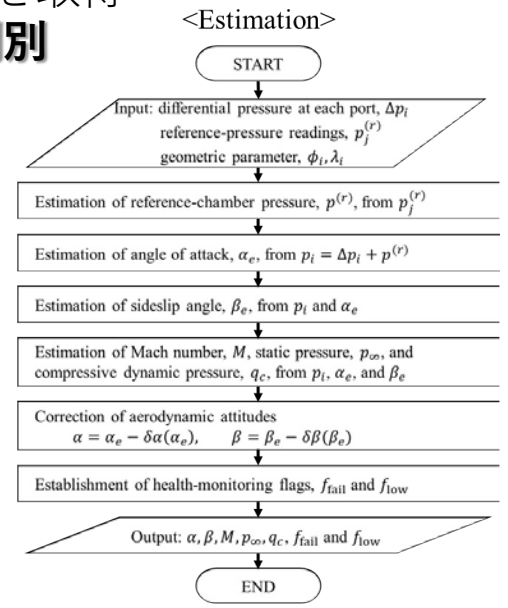
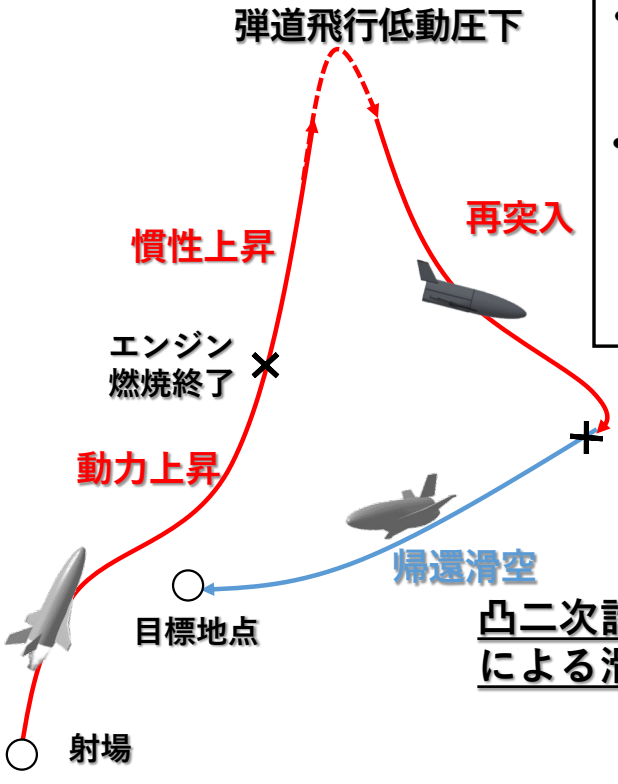


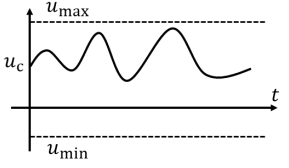
図2.4-5　FADS (Flash-type Air Data Sensing) System



遺伝的アルゴリズムを用いた実時間最適軌道生成と誘導

動力上昇～再突入フェーズ

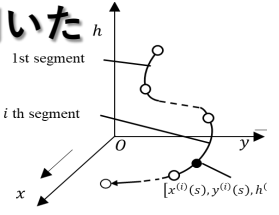
- 飛行環境が激しく変化し，機体制約を満たすコマンド算出に課題
- フーリエ級数を用いた誘導コマンド表現



凸二次計画法と進化計算の複合による滑空帰還軌道群の生成

帰還滑空フェーズ

- 着陸滑走路にアプローチ可能な軌道経路算出に課題
- ベジエ曲線を用いた軌道形状表現



進化計算を用いた軌道の最適化

凸二次計画と進化計算の複合による滑空帰還軌道群の生成

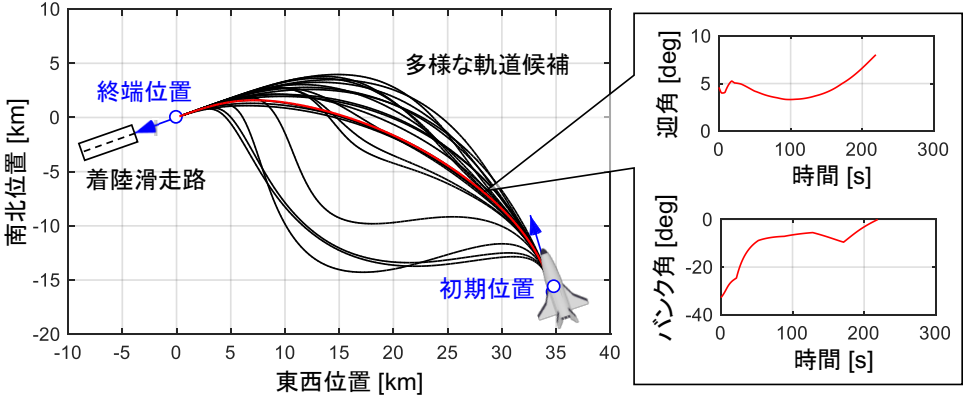


図2.4-6　リアルタイム最適軌道生成と誘導

■ 多階層ダイナミックインバージョン法の研究

制御系が煩雑化になることを防ぐため，機体とアクチュエータの運動を階層化しそれぞれDI法を適用

上階層(機体の飛行ダイナミクス)
下階層(アクチュエータダイナミクス)

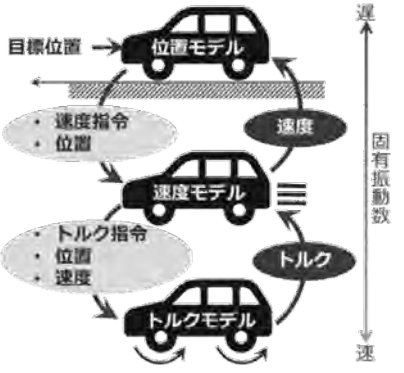
$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}f_1(x_1)\\ f_2(x_1,x_2)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}G_1(x_1)y_2\\ G_2(x_1,x_2)u\end{bmatrix},\quad \begin{bmatrix}y_1\\ y_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}h_1(x_1)\\ h_2(x_2)\end{bmatrix}$$

下階層の応答 $y_2 = Pu$ とすると

上階層の応答 $y_1^{(r)} = \underbrace{(1-P)L_f^r h(x_1)}_{\text{非線形項}} + \underbrace{Pv_1}_{\text{線形項}} \cong Pv_1$

下階層の応答が十分に速いとき，上階層の応答が線形で近似できる

応答速度の違いによりモデルをサブシステムに分割し，モデル毎に制御設計を行う



階層化のイメージ

■制御系のオンボード安定性補償に関する研究

モデル化誤差や外乱を考慮しても目標値に追従できる制御システムが必要

飛行環境に依らずDI制御則の十分な安定性が確保されるように疑似入力のパラメータを飛行中に自動で調整

図2.4-7　多階層ダイナミックインバージョン理論を用いた適応姿勢制御

■ 世界初pCFRPC (pitch Carbon Fiber Reinforced PolyCarbonate) 製液体酸素タンクの研究開発

- Patent Application No. 17016 (Japan) 「Flame-Retardant Carbon Fiber Reinforced Plastic」(October 13, 2017)
- Patent applications to US, China, France and Germany assisted by JST Subsidy

Polycarbonate Impregnated Pitch Carbon Fiber (Open Fiber Tape)

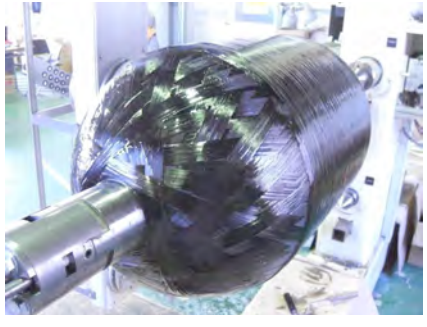
DLR - Project PROCOMP

A new production and design method for a hydrogen fuel tank (https://www.youtube.com/watch?v=xlMHHebGuGI&t=9s)

図2.4-8　複合材製液体酸素タンク

項目	条件
充填気体	水素
設計圧力	105MPa
破壊圧力	236.3MPa (安全率2.25)
容量	100,300リッター
水素透過率	5cm³/(L･h)以下

ｶﾞｽﾊﾞﾘｱ材G-Polymerを添加したポリエチレンを回転成型によりライナーを成形（@㈱日本耐蝕）



フィラメントワインディング

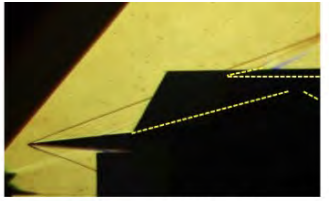
加熱炉

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構　水素利用技術研究開発事業（2016年度～2019年度）「燃料電池自動車及び水素ステーション用低コスト機器・システム等に関する研究開発 樹脂製ライナー低コスト複合容器蓄圧器の開発」

図2.4-9　複合材製超高圧水素ガスタンク

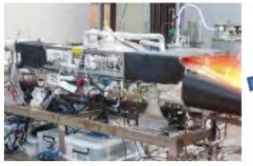
地上燃焼実験

極超音速予冷ターボジェット



インテーク周囲流

マッハ2飛行実験

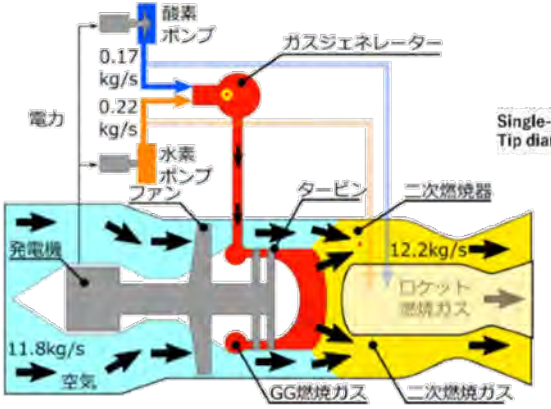


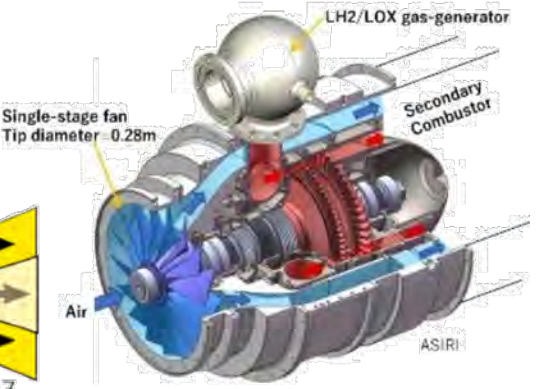
マッハ4模擬環境実験

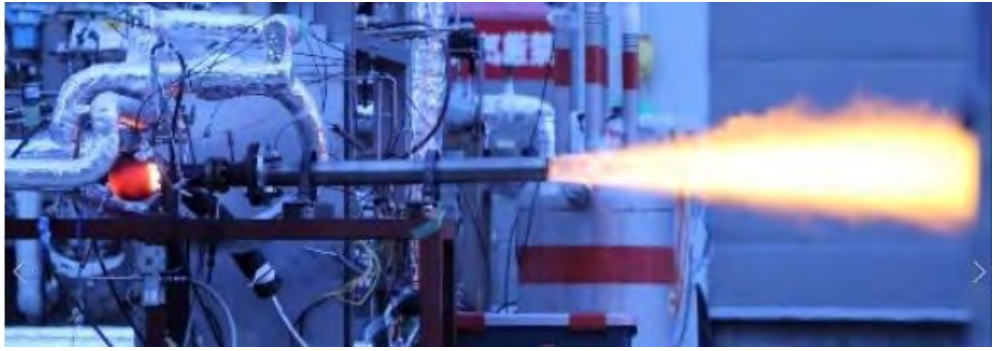
マッハ4推進風洞実験

ATREX(Expander cycle Air Tubo Ramjet)

Ref. 佐藤他, 「宇宙輸送用エアブリージングエンジンの研究開発」, 第64回宇宙雅楽技術連合講演会, 2020年１２月.







ATRIUM(Air-Turbo Rocket-Integrated Utility Mission)

図2.4-10　エアブリージングエンジン

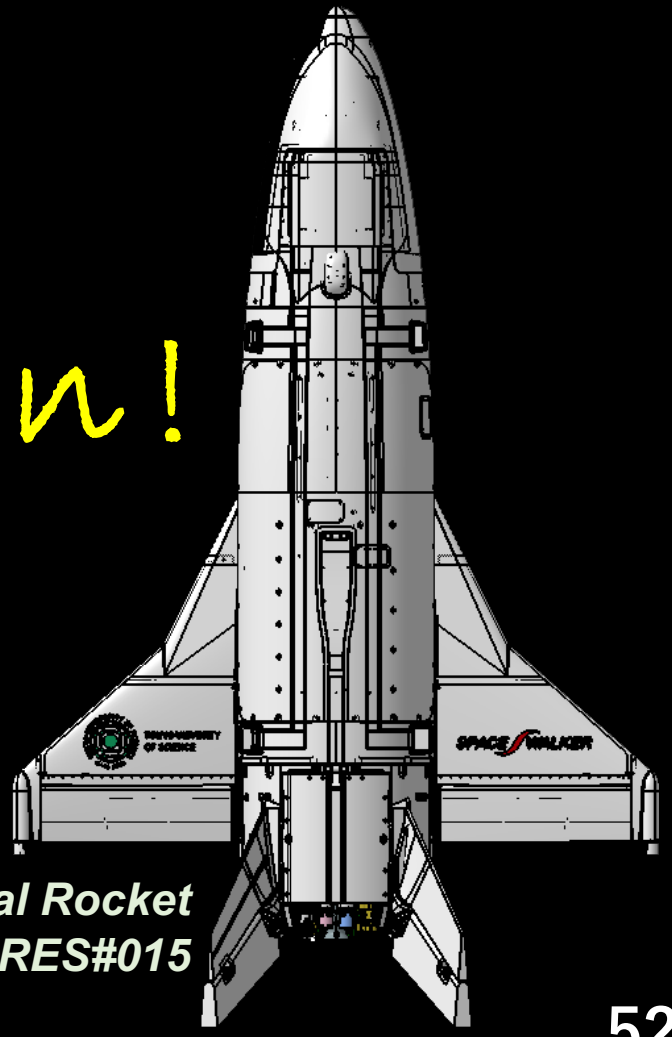
CFR (Code of Federal Regulation) 14 Aeronautics and Space
Vol. 4, Chapter III COMMERCIAL SPACE TRANSPORTATION, Part 400-1199

	Title	和訳	文字数(英文)	翻訳達成率 [%]	Expendable[%]	Reusable[%]	Suborbital[%]	Orbital[%]
SubchapterA	General	一般						
400	Basis and Scope	基準及び範囲	7,020	100	100	0	0	0
401	Organization and Definitions	組織及び定義	35,261	100	0	0	0	0
SubchapterB	Procedure	手続き						
404	Petition and Rulemaking Procedures	申請及び法整備に関する手続き	12,994	100	0	27	0	0
405	Compliance and Enforcement	コンプライアンス及び施行	7,821	100	0	33	0	0
406	Investigations, Enforcement, and Administrative Review	調査, 施行, 及び機関による評価	77,625	100	0	0	0	0
SubchapterC	Licensing	ライセンス						
411	*[Reserved]*	[留保]						
413	License Application Procedures	ライセンス申請手続き	20,002	100	0	8	0	0
414	SAFETY Element Approvals	安全要素証明	24,652	100	0	0	0	0
415	Launch License	打上げライセンス	57,416	100	100	0	40	42
417	Launch SAFETY	打上げ安全	629,320	91	100	0	27	10
418-419	*[Reserved]*	[留保]						
420	License to Operate a Launch Site	発射場運営ライセンス	112,684	100	100	100	100	100
421-430	*[Reserved]*	[留保]						
431	Launch and Reentry of a Reusable Launch Vehicle (RLV)	再利用ロケットにおける打上げと再突入	45,755	100	0	41	5	5
432	*[Reserved]*	[留保]						
433	License to Operate a Reentry Site	再突入サイト運営ライセンス	7,593	100	0	0	0	0
434	*[Reserved]*	[留保]						
435	Reentry of a Reentry Vehicle Other Than a Reusable Launch Vehicle (RLV)	再使用型ロケット（RLV）以外の再突入機の再突入について	14,574	100	53	42	0	0
436	*[Reserved]*	[留保]						
437	Experimental Permits	試験許可	28,968	100	0	100	100	0
438-439	*[Reserved]*	[留保]						
440	Financial Responsibility	財務責任	133,759	100	0	82	82	2
441-449	*[Reserved]*	[留保]						
450	Launch and Reentry License Requirements	打上げ及び再突入ライセンス要件	123,982	62	38	39	7	7
451-459	*[Reserved]*	[留保]						
460	Human Space Flight Requirements	有人宇宙飛行要件	16,333	100	13	31	19	6
461-1119	*[Reserved]*	[留保]						

図2.4-11　FAA商業宇宙輸送法の翻訳進捗状況

Thanks for your attention!

- SPACE WALKER Inc.
  (https://www.space-walker.co.jp)
- Tokyo University of Science
  (https://space-systems.me.noda.tus.ac.jp/en/)



Winged Experimental Rocket
WIRES#015