

我が国の将来宇宙輸送システムに関する動向(JAXA 1/5)

20～30年後に実現する目標として、二段式完全再使用型輸送システムを想定。主要な技術課題を克服し、小型のフライト実証等により技術的成熟度を高めてから、本格的なシステム開発に着手する計画。

【取組みの考え方】

➤「完全再使用型宇宙輸送システム」および「二地点間輸送サブオービタル機」の両システム実現が、宇宙輸送システムの究極の姿であるが、単段式完全再使用型宇宙輸送システムは技術的な困難が予測されるため**二段式完全再使用型宇宙輸送システム**を目標とする。

➤必要な技術は多岐にわたり、またシステム開発に着手するために克服すべき主要技術課題も存在するため、効率的・段階的に技術レベルを上げる取り組みが必要である。

【再使用型輸送システムの技術的課題】

使い切り部分を少なくし、効率的に繰り返し使用することにより、輸送コストの大幅な低減が期待できるが、以下の技術的な課題を克服する必要がある。

- 軌道に到達できる増速能力を持ち、再使用可能な状態で帰還するためには、**厳しい軽量化**が必要
 - ✓ 増速能力は、エンジン性能と、機体全体の質量のうち推算薬が占める割合（構造効率）で決まるが、機体を再使用可能な状態で回収するためには、翼や降着装置などのロケットにはない仕組みが必要
 - ✓ 大気圏に再突入して地上に帰還する際に、高温になる周囲の大気から機体を守るための熱防護システム（TPS）と呼ばれる特別な構造も必要

➤エンジンの高性能化と長寿命化を両立

➤飛行した機体を短期間で飛行可能とすること

【開発の方策】

➤主要技術課題を解決するための要素技術について、小型機によるシステム実証を進めて技術をブレークスルーさせる。

➤また、信頼性の高い輸送システムを構築可能とする開発プロセス（**高信頼性開発プロセス**）、**低コスト軽量金属構造、低コスト複合材構造、次世代アビオニクスアーキテクチャ、自律点検、自律飛行安全管制機能**等の早期実証を進めることで、将来宇宙輸送システムに求められる技術を戦略的・効率的に獲得

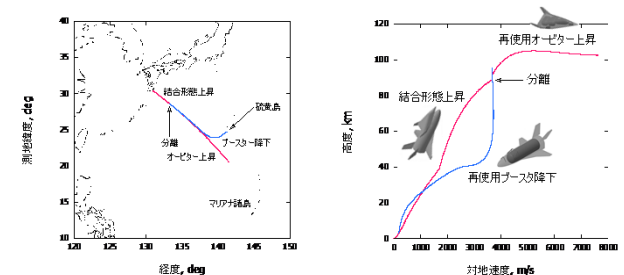
➤これらの技術レベルを重点的に底上げして融合させ、2020年頃を目途に本格的な将来輸送システム開発に着手する。



完全再使用型
宇宙輸送システム



二地点間輸送
サブオービタル機



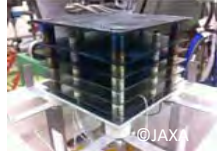
二段式完全再使用型輸送システム

技術課題ブレークダウン		
エンジニアリング	高信頼性開発プロセス	定量的リスク評価
		重要故障モードの特定と排除
推進	航空的繰り返し運用	解析・要素試験による信頼度検証
		ターンアラウンド時間を短縮するシステム設計
	ロケットエンジン	高信頼化、低コスト化
		長寿命化、ヘルスモニタリング
構造・熱防護	空気利用エンジン	炭化水素燃料の適用
		複合サイクルエンジン
	軌道変換エンジン	極超音速ターボジェットエンジン
		無毒・貯蔵可能な推進薬の適用
	姿勢制御スラスタ	加圧ガス削減、推進薬の有効利用
		低コスト化
	タンク加圧系、推進薬供給系	材料・構造様式の工夫による軽量化
		口金部の応力緩和
	複合材機体構造	繰り返し使用
		光ファイバセンサによる荷重推定、損傷検出
	極低温複合材タンク	超耐熱セラミックタイル
		超耐熱セラミックタイル
	極低温断熱材	ホットストラクチャ前面構造
		スタンドオフ型熱防護システム

技術的課題の例

我が国の将来宇宙輸送システムに関する動向(JAXA 2/5)

各要素技術課題に対して、世界の動向を踏まえつつ、継続的に研究開発を推進。

技術課題(例)	JAXAの取り組み	世界の取り組み	備考
エンジン技術	- 汎用性のある液化炭素系エンジンの実現に向けた基盤技術確立、技術の適用先に関する検討および設計/解析技術の向上等の基礎的な研究を実施中。また、さらなる運用性向上を目指して、常温液体のエタノールについても取り組んでいるところ。 100回以上使用できる水素エンジンの技術実証に取り組んでいる。 - 機体を大幅に軽量化できる可能性を持つ複合サイクルエンジン(ロケットエンジンと空気吸込みエンジンを統合したもの)については、地上試験において、極超音速条件(マッハ8以上)での性能評価ができるレベルまで到達。	- 世界各国で、推力数トンまでの小型エンジンにおいて、様々な燃料の可能性が追求されている。 - また、米英豪を中心に、スクラムジェットなどの空気吸込みエンジンの研究が継続的に行われている。	 炭化水素燃料(エタノール)エンジンの燃焼試験の様子
軽量構造技術	- HOPE-Xプロジェクトで、モノコックに近い軽量構造の設計技術と、オートクレーブを使わずに大型部材を接着で組み立てる技術を獲得。 - 極低温複合材タンクに重点的に取り組んでいるところ。複合材のドーム部と燃料を吸い込む口金部の接合部の熱応力が課題。 - 光ファイバセンサを使って構造歪を連続分布として計測する技術をJAXAが保有しており世界をリード。荷重推定や損傷を検出するソフトウェアや実飛行への適用が課題。	- 航空機分野では、Scaled Composites社などが全機複合材の機体を製造。 - 一方、宇宙輸送分野では、大型の極低温推進薬タンクの複合材化が大きなハードルとなっており、米国(NASA、空軍)等で研究開発が続けられている。	  全機複合材構造(HOPE-X強度試験用機体) 極低温複合材タンクの試作品
熱防護システム技術	- HOPE-Xプロジェクトで、スペースシャトルと同等の熱防護システム技術を獲得。 - この技術を発展させて、現在は、先進的な内部断熱材を適用した軽量スタンドオフTPSを研究中。 - また、従来のC/C材の炭化ケイ素(SiC)コーティングよりも高温に耐える耐酸化コーティングや、TUFROCと同等な超耐熱軽量セラミックも研究中。	- 米国では、カーボン/カーボン(C/C)材よりも高温の約1700℃に耐える、TUFROC(タフロック)と呼ばれる耐熱セラミックタイルをX-37Bで実用化。 - 欧州では、スタンドオフ型熱防護システム(TPS)の開発を進めており、IXVでの飛行実証を計画しているが、軽量化が課題。	 スタンドオフTPSの加熱試験モデル (表面パネル:SiC/SiC複合材、内部断熱材:発泡チタンを用いた多層輻射遮蔽構造)
帰還誘導制御技術	- HOPE-X小型実験機により、各飛行フェーズごとに、再突入から着陸までの誘導制御技術(スペースシャトルと同等)を獲得。 - 大学と連携し、小型実験機を使って適応制御や自律飛行計画の基本的な検証を進めているところ。	- 再突入から滑走路への着陸までを実際に行ったことがあるのは、米国とロシア(旧ソ連)のみ。ゲインスケジューリングや事前に定められた基準軌道等の従来技術が用いられた。 - 安全性や運用の自由度を高めるため、適応制御や自律飛行計画等の先端技術の研究開発が続けられている。	 大学と連携して先端技術を検証するための飛行実験を実施中

我が国の将来宇宙輸送システムに関する動向(JAXA 3/5)

JAXA提供情報

オールジャパンでの検討体制を構築するために、将来輸送系ワークショップを定期的開催。

- 再使用型将来輸送システムを実現するには、難易度の高い技術課題に加えて、技術以外への課題(事業化におけるリスクなど)に対応も必要。
- オールジャパンの力を結集し、研究の方向性を共有し、新しいアイデアや技術を持ったプレイヤーが参加することが必要。
- オールジャパン体制の構築に向けて、**将来輸送系ワークショップ**を定期的に開催。下表にリファレンスミッション検討の中間とりまとめ結果を示す。

①小型衛星打ち上げ

②衛星代替

③有人輸送

比較的近未来から社会的課題に対して貢献

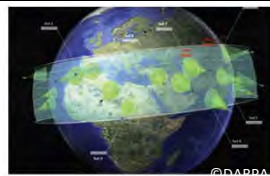
宇宙開発利用に必要な財政負担の削減

我が国の経済成長への貢献

エネルギー、食糧・水資源、環境問題への貢献

アジア太平洋地域の安全保障への貢献

将来的には、大型ペイロード打ち上げによる宇宙太陽光発電システムの実現や、高速二地点間輸送等によって社会的課題に貢献可能

ミッション例	概要	利用者	期待される効果	備考
小型衛星打ち上げ	- 低コストで高頻度に、500kg程度までの小型衛星を低軌道に打ち上げる。 - 打ち上げ価格の目標設定:5億円以下/回	政府機関	- 低コストで小型衛星ネットワークを構成でき、地球規模で高分解能・高頻度の地球観測が可能となる。 - その結果、食糧・水資源や環境問題への貢献、広域的・継続的な監視による安全保障への寄与、多様な産業分野での利用が進む。	 小型衛星ネットワークによる広域的・継続的監視のイメージ
		新興国衛星運用会社	- 小型衛星打ち上げ市場が拡大する。 - 小型衛星打ち上げ市場での日本のシェアが拡大する。	
衛星代替	- 限られた期間、観測衛星や通信衛星として使用 - ロボット宇宙機として、宇宙環境を利用した科学実験、技術実証、軌道上サービスに使用(軌道上サービス=軌道上での点検・修理・燃料補給や大型構造物の製造・組立等) - 打ち上げ価格の目標設定:10億円以下/回	政府機関	- 技術試験衛星が不要となる。ペイロードを入れ替えることにより、より少ない財政負担で、かつ短期間に軌道上での実験や実証が可能となり、実験や実証の機会が増加する。 - 有事の際、監視や通信の強化により安全保障に寄与する。	 再使用可能なロボット宇宙機の実験機X-37B
		民間企業(潜在的)	輸送機を、利用者のアイデアが盛り込める「オープンプラットフォーム」にすることで、新たな用途や事業が創出される可能性がある。	
有人輸送	10人程度までの搭乗客を低軌道上の政府の宇宙ステーション、または商業宇宙ステーションに輸送する。 - 打ち上げ価格の目標設定:1億円以下/席	政府機関(宇宙飛行士)	より少ない財政負担で有人宇宙探査ミッション等の遂行が可能となる。	 米ビグロウ社が計画している商業宇宙ステーション
		個人(観光客)	- 軌道周回や軌道上に滞在する宇宙観光の市場が創出される。 - 周辺アジア諸国からの集客により、スペースポートの観光などの波及効果も期待できる。	

我が国の将来宇宙輸送システムに関する動向(JAXA 4/5)

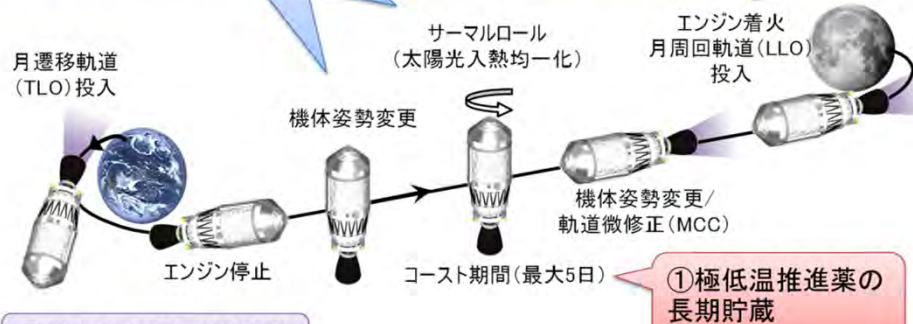
軌道間輸送機等に関連する化学推進、電気推進の研究開発を実施。

○化学推進

月周辺ミッションでの例

②液体推進剤の挙動制御(無重力下での静定、スロッシング抑制)

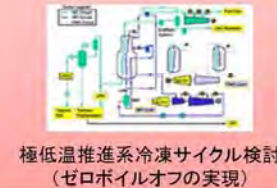
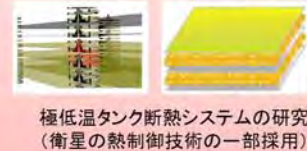
③エンジンの多数回着火(エンジン予冷、タンク与圧)



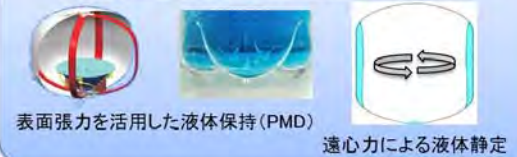
④高精度解析予測技術

- ✓ 従来の概念を超えた「極低温推進系技術」の発展が必要
- ✓ 宇宙活動の一層の自在化を実現

①極低温推進剤の長期軌道上貯蔵(蒸発量の抑制)



②微小G下での液体推進剤の挙動制御

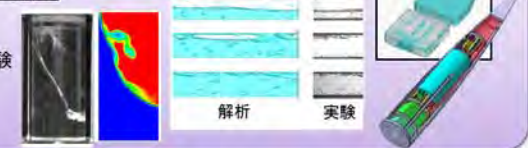


③エンジン着火前運用効率化(液ガス節約)



④軌道上運用に対する予測解析技術の確立

- ✓ 姿勢変更によるスロッシング(液面揺動)
- ✓ 極低温二相流(予冷、推進剤蒸発/凝縮)
- ✓ 無重力下での表面張力支配流: 観測ロケット実験
- ✓ 極低温二相流センサ開発

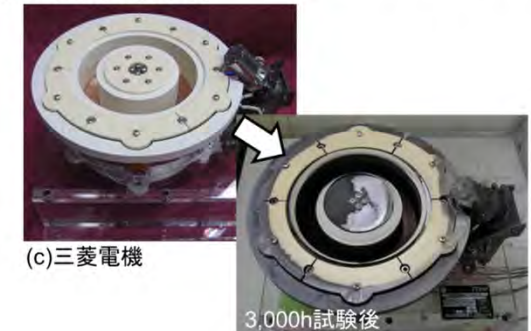
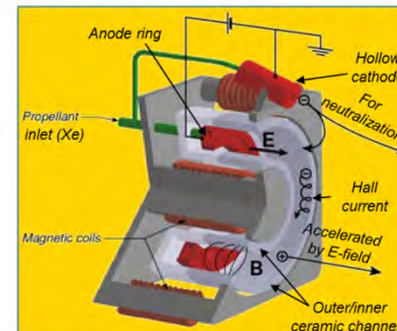


○電気推進

	ホールスラスタ	イオンエンジン
Isp	1500~3000s	3000~4000s
推力	200~470mN	150~250mN
システム重量	50kg	125kg
コスト	約5億円	約10億円
寿命	40,000時間以上	21,000時間以上
試験要求真空度	1×10^{-3} Pa	4×10^{-4} Pa
サイズ例 (同一縮尺)	 4.5 kW BPT-4000 (Aerojet)	 4.5 kW XIPS (Boeing)

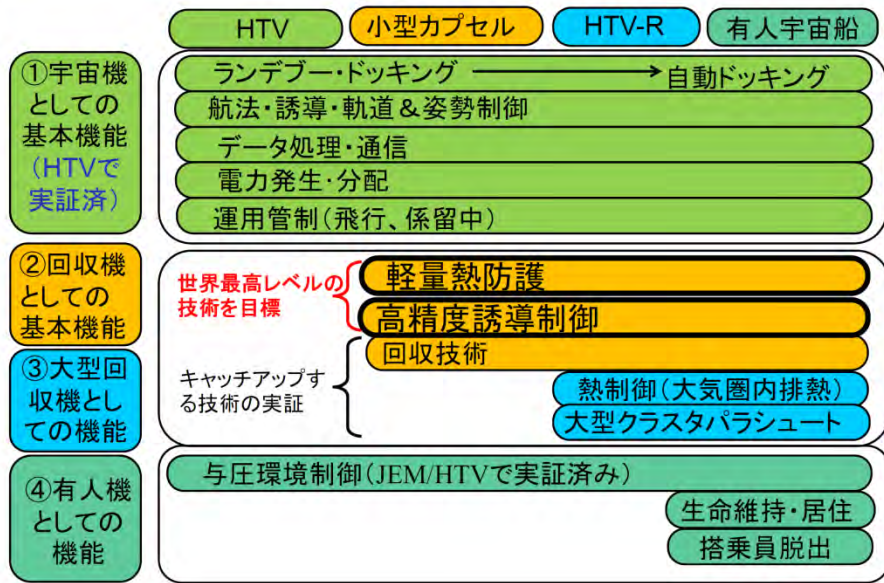
<ホールスラスタの原理>

- 推進剤のXeを電子衝突により電離し、イオンを生成。電場により加速し推力を発生。
- 電子はホローカソードにより生成され、イオンを中和するとともに、磁場・電場の作用により半永久的に螺旋運動をしチャンネル内に留まり、効率的にXeを電離し続ける。



我が国の将来宇宙輸送システムに関する動向(JAXA 5/5)

有人宇宙船の机上検討、基礎技術の研究開発を実施。



帰還時排熱技術:

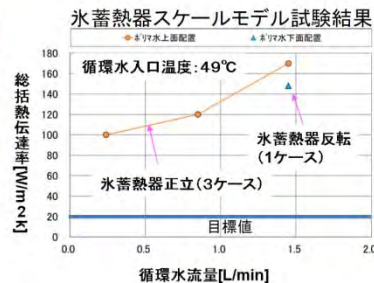
- 大気圏再突入後に断熱材で覆われた有人帰還カプセル(ラジエータは使用不可)から排熱する技術。これまでは、アンモニアや水などを噴霧してその蒸発潜熱で冷却したり、パラフィンなどの融解潜熱を利用する技術が主な手法。
- 地上技術でも使われている氷蓄熱技術を宇宙用に発展させ、融解・蒸発潜熱を利用し、かつポリマを活用することでメカニズムを簡素化する技術の研究。
- 地上試作品まで完成済み。



氷蓄熱排熱システム
スケールモデル

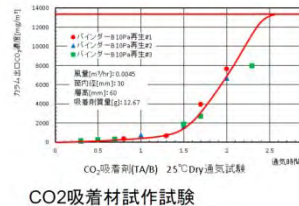


氷蓄熱排熱システム
スケールモデル(内部)



環境制御・生命維持技術(ECLSS):

- 宇宙飛行士等が船内に排出する水分、CO₂、アンモニア、一酸化炭素など、及びキャビン内に入る熱を処理して、キャビン内を適切な環境に維持する技術。
- 温湿度制御、空気循環、不要ガス除去、有害ガスモニタなどの技術
- 3年ほど前から研究を加速し、再生可能なCO₂除去剤や高効率の有害ガス除去用触媒に目途をつけ、来年度中には地上モデルが完成する予定。



不要ガス除去装置(試作品)



ECLSS: Environment Control and Life Support System

打上げ時緊急脱出技術:

- 打上げ時のロケットの爆発等から脱出するための技術。
- 3年前より研究を開始し、脱出システムのコンセプト検討や成立性解析などを実施した。

- (1)LASのシステムリファレンス候補案の設定
カプセル宇宙船に対して「Tractor/固体」「Pusher/液体」の2つのリファレンス候補案を設定した。
- (2)LASのシステム検討(コンセプト比較)
2つの候補案に対してコンセプトの得失評価を実施した結果、空力特性の観点では、安定性は「Tractor/固体」がその他は「Pusher/液体」が優れた。さらに、同じく2形態を基本に有翼宇宙船やロケットと組み合わせて打上能力評価を実施した結果、「Tractor/固体」が優れた。
- (3)LAS使用時のハザードからの離脱成立性解析
2つの候補案に対して、爆発ハザードの発生を仮定し、パッド上およびフライト中の動圧最大時の2ケースについて、ロケットの爆発波(プラストウェーブ)の到達に対する離脱運動解析手法を構築した。さらに「Tractor/固体」については、また、Loss of Crew確率を導出し、故障検知時間と爆発威力の関係でLOC確率を評価した。

