

# 世界の将来宇宙輸送システムに関する動向(欧州)

欧州において、2020年代初頭に完全再使用型宇宙往還機、2040年～50年頃に二地点間旅客輸送機の実用化に向けた取り組みが行われている。

## ● SKYLON

- 2022年頃の実用化を目指して、英Reaction Engines社が開発している単段式・完全再使用型の宇宙往還機
- 低軌道に15トンのペイロードを輸送可能。最終的には、\$5M(約0.3億円/トン)での打ち上げを目指している。



SKYLON

## ● SpaceLiner

- 2040～50年頃の実現を目指して、独DLRが研究している二段式・完全再使用型の二地点間旅客輸送機
- 2人のパイロットと50人の乗客を乗せ、ヨーロッパとオーストラリアの間を90分で結ぶ。



SpaceLiner

## ● IXV(Intermediate eXperimatal Vehicle)

- ESAが開発中の再突入実験機
- 2014年にVegaロケットで打ち上げ予定



IXV

# 世界の将来宇宙輸送システムに関する動向(その他の国)

ロシア、インド、中国において、フライバックブースターや再使用型往還機等の研究開発が継続的に行われている。ただし、計画の詳細や進捗状況は不明確なものが多い。

- ロシア
  - Khrunichev社が、Angaraロケット用のフライバックブースターRRM(Re-entry Rocket Module)を開発中。2020年までに初飛行を目指す。
  - ノーズ部に搭載したジェットエンジンを用いて射点まで帰還。帰還時には回転機構により、主翼を展開する。
- インド
  - インド宇宙研究機関ISROが、単段式の完全再使用輸送機AVATARの研究を進めている。
  - 固体ロケットで打ち上げる技術実証機RLV-TDを開発中
- 中国
  - Shenglong(神龍)と呼ばれる実験機を開発している模様
  - 中国メディアによると、2011年1月に空中発射実験を実施



AngaraとRRM



RLV-TD



Shenglong

# 世界の将来宇宙輸送システムに関する動向(その他)

国際協働による有人宇宙探査に向けて技術検討を行うメカニズムである国際宇宙探査協働グループ(ISECG)のGlobal Exploration Roadmap(GER)第2版(2013年8月発表)では、軌道間輸送機等が宇宙探査の輸送システムとして想定されている。



# 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

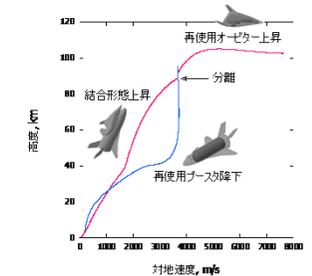
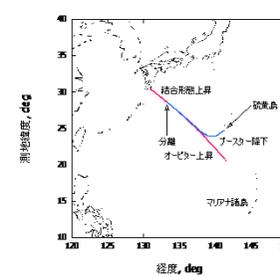
▶これらの技術レベルを重点的に底上げして融合させ、2020年頃を目途に本格的な将来輸送システム開発に着手する。



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



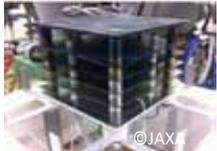
二段式完全再使用型輸送システム

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
		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
推進	航空的繰り返し運用	高信頼化、低コスト化
	ロケットエンジン	長寿命化、ヘルスモニタリング
		炭化水素燃料の適用
	空気利用エンジン	複合サイクルエンジン
		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
	軌道変換エンジン	加圧ガス削減、推進薬の有効利用
	姿勢制御スラスター	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
構造・熱防護	複合材機体構造	口金部の応力緩和
		繰り返し使用
	極低温複合材タンク	光ファイバ歪センサによる荷重推定、損傷検出
	極低温断熱材	超耐熱セラミックタイル
	ヘルスモニタリングシステム	ホットストラクチャ前面構造
	熱防護システム	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	<ul style="list-style-type: none"> <li>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を確認、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。</li> <li>100回以上使用できる水素エンジンの技術実証に取り組む中。</li> <li>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い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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	 <p>炭化水素燃料(エタノール)エンジンの燃焼試験の様子</p>
軽量構造技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>航空機分野では、Scaled Composites社などが全機複合材の機体を製造。</li> <li>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。</li> </ul>	  <p>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</p>
熱防護システム技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	 <p>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)</p>
帰還誘導制御技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	 <p>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</p>

# 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

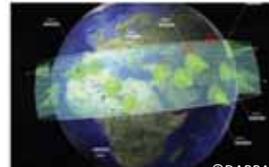
宇宙開発利用に必要な財政負担の削減

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

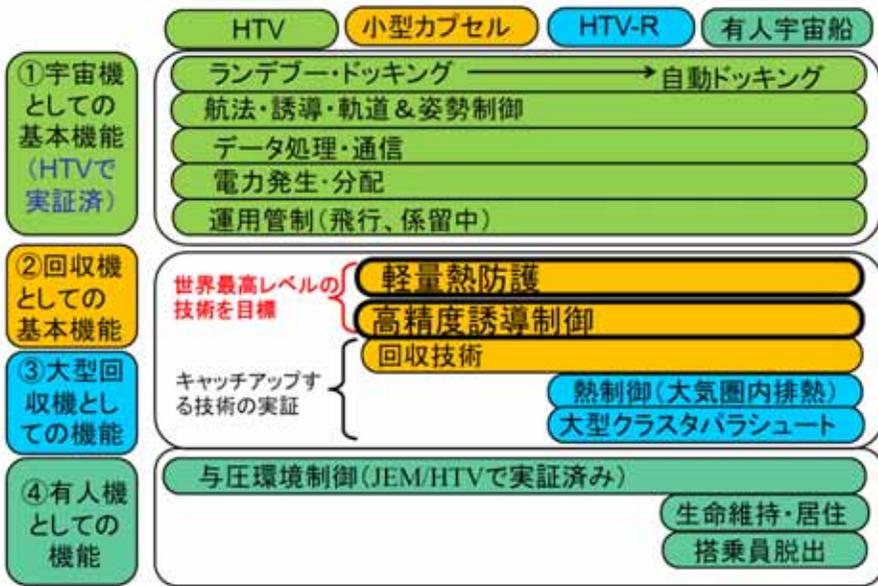
将来的には、大型ペイロード打ち上げによる宇宙太陽光発電システムの実現や、高速二地点間輸送等によって社会的課題に貢献可能

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	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>打ち上げ価格の目標設定: 5億円以下/回</li> </ul>	政府機関	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	 <p>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</p>
		新興国衛星運用会社	<ul style="list-style-type: none"> <li>小型衛星打ち上げ市場が拡大する。</li> <li>小型衛星打ち上げ市場での日本のシェアが拡大する。</li> </ul>	
衛星代替	<ul style="list-style-type: none"> <li>限られた期間、観測衛星や通信衛星として使用</li> <li>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・燃料補給や大型建造物の製造・組立等)</li> <li>打ち上げ価格の目標設定: 10億円以下/回</li> </ul>	政府機関	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>有事の際、監視や通信の強化により安全保障に寄与する。</li> </ul>	 <p>再使用可能なロボット宇宙機の実験機X-37B</p>
		民間企業(潜在的)	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>	
有人輸送	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>打ち上げ価格の目標設定: 1億円以下/席</li> </ul>	政府機関(宇宙飛行士)	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>	 <p>米ビゲロー社が計画している商業宇宙ステーション</p>
		個人(観光客)	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	



# 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:

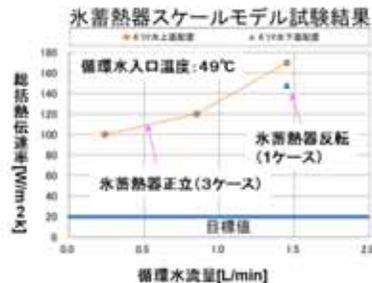
- 大気圏再突入後に断熱材で覆われた有人帰還カプセル(ラジエータは使用不可)から排熱する技術。これまでは、アンモニアや水などを噴霧してその蒸発潜熱で冷却したり、パラフィンなどの融解潜熱を利用する技術が主な手法。
- 地上技術でも使われている水蓄熱技術を宇宙用に発展させ、融解・蒸発潜熱を利用し、かつポリマを活用することでメカニズムを簡素化する技術を研究。
- 地上試作品まで完成済み。



水蓄熱排熱システムスケールモデル

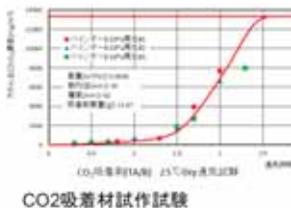


水蓄熱排熱システムスケールモデル(内部)



## 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、CO<sub>2</sub>、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CO<sub>2</sub>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。

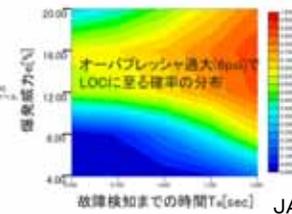
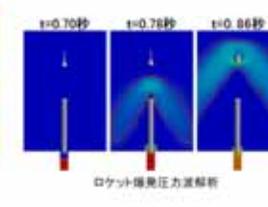
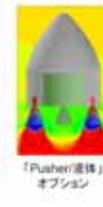
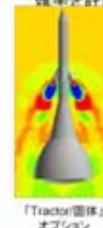


ECLSS: Environment Control and Life Support System

## 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で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。

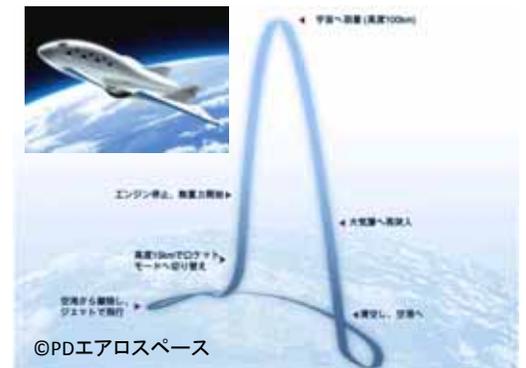


# 我が国の将来宇宙輸送システムに関する動向(民間)

安価な小型ロケット開発や再使用型のサブオービタル飛行用スペースプレーンの実現を目指した研究開発が実施されている。

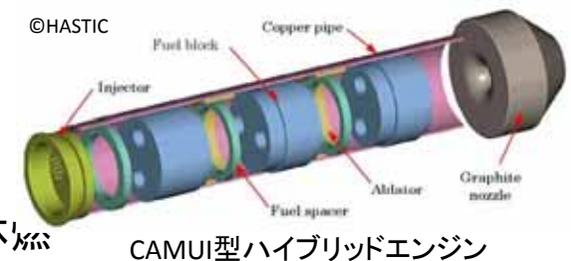
## ○サブオービタル飛行用スペースプレーンに関する取組

- 完全再使用型弾道宇宙往還機(PDエアロスペース株式会社)
- パルス燃焼技術によるジェット燃焼モード/ロケット燃焼モード切り替えエンジンを搭載し、水平に離陸して高度100kmまで到達し、帰還するスペースプレーンの開発を目指す。
- サブオービタル飛行による宇宙旅行、観測・実験等と、多目的地球観測を想定



## ○小型ロケット開発に関する取組

- CAMUIロケット(HASTIC[北海道宇宙科学技術創生センター])
- 固液ハイブリッド燃焼を利用したエンジンにより、低価格(従来の小型固体燃料ロケットに比べて打上げ価格10分の1)、安全、低環境負荷の小型ロケット開発を目指す。
- 観測、微小重力実験、衛星部品の動作確認などに利用
- 小型液体燃料ロケット(SNS株式会社)
- 独自開発の小型液体燃料ロケットエンジンにより、超小型衛星軌道投入用ロケットULSLV(Ultra Light Space Launch Vehicle)の開発を目指す。
- 2013年に推力500kgf級ロケットの打ち上げに成功(到達高度6535m)



500kgf級ロケットすずかぜの打ち上げ

# 将来宇宙輸送システムの性能諸元

各国において使用目的に応じたシステム構想が検討され、実用化に向けた研究が進められている。

	Launcher One (米国)	Dream Chaser (米国)	Reusable Falcon (米国)	Lynx Mk III (米国)	SKYLON (英国)	Spece Liner (欧州)	SOAR (欧州)	JAXAリファレンスシステム (日本)
								
運用開始	2016年～	2016年～	不明	2014年～	2022年～	2050年頃	2018年～	2040年頃
方式	3段式 (Spaceship Two母機 +2段式使い切り)	TSTO 1段: Atlas V 2段: 再使用オービタ	TSTO	TSTO	SSTO	TSTO (二地点間サブ オービタル機)	3段式 1段: A300 2段: 再使用ブースタ 3段: 固体使い切り	TSTO
打上能力	225kg	乗員1名+乗客6名	不明	650kg	12トン	乗客50名	250kg	乗員8名
離陸方式	水平 +空中発射	垂直	垂直	水平	水平	垂直	水平	垂直
着陸方式	水平 (母機のみ)	垂直	垂直	水平 (オービタ・ ブースタ)	水平	水平 (オービタ・ ブースタ)	水平 (1段・2段)	水平
推進薬	LOX/ケロシン (使い切りロケット)	N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /HTPD (再使用オービタ)	LOX/RP-1	LOX/ケロシン	空気/LH2 LOX/LH2	LOX/LH2	不明	LOX/エタノール
エンジン	不明	ハイブリッド エンジン	Merlin 1D エンジン	XR-5K18	RBCC 2機 (SABRE)	二段燃焼 サイクル	不明	ロケット (サイクルは検討中)
推力	不明	不明	1段: 70.4トン×9 2段: 70.4トン×1	1.3トン×4	138トン(空気) 184トン(LOX)	1段: 225トン×9 2段: 231トン×2	不明	1段: 250トン×5 2段: 24トン×3

TSTO: 二段式宇宙輸送機  
SSTO: 単段式宇宙輸送機

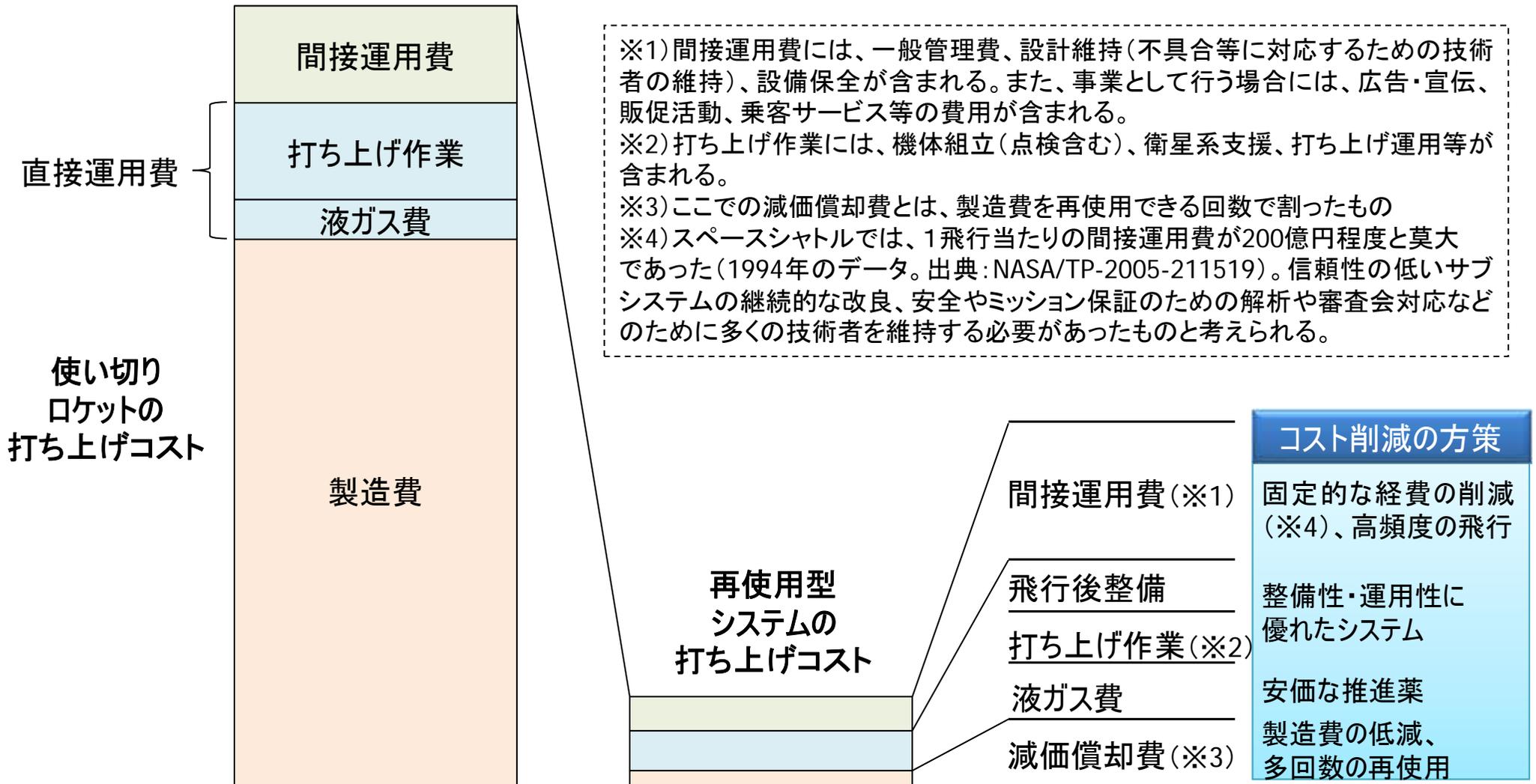
LOX: 液体酸素  
N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>: 四酸化二窒素

HTPD: 末端ヒドロキシル基ポ  
リブタジエン系

RP-1: ケロシン系燃料の一種  
LH2: 液体水素

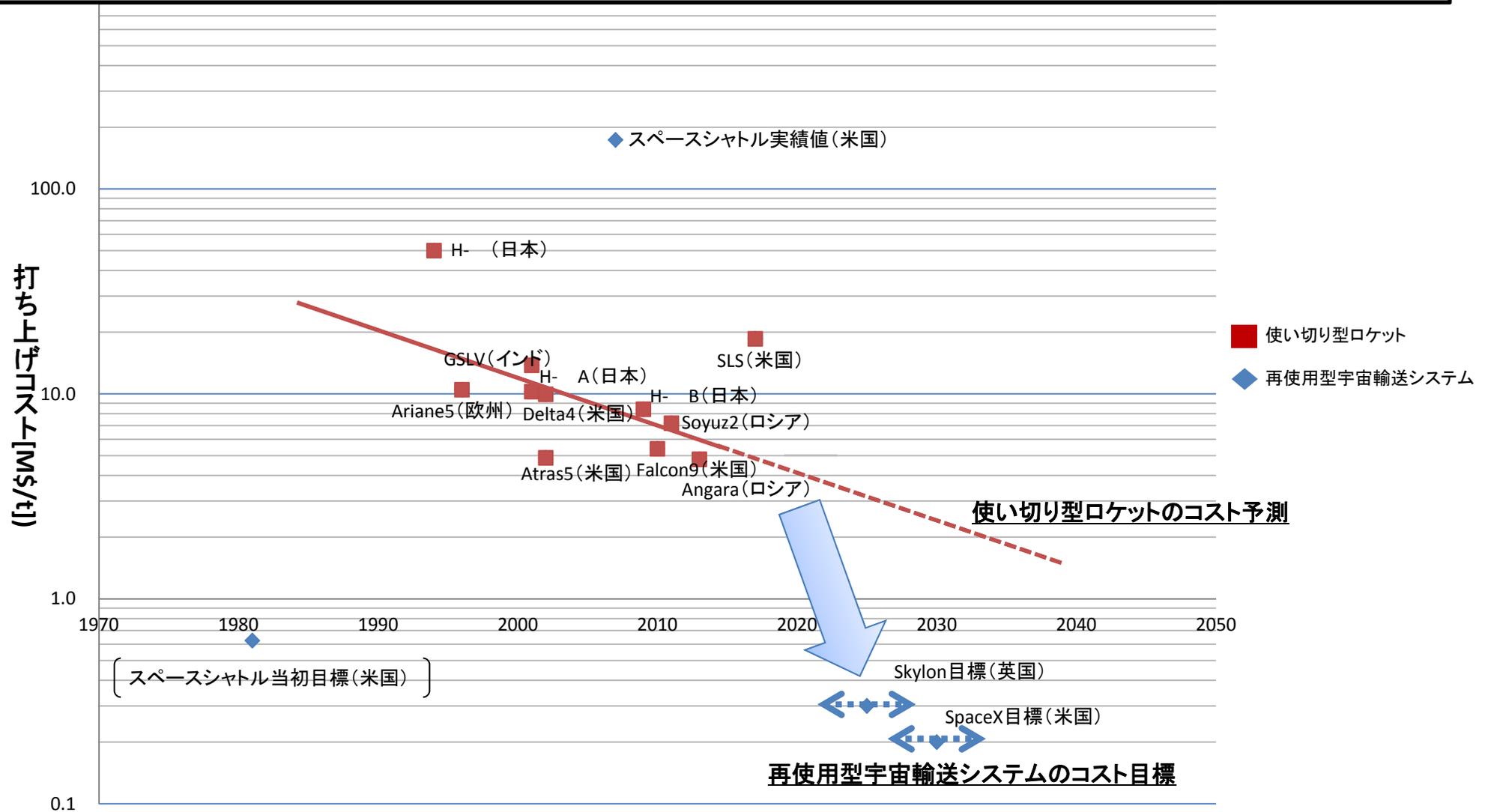
# 使い切り型と再使用型宇宙輸送システムのコスト構造比較

再使用型システムでは、多数回の再使用により、1回当たり製造費の負担(減価償却費)が減る。間接運用費を減らすためには、信頼性の高いシステムとするとともに、再使用型に特有の飛行後整備を効率的に行い、高頻度の飛行を行えるようにすることが重要。



# 宇宙輸送システムのコスト予測

使い切り型ロケットは今後も打ち上げコスト低減が見込まれるが、現在から数分の一のコスト低減程度。一方、再使用型宇宙輸送システムは現在から数十分の一のコスト低減が目標として掲げられている。



※大型の宇宙輸送システムについて記載

[年]

宇宙輸送システム部会のヒアリング資料等を基に宇宙戦略室で作成

# 輸送コストと年間総輸送需要の関係

現在から数分の一の輸送コストの低減では宇宙輸送需要の大きな拡大は見込まれないが、数十分の一のコストの低減が実現できれば、宇宙輸送需要は飛躍的に拡大すると想定される。

## NASA Commercial Space Transportation Study(CSTS)の分析

- 従来の延長の利用
  - 通信衛星
  - 宇宙環境を利用した製造
  - リモートセンシング
  - 政府系ミッション
- まだ実現していない利用／新しい利用
  - 付加価値のある輸送サービス(人と物資の普遍的な輸送)
  - エンターテインメント
  - スペースデブリマネジメント
  - 宇宙医療施設
  - 多目的ビジネスパーク
  - エネルギー(宇宙太陽光発電)
  - 資源探査(月LOX、ヘリウム-3)

- 従来の延長の利用では、輸送コストが現状の1/10で、需要が10倍弱増えるという結果。需要予測は漸増。
- 新しい市場においては、輸送コストが現状の1/10になっても需要を拡大することはできないが、1/100になると大規模な需要が見込まれる。

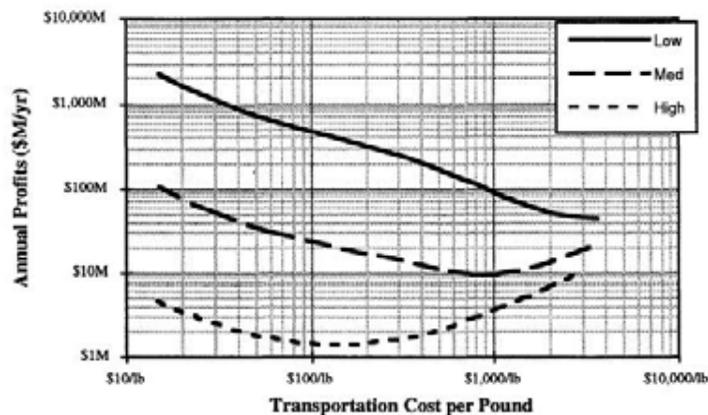
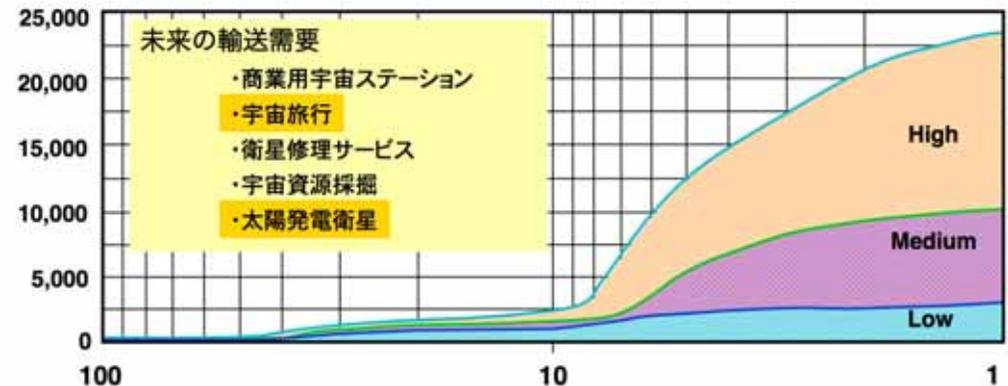


Figure 3.5.6.6-15. Transport Profits as a Function of Transport Cost

Commercial Space Transportation Study(CSTS) NASA 1997

地球低軌道への年間総投入量(t)

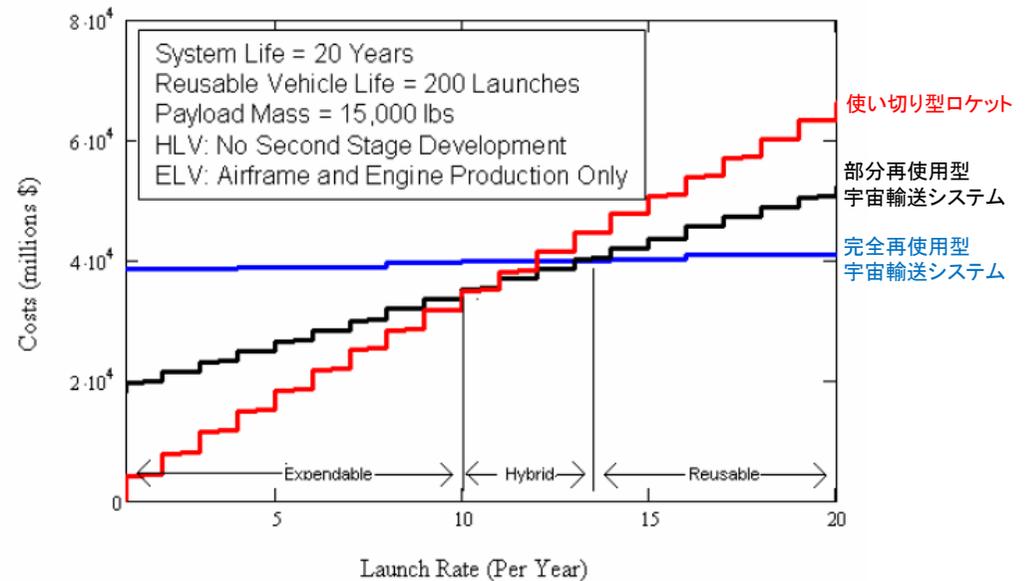
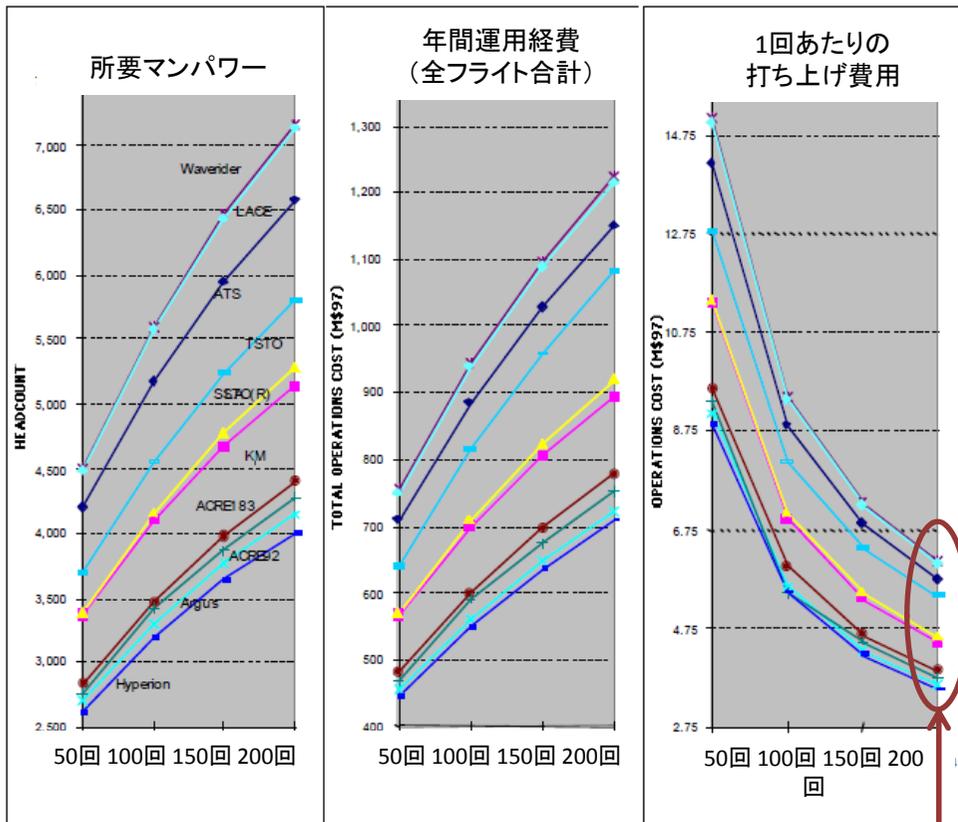


地球低軌道への輸送コスト (万円 / kg)

NASA CSTSを基に宇宙輸送システム長期ビジョンワーキンググループ作成

# 再使用運用による輸送コストの低下

NASAや米空軍の試算によると、年間十数回以上の打ち上げを行う場合には再使用型宇宙輸送システムの方が使い切り型ロケットよりも低コストとなり、SSPS等の建造に必要な年間数百回の打ち上げを行う場合には、1回あたりの打ち上げコストが数億円(使い切り型ロケットに比べて数十分の一)まで低下する。



James Michael Snead, *Cost Estimates of Near-Term, Fully-Reusable Space Access Systems*. (American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006)

Highly Reusable Space Transportation Study  
Integration Task Force, *An Operational Assessment of Concepts and Technologies for Highly Reusable Space Transportation*. (NASA, 1998)

年間200回の再使用を行うと、再使用型宇宙輸送システムの打ち上げコストが300万～600万ドル台まで低下することが見込まれる