

宇宙輸送システム 長期ビジョン素案 参考資料集

平成 2 6 年 2 月

目次

1. 宇宙輸送システムの登場時期
2. 世界の宇宙輸送システムの歴史
3. 我が国の宇宙輸送システムの登場時期
4. 我が国の宇宙輸送システムの歴史
5. 世界の宇宙輸送政策について
6. 世界の将来宇宙輸送システムに関する動向
7. 我が国の将来宇宙輸送システムに関する動向
8. 将来宇宙輸送システムの性能諸元
9. 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
10. 宇宙輸送システムのコスト予測
11. 輸送コストと年間総輸送需要の関係
12. 再使用運用による輸送コストの低下
13. 現在の延長上にある宇宙利用の姿
14. 新しい宇宙利用の姿
15. サブオービタル飛行に関する需要予測
16. 将来宇宙輸送システムの機体及びエンジンの適用材料
17. 軌道遷移エネルギーの比較
18. 高出力推進系について
19. 航空業界における国際協業の状況
20. 海外の宇宙輸送システムに関する制度の動向

世界の宇宙輸送システムの歴史(米国)

米国は使い切り型ロケットを運用し、近年では低軌道輸送・利用の商業化も推進。1980年代には再使用型宇宙輸送システムであるスペースシャトルを実用化したが運用コストの高さから退役。1990年代以降も再使用型宇宙輸送システムの開発を継続している。

- 1962年、マーキュリー計画で有人宇宙飛行に成功。1969年にはアポロ計画により、サターンV超大型ロケットを使用した月面着陸に成功
- 1981年には宇宙輸送システムの再使用化を目指してスペースシャトル宇宙往還機の運用を開始するが、運用コストの高さから2011年に退役
- 2002年、米空軍はEELV(発展型使い切りロケット)としてデルタ4及びアトラス5の運用を開始
- 商用軌道輸送システムプログラム(COTS)、商業貨物輸送サービス(CRS)、商業クルー開発(CCDev)等の計画により、ISSへの人員・物資輸送を民営化。スペースX社のファルコン9ロケット(ドラゴン宇宙船等の打ち上げ)やオービタルサイエンシズ社のアントレスが国際宇宙ステーションへのドッキングに成功



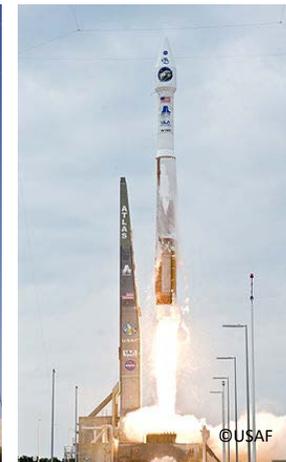
サターン5



スペースシャトル



デルタ4



アトラス5

世界の宇宙輸送システムの歴史(ソ連・ロシア、欧州)

ロシア及び欧州は使い切りロケットによる活発な商業打ち上げを実施。新型の使い切りロケットの開発も目指す。

○ソ連・ロシア

- ソ連はR-7ロケットにより、世界初の人工衛星打ち上げ(1957年)に成功。1961年にはR-7の改良型であるボストークロケットで世界初の有人宇宙飛行にも成功
- 1960年代にソユーズ中型打ち上げロケットとプロトン大型ロケットを実用化。現在も改良型がロシアの主力打ち上げ手段として活躍
- 1960年代に月計画用としてN-1ロケットを開発するが、失敗
- 1980年代に宇宙往還機ブランを開発するが、試験飛行のみで計画中止
- 1993年、ISS計画に参画。スペースシャトル退役後はロシアのソユーズが唯一の有人アクセス手段となる。プログレス無人貨物船による補給も実施
- ソ連崩壊後は米露合弁企業ILS等の衛星打ち上げサービス会社による商業打ち上げサービスを実施。2011年にはアリアンスペースと共同で仏領ギニアからのソユーズ打ち上げ開始。衛星打ち上げ数は世界一
- 今後はモジュール設計のアンガラロケットと将来宇宙船(PPTS)の実用化を目指す。



ソユーズ-2



プロトン-M

○欧州

- 自律的な宇宙アクセス確保のため、1973年に欧州宇宙機関(ESA)を設立。フランスの主導でアリアンロケットを開発。1979年、アリアン1の打ち上げ成功
- 1980年、アリアンスペース社を設立し、商業打ち上げに乗り出す(現在、アリアン5は世界の衛星打ち上げ市場で大きなシェアを確保)。
- 1980年代にはヘルメス、HOTOL等の宇宙往還機計画が決定されたが、資金・技術上の問題で中止
- 今後はアリアン5の改良型、アリアン5MEと低コストの固体燃料型アリアン6を開発



アリアン5

世界の宇宙輸送システムの歴史(中国、その他)

中国は独自に使い切りロケットを開発し、2003年には世界で3番目の有人宇宙飛行にも成功。インドも1980年から使い切りロケットによる衛星打ち上げを成功させ、再使用型宇宙輸送システムの開発も進める。その他にも使い切りロケットの開発を目指す国がある。

○中国

- 1970年、国産ロケット長征1号で初の衛星打ち上げ。1984年、長征3号で静止衛星の打ち上げにも成功
- 1985年、中国長城工業総公司を設立して長征3Bロケットによる商業打ち上げサービスを開始
- 2003年、長征2Fロケットによってカプセル型有人宇宙船神舟5号を打ち上げ、世界で3番目の有人宇宙飛行に成功



長征2F

○その他(インド等)

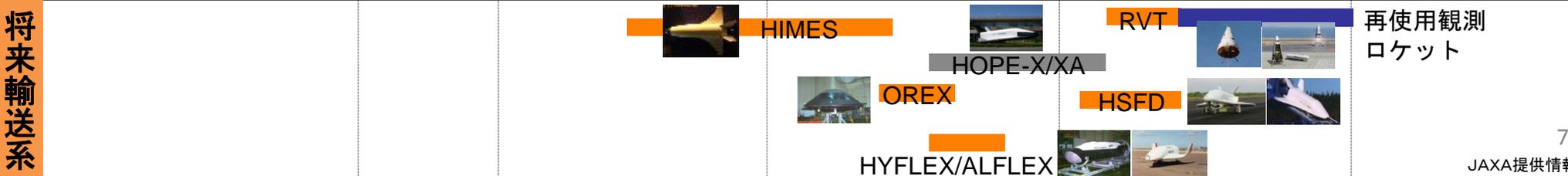
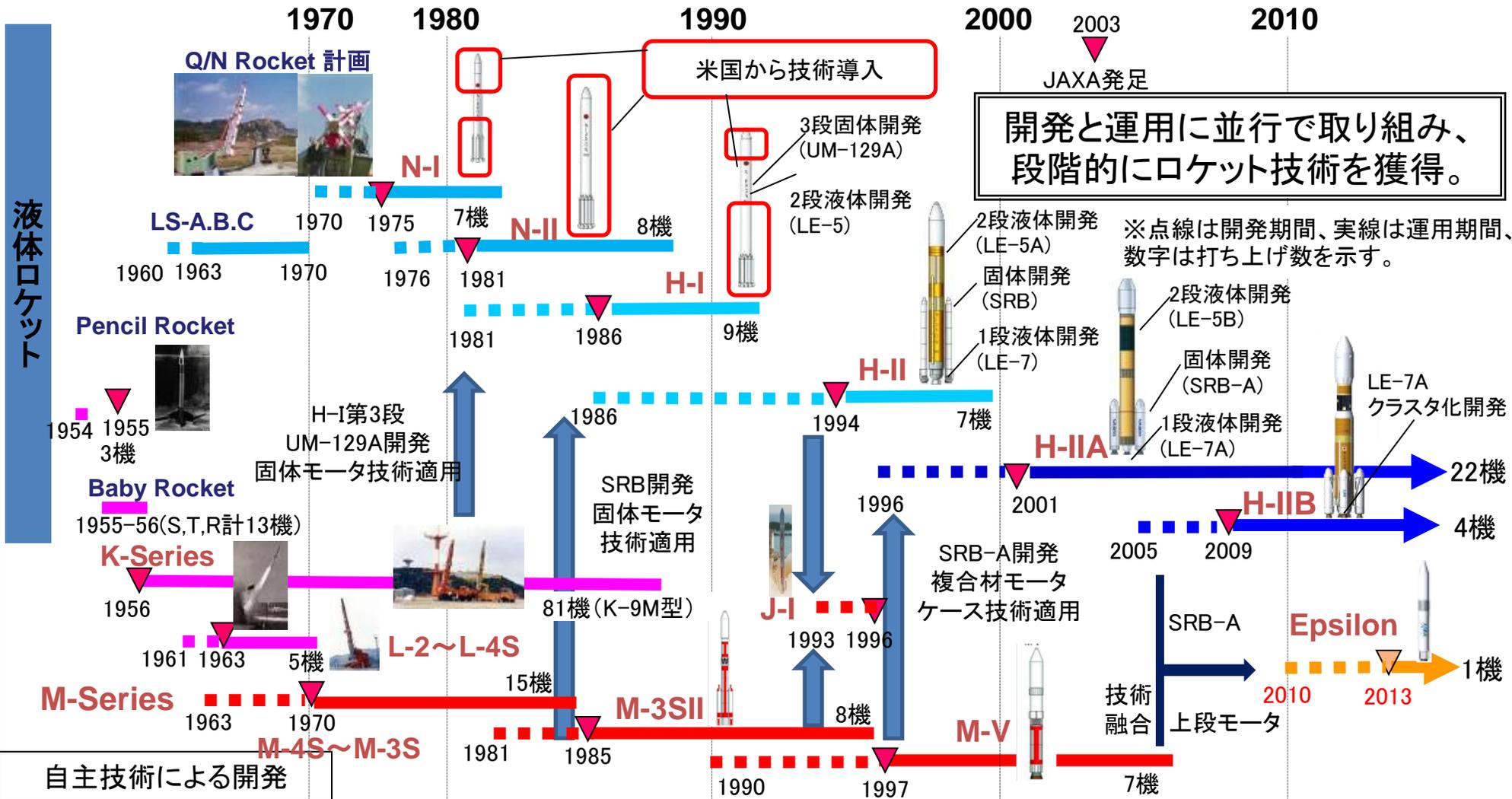
- インドは1980年に国産ロケットSLVによる初の衛星打ち上げに成功
- 1988年にはSLVの派生型であるASLVの打ち上げ、1994年には固体燃料と液体燃料を組み合わせた低軌道打ち上げロケットPSLVの打ち上げを開始。商業打ち上げ受注にも成功
- 今後は静止衛星の打ち上げを目指すGSLVの開発とともに、再使用型宇宙輸送システムとして小型衛星打ち上げ用のAVATAR宇宙往還機の開発も計画
- ブラジル等、幾つかの国々が使い切りロケットの開発を目指す。



PSLV

GSLV

我が国の宇宙輸送システムの登場時期



我が国の宇宙輸送システムの歴史

米国の技術を導入しながら独自にロケット技術を育成し、世界最高レベルの固体・液体使い切りロケットを実用化。1990年代から宇宙往還機及び極超音速技術の研究も実施。

- 1955年、東京大学宇宙科学研究所が独自の固体燃料ロケット開発を開始
- 1962年、鹿児島宇宙空間研究所(現内之浦宇宙空間観測所)開設。L(ラムダ)ロケットを用いた宇宙空間観測を開始
- 1970年2月、L-4Sロケットが日本初の人工衛星おおすみを打ち上げ。世界で4番目の静止打ち上げ国となる
- 1969年、宇宙開発事業団設立。種子島宇宙センター開設
- 1975年、N-Iロケット打ち上げ開始。1977年には日本初の静止衛星きく2号の打ち上げに成功。1981年には大型の衛星打ち上げが可能な改良型のN-IIロケットの打ち上げ開始
- 1986年、国産の第2段目を搭載したH-Iロケットの打ち上げ開始
- 1994年、第1段目、第2段目、誘導制御システム等を初めて純国産化したH-IIロケットの打ち上げ開始
- 1997年、世界最大の固体燃料打ち上げロケットM-Vの打ち上げ開始
- 1990年代には無人小型宇宙往還機の開発を目指すHOPE計画で再突入技術を含む大きな技術的蓄積を獲得
- HYPR(超音速輸送機用推進システムの研究開発プロジェクト)及びESPR(環境適合型次世代超音速推進システムプロジェクト)による極超音速エンジン技術開発も1990年代から2000年代に掛けて実施された。
- 2001年、H-IIの改良型であるH-IIA打ち上げ。液体・固体ともに世界水準の性能を達成。2009年には増強型のH-IIBがISS補給用のHTV「こうのとり」打ち上げ
- 2013年、打ち上げコストを大幅に低下させたイプシロン固体燃料ロケット打ち上げ



H-II A



イプシロン

世界の宇宙輸送政策について(1/4)

米国は自律的な宇宙へのアクセスの確保を中心に、技術基盤、産業基盤の維持・発展のための宇宙輸送政策を設定し、再使用型を含む宇宙輸送技術の研究開発を推進。

○米国の宇宙輸送戦略(U.S. Space Transportation Policy, 2013)

宇宙輸送政策の両輪「**安全保障**」と「**民生用開発**」にとって必要な自律性を担保する打ち上げ手段を「政府主導」で確保した上で、他省庁・民間との連携を通じた代替打ち上げ能力に関する研究開発を追求。

✓**安全保障(National Security): DoDによる自律性確保**

- ・最低2系統の国産の宇宙輸送システムによる安全保障関連ペイロードの確実な打ち上げ能力を保証
- ・他省庁との連携を通じた、有事・失敗時の国家安全保障宇宙能力の補強、迅速な回復のための技術を開発

✓**民生用開発(Civil): NASAによる探査・科学と民間産業振興**

- ・小惑星や火星等の低軌道以遠に対する輸送システム(重量級宇宙輸送システム(SLS)等)を開発
- ・ISS及び低軌道への搭乗員・物資の往復輸送のための商業宇宙飛行能力開発を民間と連携して実施

✓**再使用化を視野に入れた将来宇宙輸送技術の開発**

各省庁は国内の非連邦団体と協働の上、コンポーネントや統合システムレベルの増強も視野に入れ、既存及び将来の米国宇宙輸送システムの信頼性、即応性、実績、費用対効果を改善する目的の研究開発活動が、第一段及び上段への次世代ロケット推進システムの利用、再使用型宇宙輸送能力及び太陽光発電による推進力を含めるよう、支援する。

【産業基盤維持】 **米国の維持スキーム = 官需のみでの安全保障に関わるロケット維持**

安全保障の自律性を確保するため、EELV(デルタ、アトラス)の打上・維持をすべて官需・政府資金で賄う。(大きな政府支出が必要であるが、市場環境の変化の影響を受けにくく、不安定リスクの小さいスキーム)

【技術基盤維持】

スペースシャトルおよびシャトル用エンジンSSME開発後、使い切りロケット開発の空白期間があり、技術者の散逸などを経験し技術力低下が顕在。RS-68開発では当時のシニア技術者を再登用するなどに対応。以降、EELV(デルタ、アトラス)開発、SLS開発等のロケットシステム開発を継続的に実施し、システム技術基盤を維持するサイクルに回復しつつある。

世界の宇宙輸送政策について(2/4)

欧州は自律的な宇宙へのアクセスを確保し、産業・技術基盤を維持するために宇宙輸送システムに対する継続的な政府支援を実施する方針。

○欧州宇宙輸送政策: EU/ESA合同閣僚級理事会承認, 2007年5月

- ✓「宇宙への自在なアクセス手段の確保」を国の明確な政策として設定 ⇒ 米国による干渉の教訓から、「**自律性確保**」が欧州宇宙政策の基本
- ✓**持続可能な欧州の打ち上げロケットプログラムに対する安定した政策的支援を規定** ⇒ 民間の成長促進のための補助金施策を政府としてコミット

欧州の宇宙輸送戦略: 政府支援による商業打ち上げサービス体制維持

商業打ち上げサービス獲得に必要な施策・役割を官民が分担し、協力して体制を維持

- ✓ 産業基盤維持に必要な打ち上げ機数 (Ariane5: 6機、Vega: 2機) を、政府打ち上げに加え商業打ち上げ含めて確保することを官民で設定
- ✓ 商業打ち上げを獲得するための競争力維持のため、政府が信頼性向上や固定費補助等の支援プログラムを設定しバックアップ
- ✓ 欧州衛星の打ち上げ調達は、打ち上げ価格が25%高くともAriane5を優先的に選択

【産業基盤維持】 **欧州のスキーム = 官需+民需(政府支援による獲得)による維持**

- ✓ 商業打ち上げ獲得により、産業基盤維持に必要な打ち上げ数確保の**政府負担を低減**し効率的
- ✓ 上記スキームに必要な民需打ち上げ数が多く、**経済状況等の変動の影響を受けやすい**
- ✓ 不安定リスクのコストを政府が担保し、**リスク顕在時には追加資金投入も必要**

【技術基盤維持】 継続的な改良・新規開発を政策レベルでコミットし、技術基盤を維持

- ✓ ESA閣僚級理事会(2012年11月)にて、Ariane5ME継続、Ariane6詳細検討着手を了承、ベガ改良、FLPPもあわせて了承

世界の宇宙輸送政策について(3/4)

ロシアは宇宙アクセスの自律性を回復するため、新宇宙基地の建設と新型ロケットの開発を推進。当面は外国技術に依存しながら技術力回復を目指す。



©Roscosmos

アンガラロケットのエンジン燃焼試験

○ロシアの宇宙輸送政策:通称“プーチンプラン”, 2007, メドベージェフ大統領直轄「ロシア経済の近代化・技術開発委員会」, 2009

①宇宙開発の重点化:宇宙開発の重点化宇宙開発をロシア経済の「近代化」を進める上での重点分野の一つに指定

✓ 経済改革を牽引する5分野の一つとして宇宙技術分野を指定

②自律性の確保:ロシアの自律性確保を重要視し、旧ソ連関係国への依存からの脱却を指向

✓ ソユーズ、プロトン、ゼニット、ドニエプル、ロコット等を打ち上げるバイコヌール宇宙基地はカザフスタンからの租借

→ 自国からの打ち上げとすべく、ボストーチヌイ宇宙基地を建設中。2015年頃から運用開始との情報

✓ プロトン(機器の多くはウクライナ製)、ゼニット(ウクライナ製)、ドニエプル(ウクライナ、カザフスタンとの合弁)、ロコット(ドイツとの合弁)など他国へ依存する状態からの脱却を目指して純国産のアンガラを開発

③技術力の回復:設備や技術の老朽化や陳腐化、生産管理能力の低さ、人材ポテンシャル低下(中間層不足)危惧

✓ 1990年代のソ連崩壊後、ばらばらになった研究開発・製造ネットワークを再編、抜本対策を計画(2013-2020年国家宇宙計画)に反映。

- 電子技術の遅れを認め、当面はウクライナ等外国機器を活用しつつ、自国の技術を育てる戦略
- 人材のリクルート・育成を強化(大学との連携、福利厚生向上、学位取得促進など)

世界の宇宙輸送政策について(4/4)

中国は国威発揚を目的に宇宙開発を推進し、商業宇宙活動も活発化。インドは自律性確保を重視しているが、今後は産業振興のために商業宇宙活動の拡大を目指す。

○中国の宇宙輸送政策:中国航天科技集团公司(CASC)第12次五ヵ年計画(2011~2015年)

- ① ロケット開発:打ち上げロケット等の分野で世界トップクラスに入ること为目标に設定
 - ✓ 4つの目標の一つとして、打ち上げロケット等の分野で世界トップクラスに入ることと設定。**国威発揚が開発目的**となっている。
 - ✓ 現行の長征の信頼性及び適応力を高め、さらに、次世代打ち上げロケット「長征5号」(大型、GTO14t)、「長征6号」(小型、SSO700kmに1t)及び「長征7号」(有人、SSO700kmに5.5t)の開発を進める。
- ② 商業打ち上げ展開:商業打ち上げは米国干渉により難航も、積極的な目標を設定し拡大を指向
 - ✓ 2015年までに商業打ち上げ市場の15%、衛星市場の10%獲得目標、中国製衛星バスによる受注拡大を図っている。(国務院宇宙白書「2011年中国的航天」)
例:ベラルーシ通信・放送衛星の製造・打ち上げ契約締結。欧州から初受注。2014年打上予定
 - ✓ **ITAR規制で実質的に国際打ち上げ市場から締め出されていたが、近年、欧州がITARフリー衛星開発の動き。**ロケット打ち上げビジネスの機会拡大を期待。(例:ユーテルサットW3C、2011年10月長征3Bにより打ち上げ)
- ③ 新興国への進出:衛星と打ち上げ機のパッケージ提供で新興国への進出に積極的
 - ✓ 南米、アフリカ、アジア等**新興国との協力を強化**し、長征による打ち上げ機会を拡大。(例:ブラジルとの地球資源観測プログラムCBERS、ボリビア静止通信衛星、ナイジェリア通信衛星 等)

○インドの宇宙輸送政策

- ① 自国衛星の自律的な打ち上げ:自国打ち上げロケットによる自律性確保を重要視
 - ✓ インド製極低温上段エンジン(CUS)搭載の静止衛星打ち上げ用ロケット「GSLV-Mk2(打ち上げ能力:GTO2t、LEO5t)」の試験打ち上げの完了及び運用開始
 - ✓ 静止軌道打ち上げ能力を向上するGSLV-Mk3(GTO4t)を開発中、2016年頃初打ち上げ目標
 - ✓ 半低温エンジン(液酸/ケロシン)開発
- ② 産業振興としてのロケット開発を指向
 - ✓ 外国ロケット利用よりも安い価格で打ち上げるロケットを運用し、商業打ち上げ獲得拡大を目指す。
 - ✓ PSLV(打ち上げ能力SSO1.6t)とGSLV-Mk2を5年間で23機打ち上げを計画

世界の将来宇宙輸送システムに関する動向(米国1/4)

米国において、民間企業により、再使用型ロケットや再使用型有人宇宙往還機の開発が進められている。また、軍では再使用型無人宇宙往還機が運用されている。

● Falcon9-R

- 2011年、米SpaceX社は、Falcon9を再使用化する構想を発表
- Grasshopperという実験機で、垂直離着陸の実験を進めており、2015年までに1段の再使用技術を確立する計画
- SpaceX社CEOのElon Musk氏のインタビュー記事によれば、Falcon Heavyの再使用化により、\$500/lb(約1.1億円/トン)が可能となり、最終的には、\$100/lb(約0.2億円/トン)での高頻度打ち上げを目指しているとのこと



Grasshopper

● Dream Chaser

- NASAが進める商業乗員輸送機開発(CCDev)のひとつとして、Sierra Nevada社が開発している有人の再使用型往還機
- 早ければ2016年からの飛行開始を目指す。
- Atlas Vロケットで打ち上げ、最大7名の人員を国際宇宙ステーション(ISS)に輸送



Dream Chaserの試験機

● X-37B

- 米空軍が運用中の無人の再使用型往還機
- Atlas Vロケットで打ち上げられ、長期間(1年以上)の軌道上ミッションを行い、地上に帰還



軌道から帰還したX-37B

世界の将来宇宙輸送システムに関する動向(米国3/4)

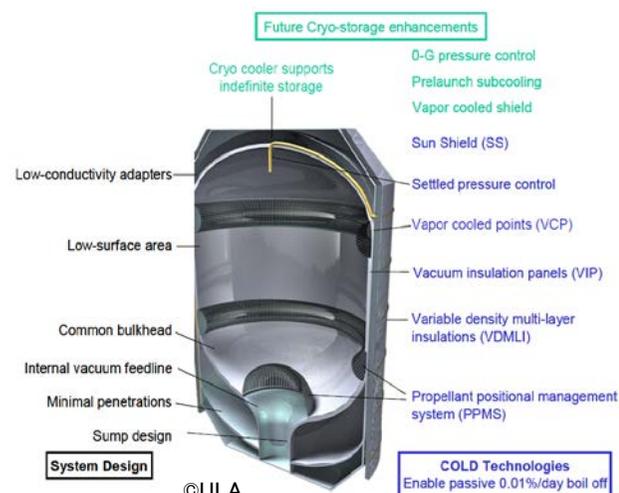
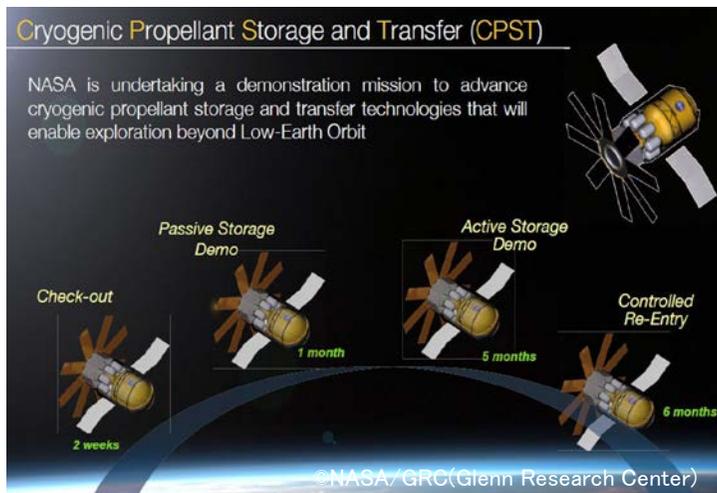
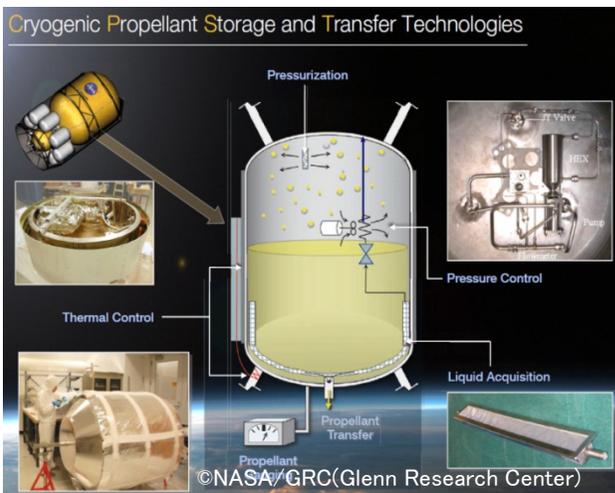
米国において、軌道間輸送機に関連する極低温燃料貯蔵技術の研究がNASAや民間企業で行われている。長期間、宇宙空間において液体燃料を保持するため、蒸発抑制等の技術がキーになる。

● NASA/GRC(Glenn Research Center)

- CFM(Cryogenic Fluid Management)として長年体系的に要素研究に取り組んでいる。CFM技術を搭載した長期ミッションのシステム実証テストベッド(CPST)を2018年に打上げ予定。軌道上での液体水素のデポ(タンク間移送)も行う。

● ULA(United Launch Alliance)

- 上段高機能化、デポ実現を目指し、地上試験、フライト実験、軌道上テストベッド等を通して精力的に技術力向上を進めている。

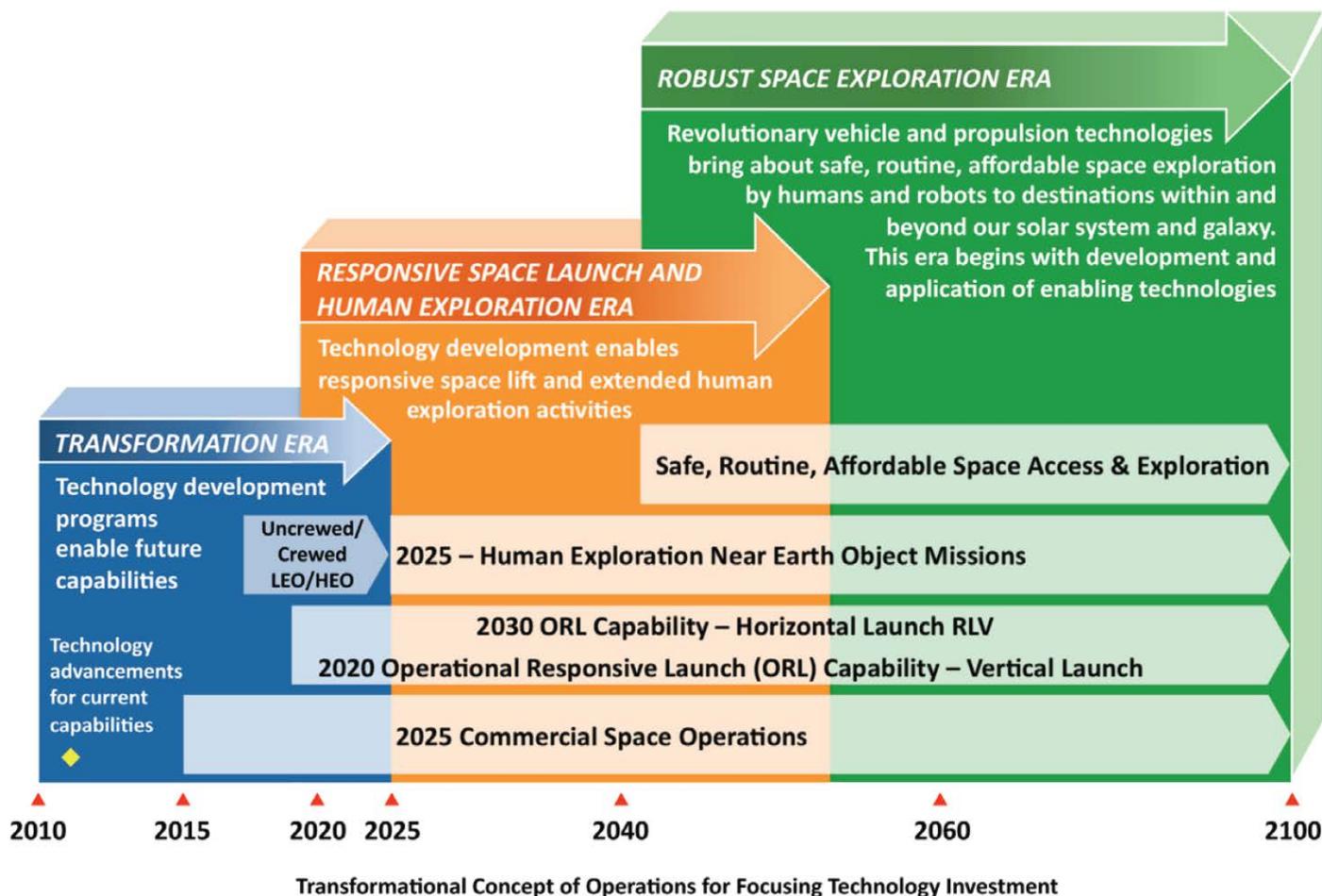


CFM技術とCPST概要

LH2蒸発ロス抑制技術(ULA)

世界の将来宇宙輸送システムに関する動向(米国4/4)

民間企業の積極的な取り組みにより加速される可能性もあるが、NASAの技術ロードマップでは、日常的な宇宙へのアクセスが可能になるのは、2040年代と予想されている。



出典)

Clements, G. R. et al., "Ground and Launch Systems Processing Roadmap, Technology Area 13," April 2012, NASA.

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 eXperimental 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、二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



©Khrunichev



©Khrunichev

AngaraとRRM



©ISRO

RLV-TD

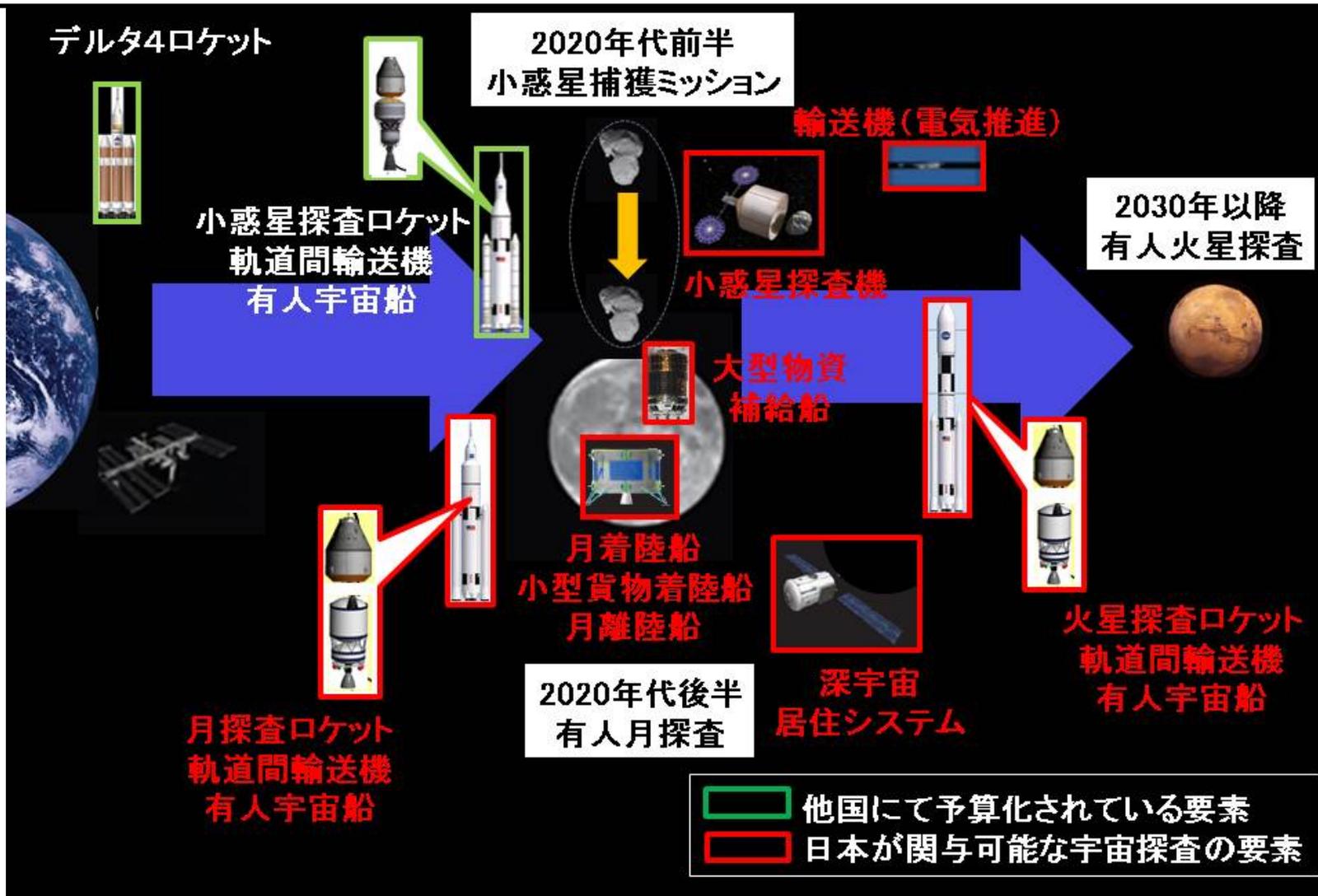


©China Internet Information Center

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葉が占める割合（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

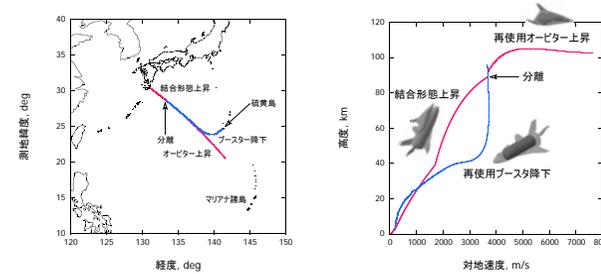
➢これらの技術レベルを重点的に底上げして融合させ、2020年頃を目途に本格的な将来輸送システム開発に着手する。



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

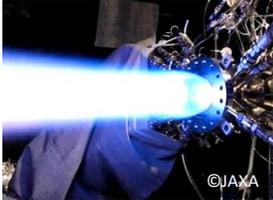
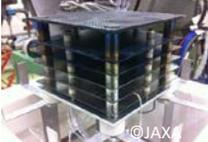


二段式完全再使用型輸送システム

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 ロケットエンジン	高信頼化、低コスト化 長寿命化、ヘルスマニタリング 炭化水素燃料の適用 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
		空気利用エンジン
		軌道変換エンジン 姿勢制御スラスタ
構造・熱防護	タンク加圧系、推進薬供給系 複合材機体構造	加圧ガス削減、推進薬の有効利用 低コスト化 材料・構造様式の工夫による軽量化 材料・構造様式の工夫による軽量化 口部の応力緩和 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 超耐熱セラミックタイル 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
		極低温複合材タンク
		極低温断熱材
		ヘルスマニタリングシステム
		熱防護システム

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"> 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み中。 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	 <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"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	 <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"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 米国では、カーボン/カーボン(C/C)材よりも高温の約1700°C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。 	 <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放射遮蔽構造)</p>
帰還誘導制御技術	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	 <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)

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マ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

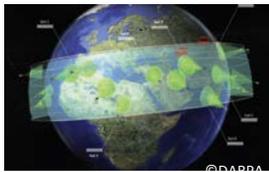
②衛星代替

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"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	 <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"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	 <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"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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)	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	 <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"> 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)

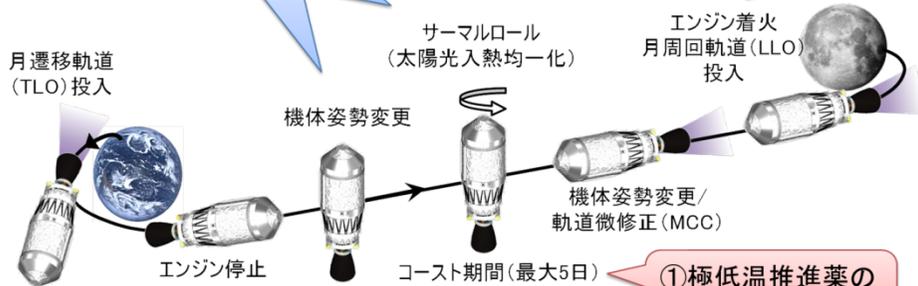
軌道間輸送機等に関する化学推進、電気推進の研究開発を実施。

○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)

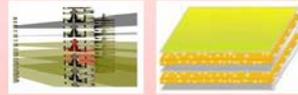


①極低温推進剤の長期貯蔵

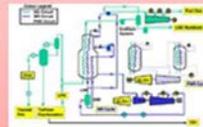
④高精度解析予測技術

- ✓ 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)

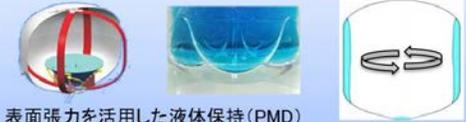


極低温タンク断熱システムの研究(衛星の熱制御技術の一部採用)



極低温推進系冷凍サイクル検討(ゼロボイルオフの実現)

②微小G下での液体推進剤の挙動制御



表面張力を活用した液体保持(PMD)

遠心力による液体静定

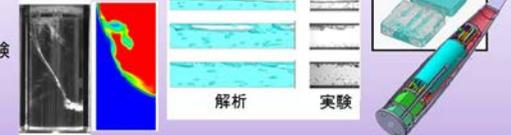
③エンジン着火前運用効率化(液ガス節約)



- ✓ 予冷量削減:リサーキュレーション(小型ポンプによる回流)予冷
- ✓ エンジン高機能化検討:アイドル燃焼/ディープスロットル

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

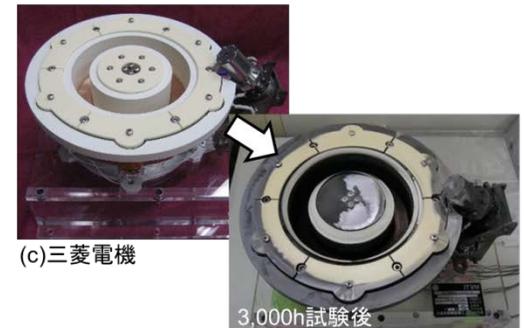
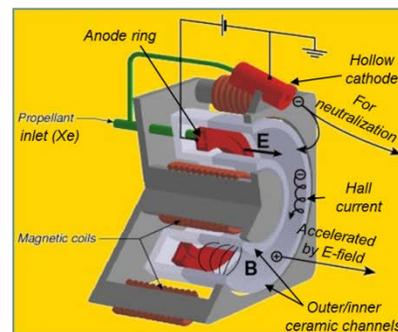


○電気推進

	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。

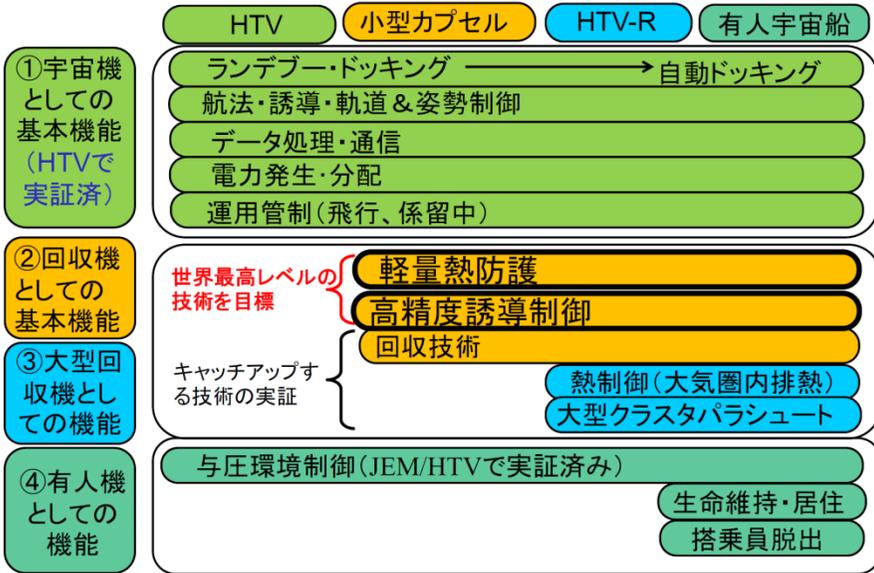


(c)三菱電機

3,000h試験後

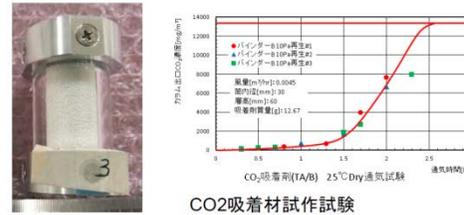
我が国の将来宇宙輸送システムに関する動向(JAXA 5/5)

有人宇宙船の机上検討、基礎技術の研究開発を実施。



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。

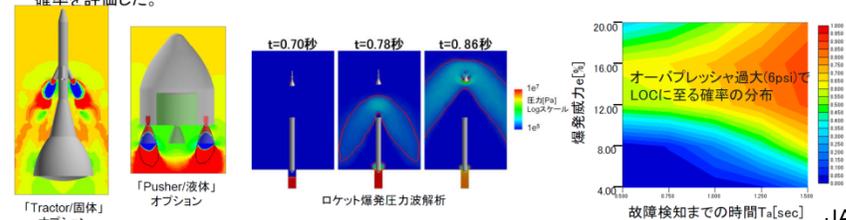


ECLSS: Environment Control and Life Support System

打上げ時緊急脱出技術:

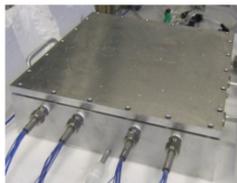
- 打上げ時のロケットの爆発等から脱出するための技術。
- 3年前より研究を開始し、脱出システムのコンセプト検討や成立性解析などを実施した。

- (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。



帰還時排熱技術:

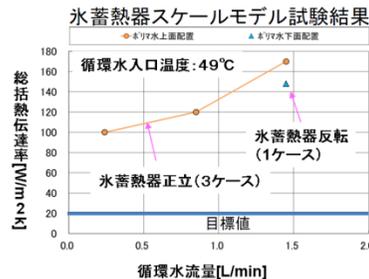
- 大気圏再突入後に断熱材で覆われた有人帰還カプセル(ラジエータは使用不可)から排熱する技術。これまでは、アンモニアや水などを噴霧してその蒸発潜熱で冷却したり、パラフィンなどの融解潜熱を利用する技術が主な手法。
- 地上技術でも使われている氷蓄熱技術を宇宙用に発展させ、融解・蒸発潜熱を利用し、かつポリマを活用することでメカニズムを簡素化する技術の研究。
- 地上試作品まで完成済み。



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)

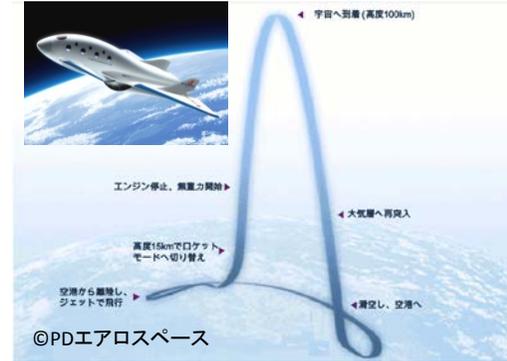


我が国の将来宇宙輸送システムに関する動向(民間)

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。

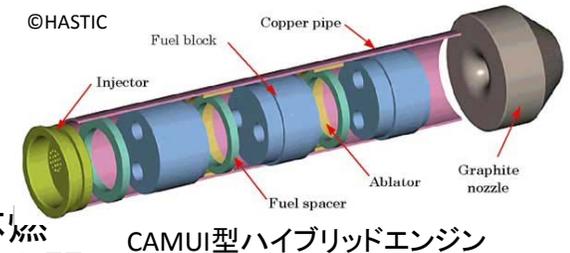
○サブオービタル飛行用スペースプレーンに関する取組

- 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 ₂ O ₄ /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

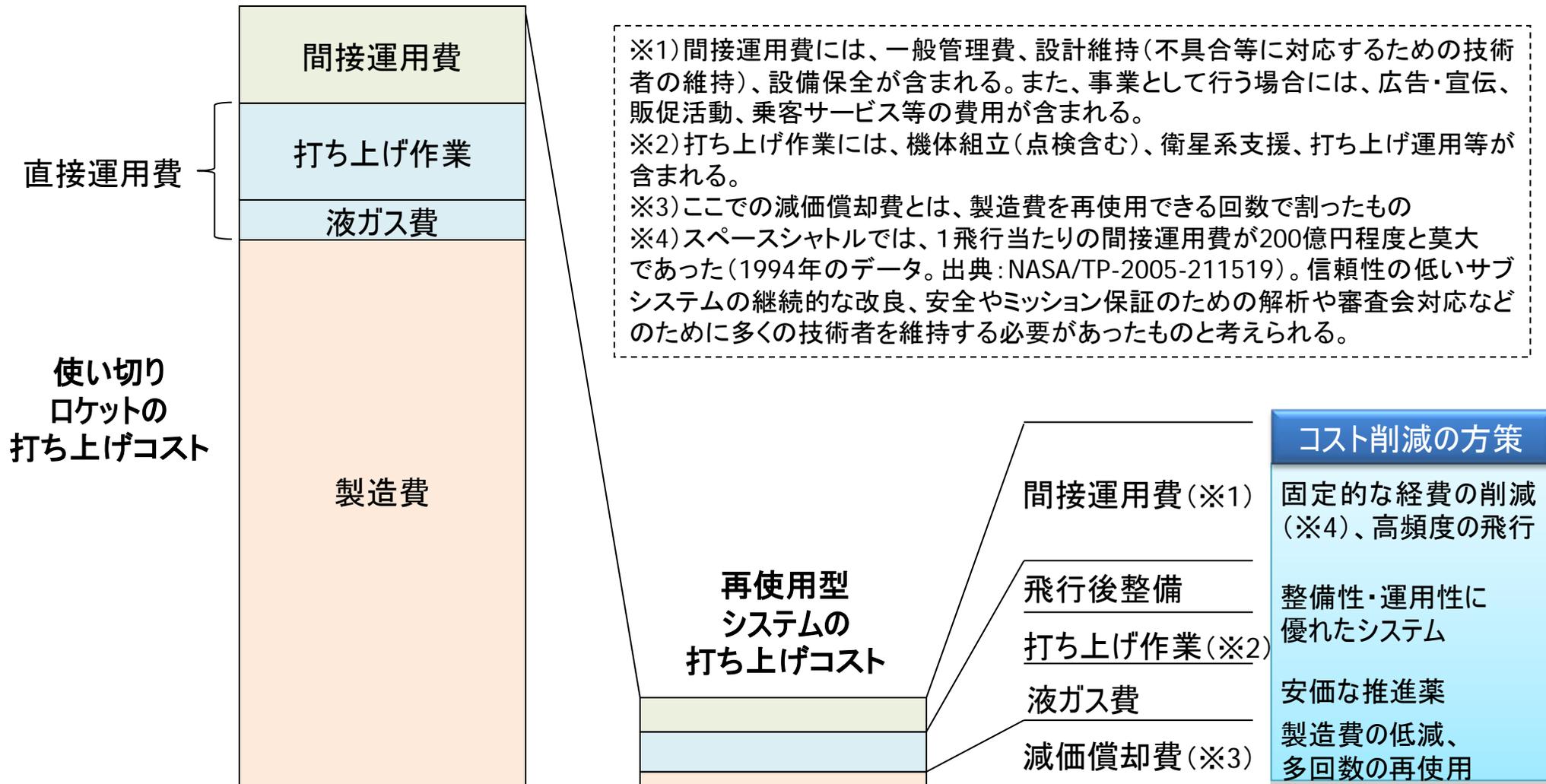
LOX: 液体酸素
N₂O₄: 四酸化二窒素

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

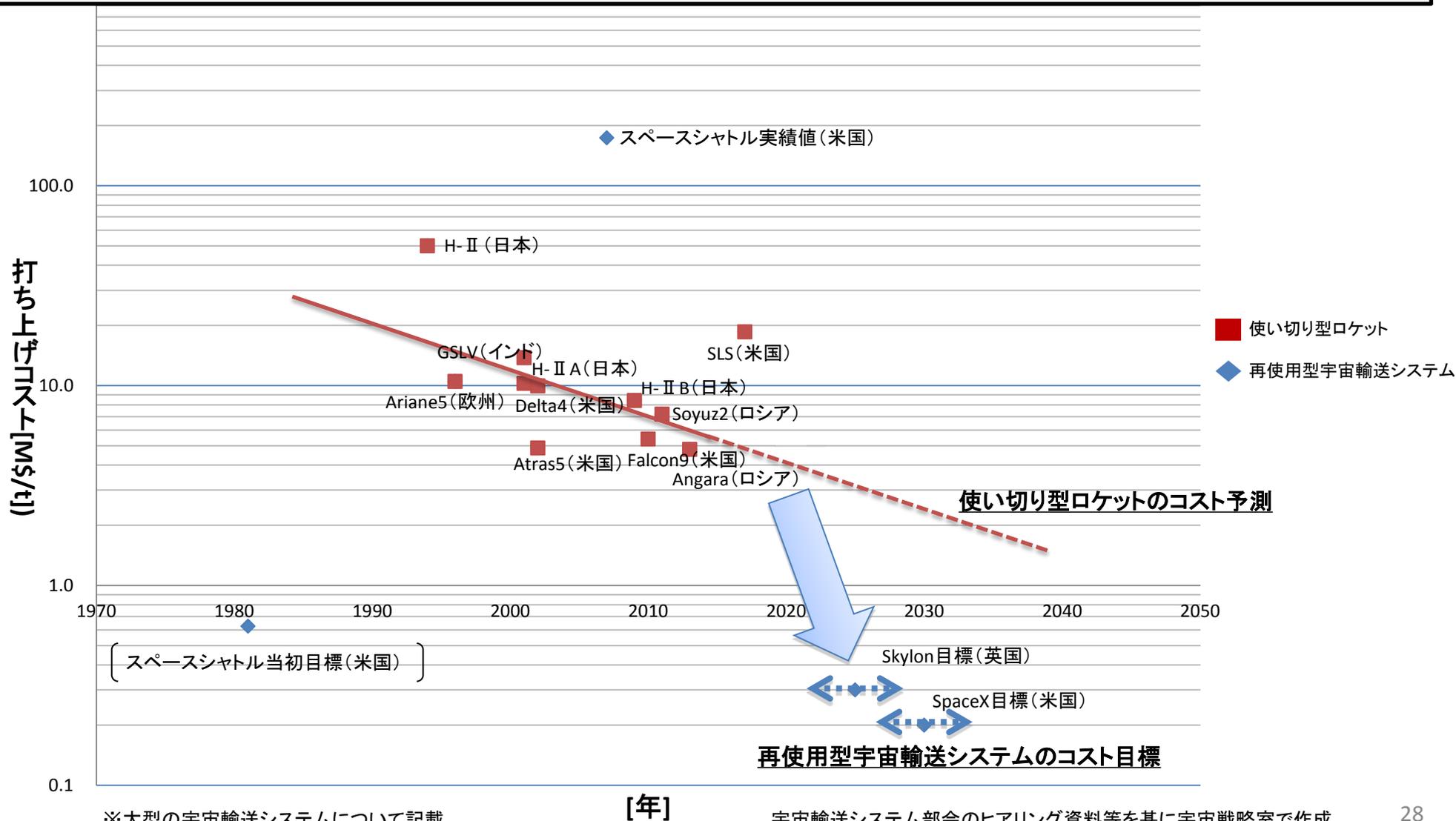
使い切り型と再使用型宇宙輸送システムのコスト構造比較

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。



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。

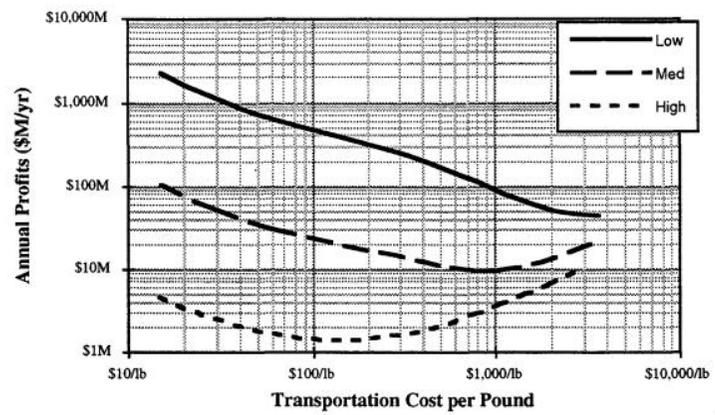
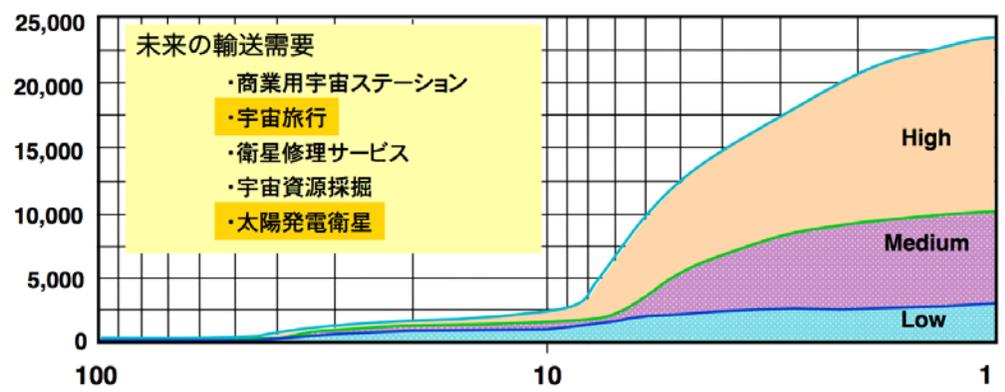


Figure 3.5.6.6-15. Transport Profits as a Function of Transport Cost
Commercial Space Transportation Study(CSTS) NASA 1997

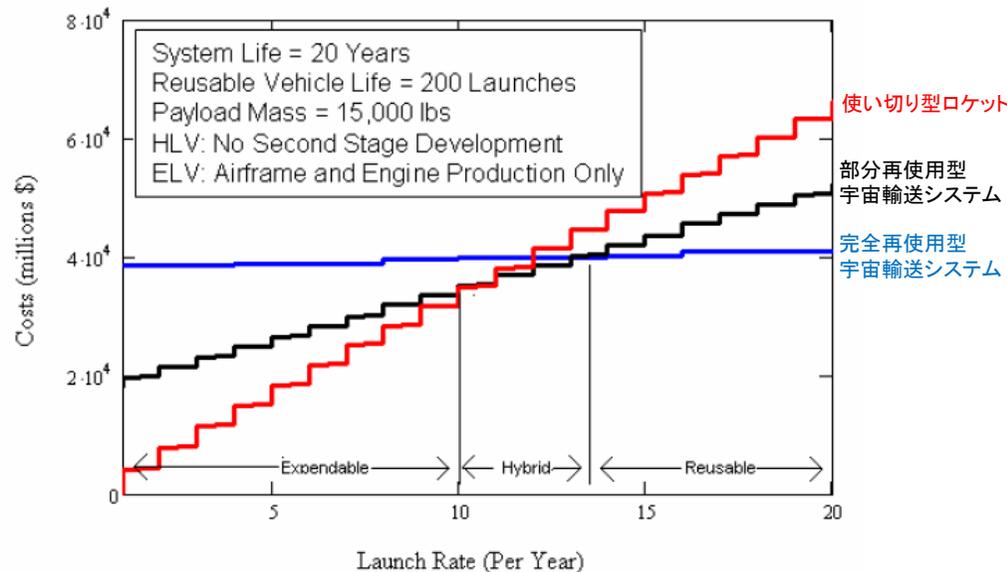
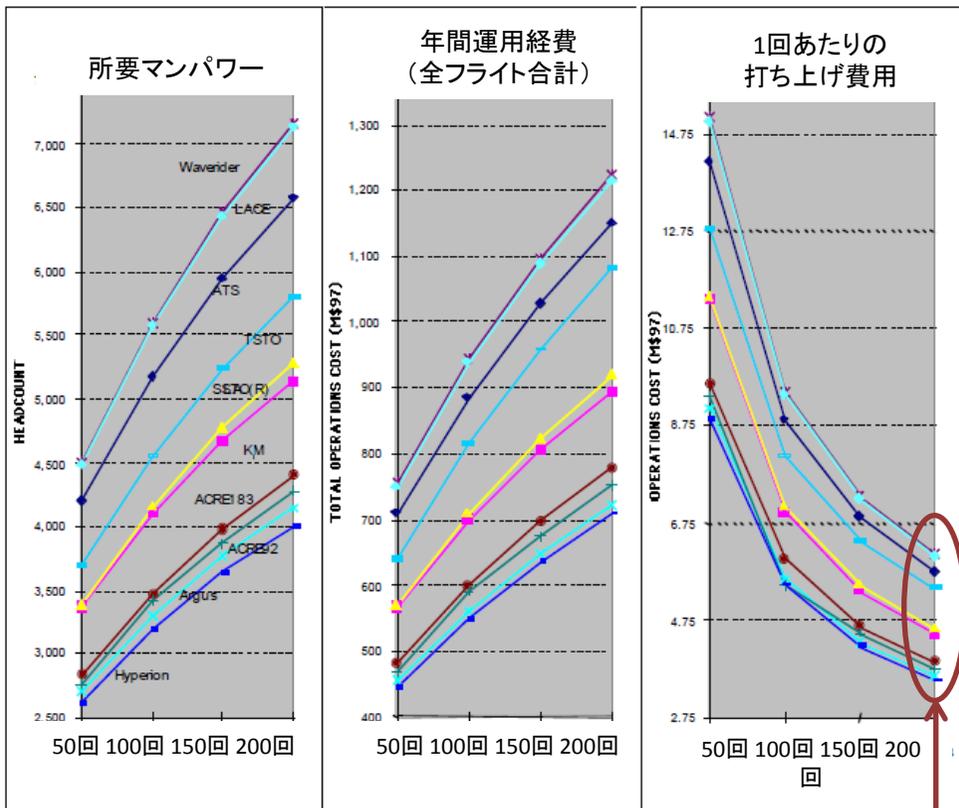
地球低軌道への年間総投入量(t)



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

現在の延長上にある宇宙利用の姿(1/3)

中大型衛星の利用や宇宙探査などの従来の延長上にある宇宙利用として、小型・超小型衛星のコンステレーション運用や再使用型ロケットによる観測・実験の実現が想定される。

● 再使用型ロケットによる観測・実験

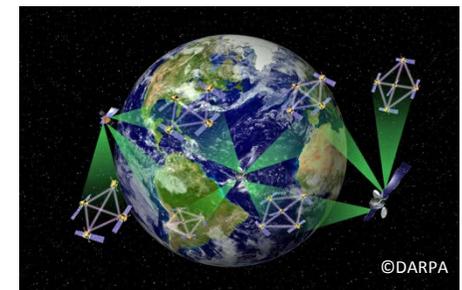
- 従来は使い切りロケットによって行われていた宇宙観測や微小重力実験を再使用ロケットで実施
- 観測・実験機会の増大や、これまでのロケットでは不可能だった実験(より柔軟な軌道、姿勢、速度等)を実現



JAXAで実験されている再使用観測ロケット

● 小型・超小型衛星のコンステレーション運用

- 災害監視・安全保障用途で、光学センサーや合成開口レーダーを搭載した小型衛星のコンステレーション運用を行う計画が各国政府で進められており、2010年代中にも実現の見込み
- 米Skybox等の民間企業も超小型衛星を活用した安価な衛星情報サービスを展開
- 大規模なコンステレーション化により、大型衛星に匹敵する能力を持たせる構想(例: DARPAのシステムF6)もある

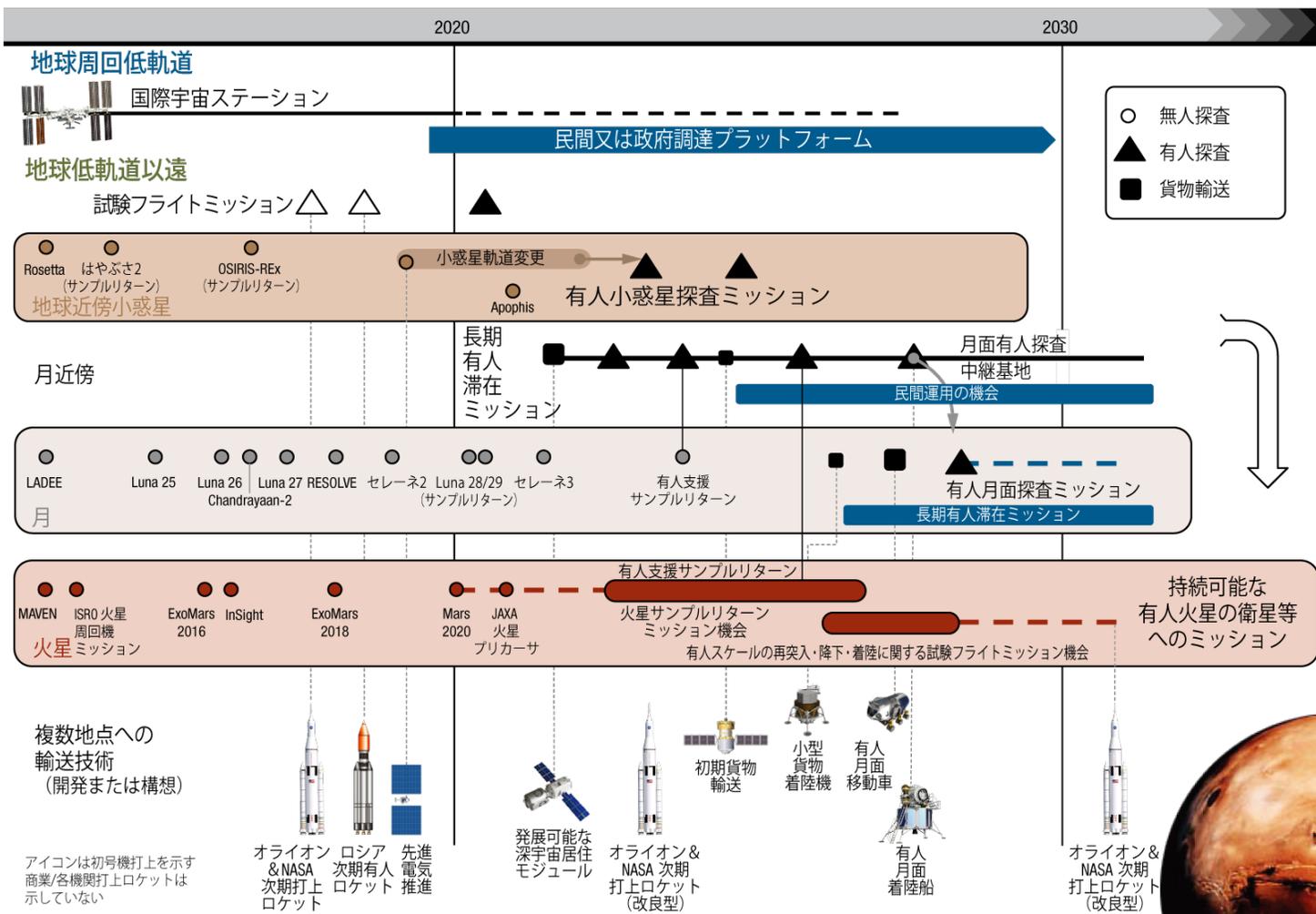


システムF6の概念図

現在の延長上にある宇宙利用の姿(2/3)

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)は、2020年代に月のラグランジェ点ステーションを設置することや、2030年代以降に月面や火星に基地を設置することなどを2013年のGlobal Exploration Roadmap(GER)第2版に盛り込んでいる。

ISECGミッションシナリオ



現在の延長上にある宇宙利用の姿(3/3)～各国の宇宙探査計画～

米国及び中国は、月と火星への有人探査を目指している。ロシアは火星への有人探査計画は無いが、月への有人探査に関心を持つ。欧州は月への有人探査計画は無いが、火星有人探査には関心あり。

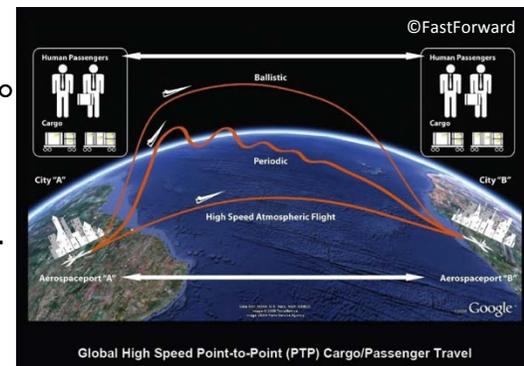
	ISS・低軌道	月周辺・月	小惑星	火星
米国	探査への準備として位置付けており、 <u>2020年以降も運用継続する方向で検討中</u>	<u>2021年頃に有人探査を実施予定であるが、月周辺に留まるのか、月着陸するかは定かでない。尚、将来の有人月探査向け準備として、無人探査は継続実施</u>	小惑星への探査計画はあるが、技術的状况に鑑み、小惑星を月周辺に持って来て探査する計画	<u>2030年代半ばに火星軌道、その後、火星着陸を目指す</u>
ロシア	探査への準備としてISSを位置付け。 <u>ISSを拡張する計画があり、積極的に延長する方向で検討中</u>	有人月探査に強い関心を持ち、 <u>2030年代に有人月探査を実施予定。また、有人月面基地構想を持つ</u>	無し	<u>有人探査計画は無く、無人探査を実施</u>
ESA	探査の準備として位置付け。但し、コストが高額であるため、ISSの <u>2020年以降の延長については検討中</u>	有人探査計画は無く、無人探査を実施 (ESA独自の計画は予算化されず、ロシアのプログラムに参画予定)	<u>有人探査計画は無く、無人探査を実施</u>	<u>有人探査を実施する予定であるが、ロボティクスを主張するフランスと有人を主張するドイツとの間で対立が続いている。</u>
中国	<u>独自の宇宙ステーションを2020年迄に完成予定</u>	<u>2025-2030年頃に有人探査を計画。また、時期は未定であるが、有人月面基地構想を持つとの報道もあり。</u>	無し	<u>2050年に有人火星探査を実現する目標を持つ</u>
インド	有人輸送機を計画中	無人探査を実施	無人探査を実施予定	無人探査を実施中

新たな宇宙利用の姿(1/6)

宇宙空間を経由して地球上の2地点を短時間で結ぶ高速二地点間輸送や、宇宙旅行の実現が想定される。

● 高速二地点間輸送

- 極超音速で飛行し、地球上の二地点間を結ぶ高速輸送手段の出現。
- 人と物(高価な部品や緊急移植用臓器等)の大陸間輸送に使用
- JAXAはマッハ5級の極超音速輸送機の研究を実施中
- ドイツのSpaceLinerなど、宇宙空間を経由しマッハ25級の速度で飛行する計画も存在
- 欧州ではLAPCAT(先進推進概念及び技術)計画及びLAPCAT2において複数の極超音速機計画に関する研究を実施
- 2013年から日欧共同研究計画HIKARIを開始



高速二地点間輸送の概念図。大気圏内を飛行するタイプ(マッハ5~8)、宇宙空間を飛行するタイプ(マッハ20台)、大気圏上層をバウンドしながら飛行するタイプの3パターンがある。

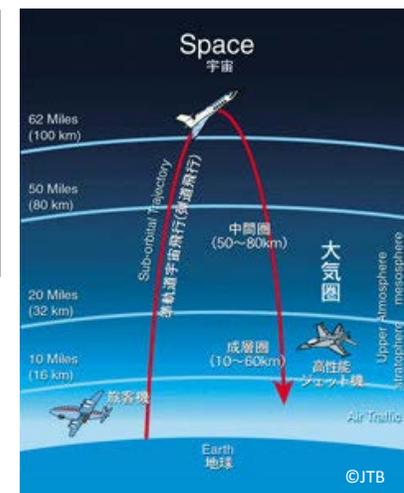
● 宇宙旅行

- 米ヴァージン・ギャラクティック社等がサブオービタル飛行による宇宙体験ツアー(高度100km)を計画中
- 宇宙体験飛行用のスペースポートも米国を中心に世界各地に建設中(一部は試験運用中)
- さらに将来的には地球・月軌道飛行や商業宇宙ステーションへの滞在も想定



ヴァージン・ギャラクティック社の宇宙体験機スペースシップ2

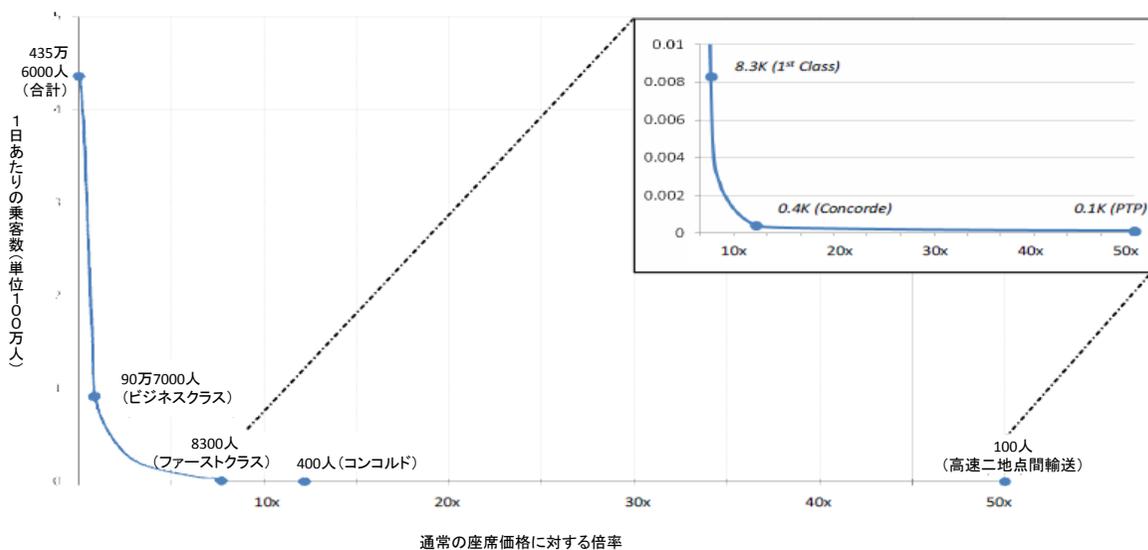
サブオービタル宇宙体験飛行の概念図



新たな宇宙利用の姿(2/6)～高速二地点間輸送の旅客需要予測～

- 現在の低軌道への輸送コスト(1万ドル/Kg)が100ドル/Kg程度を達成する時代には、高速二地点間輸送の運賃は1万ドル/人程度(現状のファーストクラスと同程度)で平均運賃倍率6程度となり、8,300人/日程度の需要が期待できる。
- また、高速二地点間輸送の運賃が平均運賃倍率3程度を達成すると、全世界の旅客の20%程度(現在のプレミアクラスの旅客割合、90万人/日)が利用すると予想される。

Global Daily Passenger Air Travel Seats by Fare Class



出典: "Point-to-Point People with Purpose - (Exploring the Possibility of a Commercial Traveler Market for Point-to-Point Suborbital Space Transportation)" (AA-2-2011-22), Derek Webber, Washington DC Director, Spaceport Associates, Bethesda, MD, USA

JFK: 米国ジョン・F・ケネディ国際空港
LHR: 英国ロンドン・ヒースロー空港
CDG: フランスシャルル・ド・ゴール国際空港

- 世界の航空輸送に占めるプレミアクラス需要・コンコルド実績から需要を予測。
- 現状の技術レベルを想定し、サブオービタル観光の価格(20万ドル/人)より、高額な(~40万ドル/人)運賃を前提。
- 平均運賃に対する倍率50とすると、全世界での乗客数は100人/日と悲観的な予測。

コンコルドの場合:

15万人/年利用(JFK-LHR、CDG-JFK旅客の4.5%に相当)。時間短縮のためファーストクラスの2倍の運賃。

新たな宇宙利用の姿(3/6)

政府が運用する宇宙ステーションだけでなく、民間宇宙ステーションの登場が想定される。また、軌道上サービスによる人工衛星の寿命延長、再使用型宇宙機による衛星機能の一時的代替といった利用も想定される。

● 商業宇宙ステーション

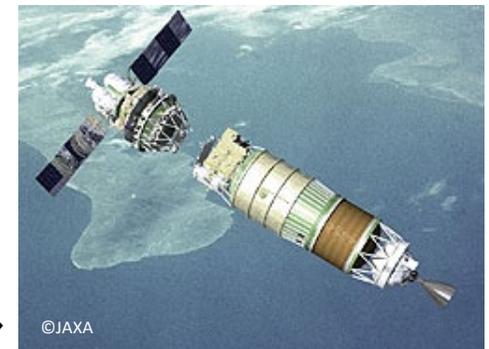
- 米ビゲロー社がインフレーターブル(膨張式)のモジュール構造を使用した民間宇宙ステーションを計画中
- 2015年にBEAM(ビゲロー実験活動モジュール)をISSに連結して実験。2016年には実用型のBA330モジュール(1個につき330立方m)を打ち上げる計画。用途はホテル、実験室、生産施設など



米ビゲロー社が計画している民間宇宙ステーション・モジュールBA330

● 軌道上サービス

- 軌道上の衛星に対する燃料補給、修理、改修(軌道上サービス)による衛星の寿命向上
- JAXAはこれまで軌道上サービスの研究を実施し、軌道上の衛星への接近・捕獲のためのランデブー用センサ、捕獲機構、軌道上作業機等を研究



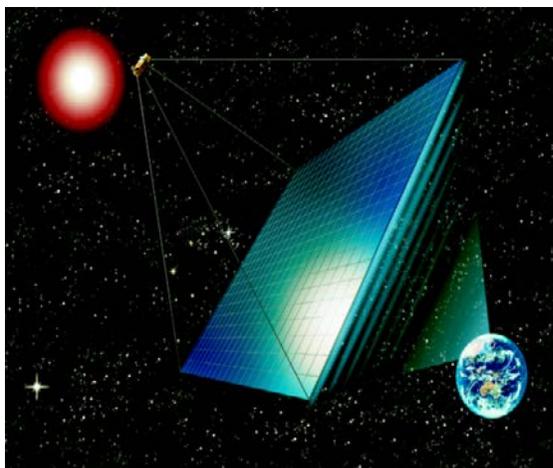
JAXAが研究した軌道上作業機のイメージ

新たな宇宙利用の姿(4/6)

静止軌道においては、宇宙太陽光利用システム(SSPS)など、大規模な構造物を宇宙空間に建造することが想定される。

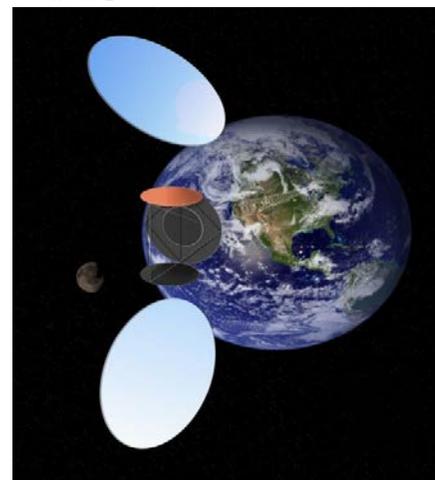
- 宇宙太陽光利用システム(SSPS)等の大規模構造物の建設
- 静止軌道上の太陽発電光パネルで発電を行い、マイクロ波等により地上へ伝送し、地上で再び電気エネルギーに変換する発電システム
- 我が国の大学、JAXA、企業等で要素研究が実施されている。
- 太陽光発電パネルや送電用アンテナは全長1km以上にもなり、大量の宇宙輸送能力が不可欠

マイクロ波方式SSPS Basic Model



パネル寸法 : 2.5km × 2.375km × 0.02m
全重量 : 26600ton
交流出力 : 1.00GW(おおよそ原発1機分)

マイクロ波方式SSPS Advanced Model



反射鏡寸法 : 2.5km × 3.5km
発電部寸法 : Φ 1.25km
送電部寸法 : Φ 1.8km
全重量 : 10000ton
交流出力 : 1.00GW(おおよそ原発1機分)

新たな宇宙利用の姿(5/6)～SSPS建造のための宇宙輸送系シナリオ～

宇宙太陽光利用システム(SSPS)の建造に当たっての物資輸送について、再使用型宇宙輸送往還機及び軌道間輸送機によって1年間に300回という高頻度の打ち上げがシナリオの一つとして想定。

(Advanced Model前提 2007年度時点の想定)

- SSPS建設: 1基/年のペースで、合計30機をGEO(静止軌道)に建設
- SSPS1機の総質量: 1万トン(組立時は機材も含めて、約1.5倍輸送)
- SSPS輸送: 2段階
 - 地上 ⇄ LEO(高度400km):
再使用型宇宙往還機: Reusable Launch Vehicle (RLV)
 - LEO ⇄ GEO: 軌道間輸送機: Orbit Transfer Vehicle (OTV)
電気推進等の高比推力(低推力)推進系を使用、再使用型を想定
- 射場: 赤道上に設置
- SSPS組立軌道: GEOにおいて組立

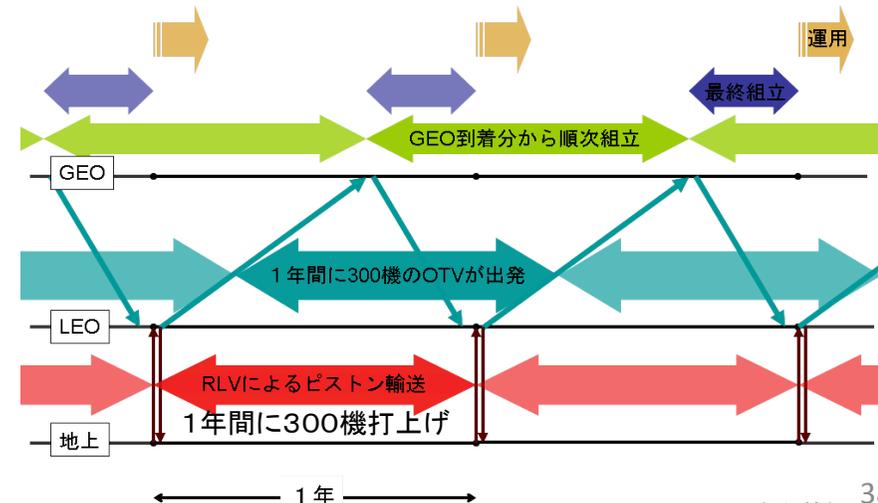
地上一LEO輸送機(RLV)

輸送重量 (1飛行当たり)	50 ton	寿命	500 飛行 10 年
総飛行回数 (SSPS1基当たり)	307 回	製造費(1) (1機当たり)	1000 億円
飛行頻度	7回/週	運行費 (1飛行当たり)	8.6 億円(2)
総輸送費 (SSPS1基当たり)	2,600億円	輸送費/輸送重量	0.17億円/ton(3)

(1)スペースシャトルの製造費は1機17-18億ドル程度

(2)製造コストは含まれるが、開発コストは含まない

(3)輸送コストはH-IIAの50分の1を想定



新たな宇宙利用の姿(6/6)

月周辺においては、次世代観測設備や地球観測設備を設置したり、月における埋蔵資源の調査を行うなど、国家の科学的活動が始まると想定される。地球近傍小惑星にはプラチナなどの希少金属を多く含むものがあると考えられており、これらの小惑星を捕獲して資源を採掘し、地球に輸送することも想定される。宇宙旅行を月周辺まで拡大させるなど、月の商業利用も見込まれる。

● 科学研究・資源採掘

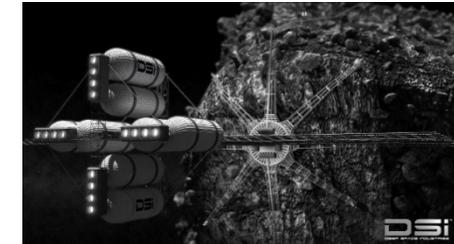
- 月面への深宇宙観測設備の設置
- 資源探査・採掘活動(月面:ヘリウム-3(約100万トン)、鉄、アルミニウム、チタン、水素、酸素、小惑星:プラチナ等)

● 月旅行

- 宇宙観光旅行の代理店である米Space Adventures社が月観光プランを販売中。ソユーズ宇宙船を使用して月軌道を周回し、約2週間で地球に帰還する。費用は1人あたり1億5000万ドル(約150億円)で、すでに1人分の契約が成立済み。
- 月周回軌道における観光の次の段階として、月ラグランジェ点ステーションや月軌道ステーションへの滞在が想定される。
- 月周辺までの軌道間輸送ネットワークが実現した場合、月面基地への観光滞在も可能となると見込まれる。清水建設の月面基地構想では、月面のレゴリスを使用したコンクリート製モジュールやインフレータブル構造を採用すると共にロボットを使用し、人間の負担を減らしながら長期滞在に適した月面基地の実現を目指す。宇宙ホテルとしての利用も検討されている。



月面望遠鏡



民間企業による資源探査



月観光宇宙船

将来宇宙輸送システムの機体及びエンジンの適用材料(1/3)

機体を熱から保護する耐熱・断熱材料については、整備性や耐熱性能の向上を目指した研究が進められている。また、大幅な軽量化のために、タンクも含めた全機構造の複合材化を目指している。

サブシステム	コンポーネント/ 部位	これまでの材料 (スペースシャトル)	将来の材料	置換えの狙い	開発期間
熱防護 システム	ノーズや翼前縁等の超高温部	C/C材 (SiCコーティング)	超耐熱軽量セラミックタイル、 超耐熱耐酸化コーティングを 施したC/C材	耐熱温度向上による飛行範 囲の拡大、緊急時の安全性 向上	5年程度
	空力舵面	セラミックタイル (主構造に接着)	C/C、SiC/SiC等の耐熱複合 材(舵面全体)	耐熱温度の向上による操舵 範囲の拡大	5年程度
	機体高温部	セラミックタイル (主構造に接着)	耐熱複合材表面パネル+軽 量内部断熱材(発泡金属サ ンドイッチ板やエアロゲル など)	頑健な表面パネルを用いるこ とによる安全性向上、ファスナ 固定による整備性の向上	5年程度
	機体低温部	可とう断熱材 (主構造に接着)	耐熱複合材または耐熱金属 表面パネル+高性能内部断 熱材	同上	5年程度
構造	胴体・主翼	アルミ合金	複合材(CFRP)	軽量化、整備コストの低減 (腐食がないことにより整備間 隔が長くできる)	実現可能なレベル
	推進薬タンク	アルミ合金	複合材(CFRP)	軽量化	5年程度

将来宇宙輸送システムの機体及びエンジンの適用材料(2/3)

- ロケットエンジンのさらなる低コスト化にむけて、エンジンの再使用化に資する長寿命化の実現、ならびに材料そのものの低コスト化を目指す。
- 複合サイクルエンジン等はノズルや空気ダクトを持つため、材料の軽量化はエンジンシステム重量軽減に対する効果大きい。

コンポーネント	要素	現在の材料	将来の材料	置換えの狙い	開発期間
ロケット 燃焼器	燃焼室	銅合金、ステンレス、インコネル等	耐熱銅合金 耐熱コーティング	長寿命化、 再使用化	10～15年程度
	噴射器	ニッケル合金、ステンレス等	3Dプリンタ対応 金属材料	複雑構造製造 コストの低減	5年程度
エアロスパイク ロケットエンジン (将来推進系)	ノズル部	銅、または銅合金、およびステンレスなど(研究用)	コーティング付加	耐熱性強化	5～10年程度
			耐熱複合材	軽量化	10～15年程度
ロケット複合サイ クルエンジン (将来推進系)	内蔵ロケット		ロケットエンジンに準じる		
	燃焼器(ラムダクト)	銅、または銅合金(研究用)	ニッケル合金	剛性確保、 軽量化	5年程度
			耐熱複合材	軽量化、 熱収支改善	10～15年程度

将来宇宙輸送システムの機体及びエンジンの適用材料(3/3)

コンポーネント	要素	現在の材料	将来の材料	置換えの狙い	開発期間
ロケット ターボポンプ	インペラ	インコネル(AMS718)、 チタン(AMS4924)	一般産業用インコネル ※2、チタン(AMS4930)	コストダウン	5～10年程度
	インデューサ	インコネル、チタン(同 上)	一般産業用インコネル、 チタン(同上)	コストダウン	5～10年程度
	タービン	インコネル(同上)	一般産業用インコネル (同上)	コストダウン	5～10年程度
	軸受内外輪	SUS440C	XD15NW※3 等	耐腐食性の向上 (応力腐食割れ防止)	5年程度
	軸受玉	SUS440	Si3N4※4	高速性能向上、 耐凝着性向上	5年程度
	軸受保持器	PTFE※5ガラス織布複 合材	強化PTFE材、PTFE+ PEEK※6材、PTFE+ア ルミ	製造性向上、 品質向上、 コストダウン	5年程度
	軸シールFR※1しゅ う動材	カーボン系材料	PTFE系材料	製造性向上、 コストダウン	10年程度
	軸シールFRシール ランナー	酸化クロムコーティング	検討中		10年程度

※1 FR: Floating Ring

※2 同規格のものを国内調達

※3 欧州の鉄鋼メーカーが特許を持つSUS系材料。SUS440Cと比較し極めて耐食性が向上

※4 窒化ケイ素、シリコンナイトライド

※5 ポリテトラフルオロエチレン、フッ素系ポリマー

※6 ポリエーテル・エーテル・ケトン、熱可塑性の樹脂

軌道遷移エネルギーの比較

ある地点・軌道地点に到達するための軌道遷移エネルギー(デルタV)は、地球上から出発するよりも地球軌道等から出発する場合の方が小さくなる。

典型的な各軌道間の軌道遷移エネルギー(デルタV)

	地球上	地球低軌道	地球静止軌道	月低軌道	月面上	火星低軌道
地球上	-	9300	13230	13270	15260	15010
地球低軌道 (200km)		-	3930	3970	5960	5710
地球静止軌道			-	1780	3770	4280
月低軌道 (200km)				-	1990	3700
月面上					-	5680
火星低軌道 (200km)						-

単位:m/s

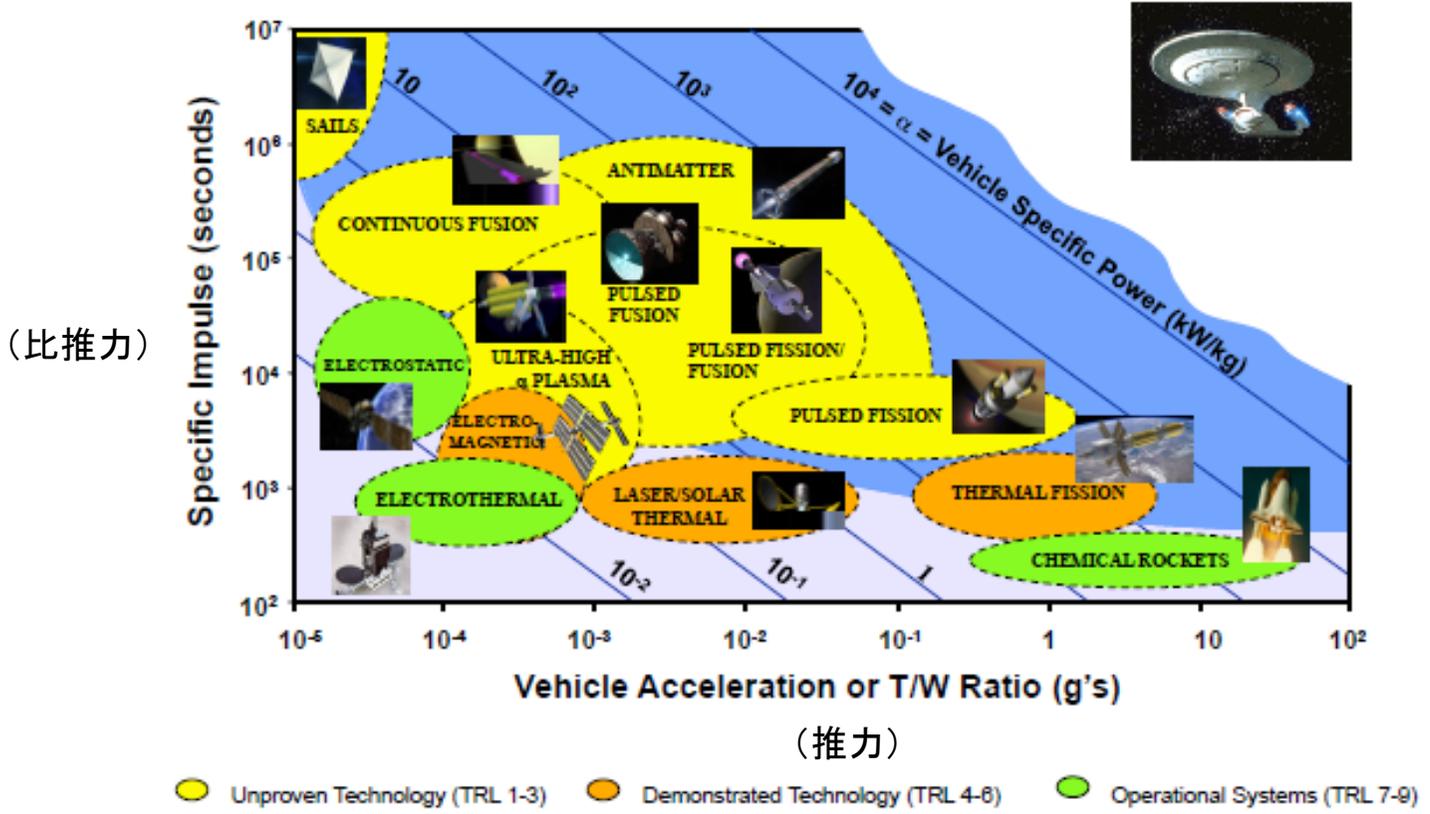
出典:平成7年度科学技術庁委託研究「月探査に関する調査研究報告書」(未来工学研究所)

高出力推進系について

火星有人探査などにおいて要求される高比推力と高推力を両立させるためには、原子力や反物質などの高出力推進系を利用することが想定される。



Capabilities of Candidate Propulsion Technologies



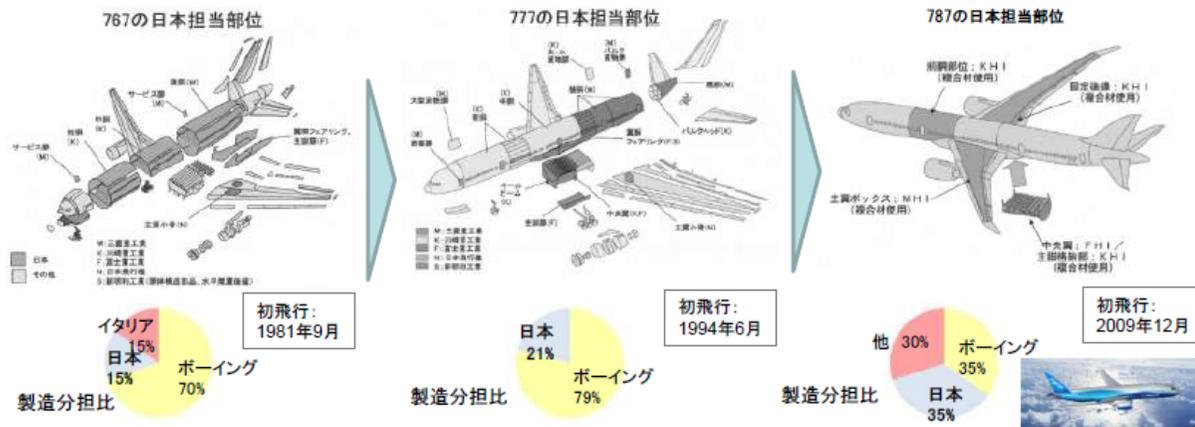
出典: George Schmidt "Nuclear Systems for Space Propulsion and Power" 8 December 2010, FISO Seminar

航空業界における国際協業の状況

航空産業の場合、世界で大型旅客機を製造しているのは、事実上、ボーイングとエアバスの2社の寡占状態となっている。

○ 機体開発への参画状況

- 対ボーイング社：共同開発・製造の分担比率を徐々に向上させ、最新のB787においてはボーイングと製造分担比で等しく、主翼も担当している。

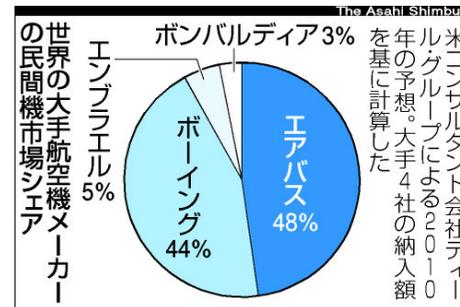


- 対エアバス社：A330、A380等へのプロジェクトへサプライヤーもしくはサブコントラクターとして参加。
- 対ボンバルディア社：三菱重工業がリスク・シェアリング・パートナー※として開発、生産に参画。
- 対エンブラエル社：川崎重工業がリスク・シェアリング・パートナーとして開発、生産に参画。

※リスク・シェアリング・パートナー：

製造・設計にあたり、開発費やマネジメントのリスクを一部分担することで、応分の作業分担を得る共同開発への参画形態 5

出所：航空科学技術の現状と新たな取り組みについて 平成25年5月23日 文部科学省研究開発局・JAXA



世界の航空産業のサプライチェーンの階層構造



航空機等に関する技術開発動向調査報告書

財団法人航空機国際共同開発促進基金

海外の宇宙輸送システムに関する制度の動向

宇宙輸送の安全にかかわる欧米の制度は以下のとおり。商業民間輸送の台頭に伴い、米国でFAA規定化の動き。

- 米国
 - 空軍管轄射場での打ち上げは射場利用マニュアル (AFSPCMAN 91-710)が要求される
 - 商業衛星打ち上げに対してはFAAの安全基準が追加要求される
 - 商業有人輸送に対してはFAA規定にPart460として有人宇宙飛行要求が盛り込まれている。
- 欧州
 - 2008年4月に法律化された宇宙利用のための行動規範(FSOA)内に安全基準を示すTechnical Regulationあり。

欧米 宇宙輸送 安全規定の整理

米国			欧州		
官需		空軍射場利用マニュアル AFSPCMAN917			
民需	無人輸送	空軍射場利用マニュアル AFSPCMAN917 及び、 FAA規定 14CFR Part417	官・民需	無人輸送	フランス 宇宙行動規範 (FSOA)
	有人輸送 (RLV)	FAA規定 14CFR Part431 14CFR Part460		有人輸送 (RLV)	—

Regulations

Title 14 CFR

Chapter III—Commercial Space Transportation, Federal Aviation Administration, Department of Transportation

Subchapter A – General

- [Part 400 — Basis and Scope](#)
- [Part 401 — Organization and Definitions](#)

Subchapter B – Procedure

- [Part 404 — Regulations and Licensing Requirements](#)
- [Part 405 — Investigations and Enforcement](#)
- [Part 406 — Investigations, Enforcement, and Administrative Review](#)

Subchapter C – Licensing

- [Part 413 — License Application Procedures](#)
- [Part 414 — Safety Approvals](#)
- [Part 415 — Launch License](#)
- [Part 417 — Launch Safety](#)
- [Part 420 — License to Operate a Launch Site](#)
- [Part 431 — Launch and Reentry of a Reusable Launch Vehicle \(RLV\)](#)
- [Part 433 — License to Operate a Reentry Site](#)
- [Part 435 — Reentry of a Reentry Vehicle Other than a Reusable Launch Vehicle \(RLV\)](#)
- [Part 437 — Experimental Permits](#)
- [Part 440 — Financial Responsibility](#)
- [Part 460 — Human Space Flight Requirements](#)

FAA規定の目次抜粋