

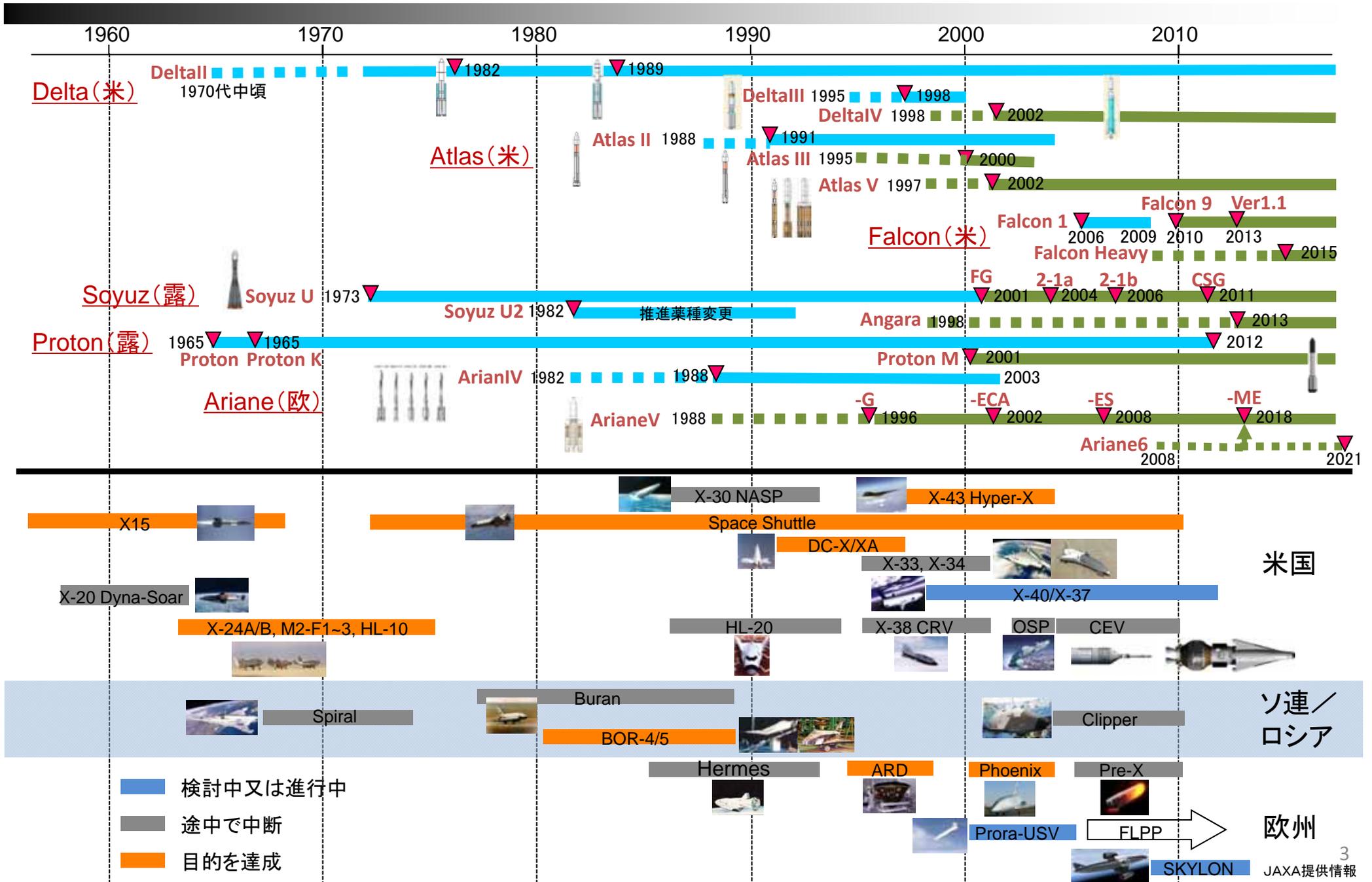
宇宙輸送システム
長期ビジョン 参考資料集

平成 26 年 4 月 3 日

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登場時期



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高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続けている。

- 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タ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を進める。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)

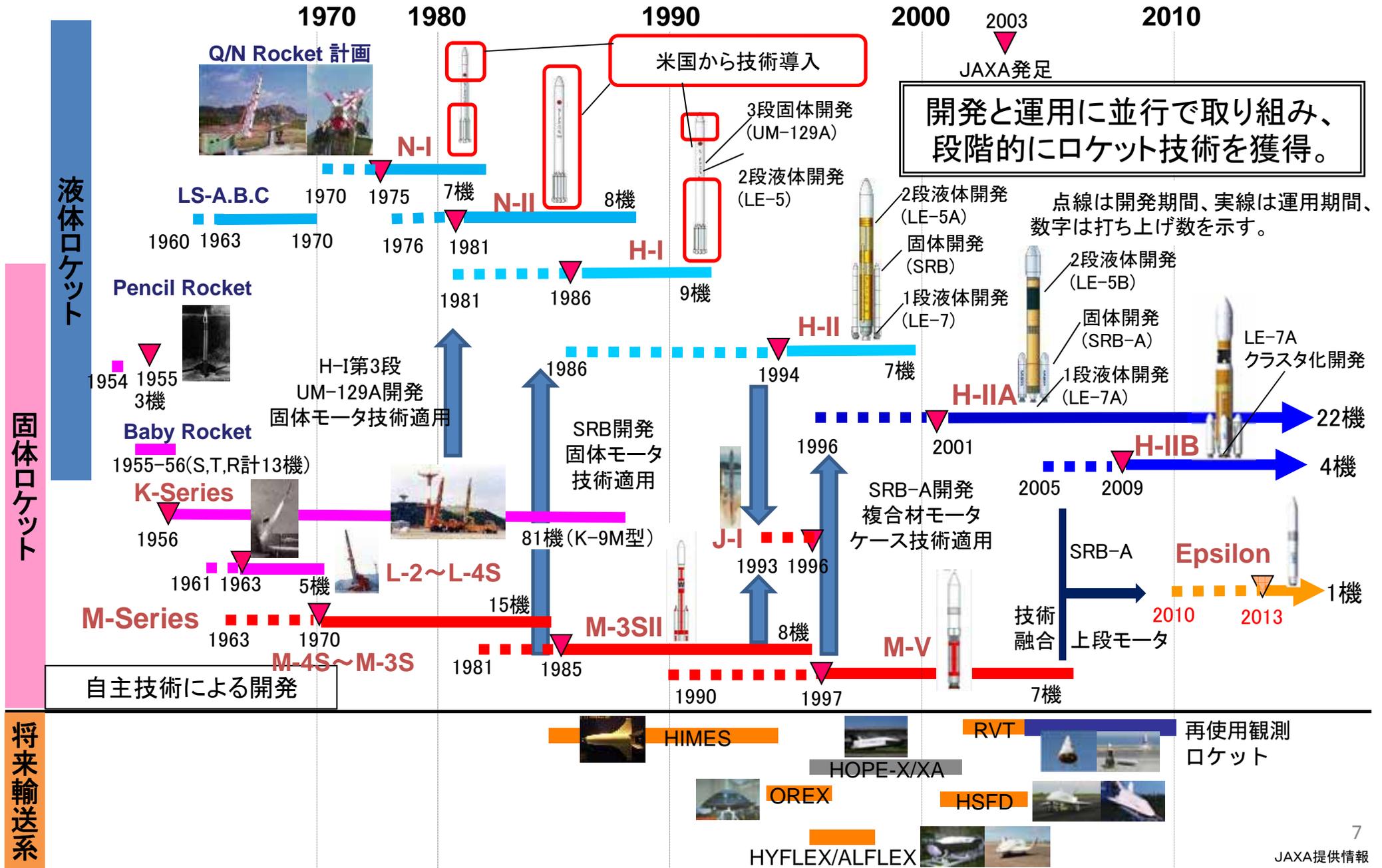
- インドは1980年に国産ロケットSLVによる初の衛星打ち上げに成功
- 1988年にはSLVの派生型であるASLVの打ち上げ、1994年には固体燃料と液体燃料を組み合わせた低軌道打ち上げロケットPSLVの打ち上げを開始。商業打ち上げ受注にも成功
- 今後は静止衛星の打ち上げを目指すGSLVの開発とともに、再使用型宇宙輸送システムとして小型衛星打ち上げ用のAVATAR宇宙往還機の開発も計画
- ブラジル等、幾つかの国々が使い切りロケットの開発を目指す。



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-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-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-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-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-の改良型であるH-A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-B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で対応。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

● 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

● 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



Grasshopper



Dream Chaserの試験機



軌道から帰還したX-37B

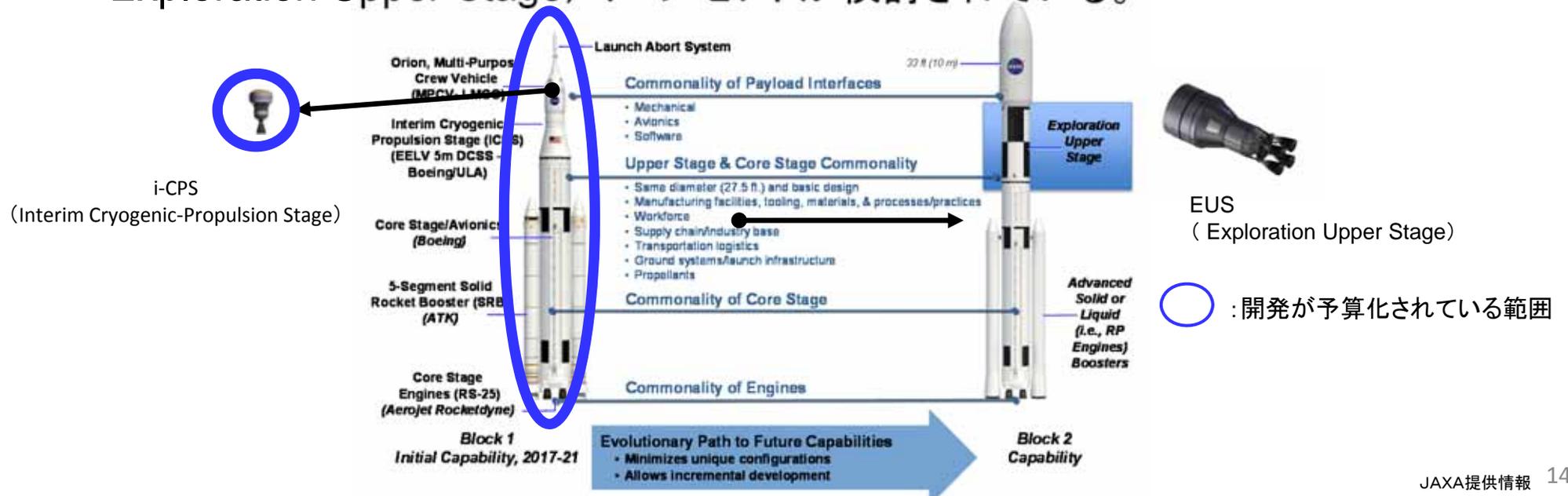
世界の将来宇宙輸送システムに関する動向 (米国2/4)

- 米国において、NASAが探査用次期打ち上げシステム(SLS)を開発中(使い切りロケット)。
- ロケット上段および軌道間輸送の機能を有するシステムについても検討されている。

(1) スペースシャトル引退後の探査用次期打ち上げシステム(SLS)の第1段階として、以下を開発中(下図青枠)(2017年初号機打ち上げ予定)

- ① 有人宇宙船(MPCV)
- ② 1段ステージ(シャトルメインエンジン(SSME)、固体ブースタ(RSRM)を利活用)
- ③ 2段ステージ(i-CPS。デルタ4の2段ステージを利活用)

(2) 2013年7月、SLS第1段階の基本設計審査(PDR)が完了。第2段階への発展構想も審議された。軌道投入と軌道間輸送の機能を兼用する上段ステージEUS(Exploration Upper Stage)のコンセプトが検討されている。



世界の将来宇宙輸送システムに関する動向(米国3/4)

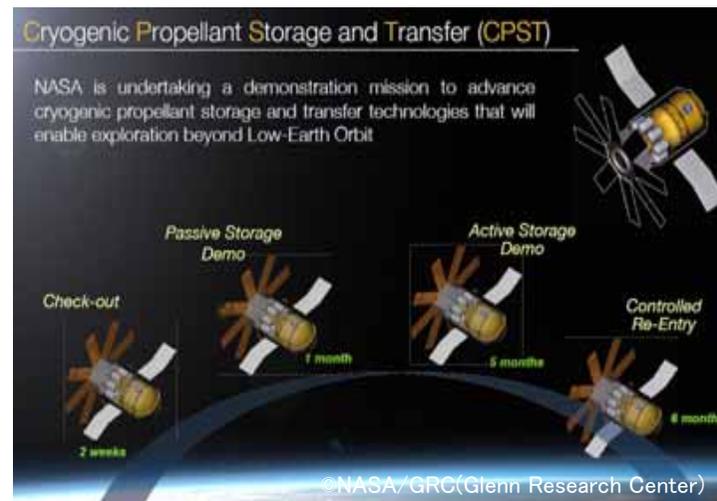
米国において、軌道間輸送機に関連する極低温燃料貯蔵技術の研究がNASAや民間企業で行われている。長期間、宇宙空間において液体燃料を保持するため、蒸発抑制等の技術がキーになる。

● 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。

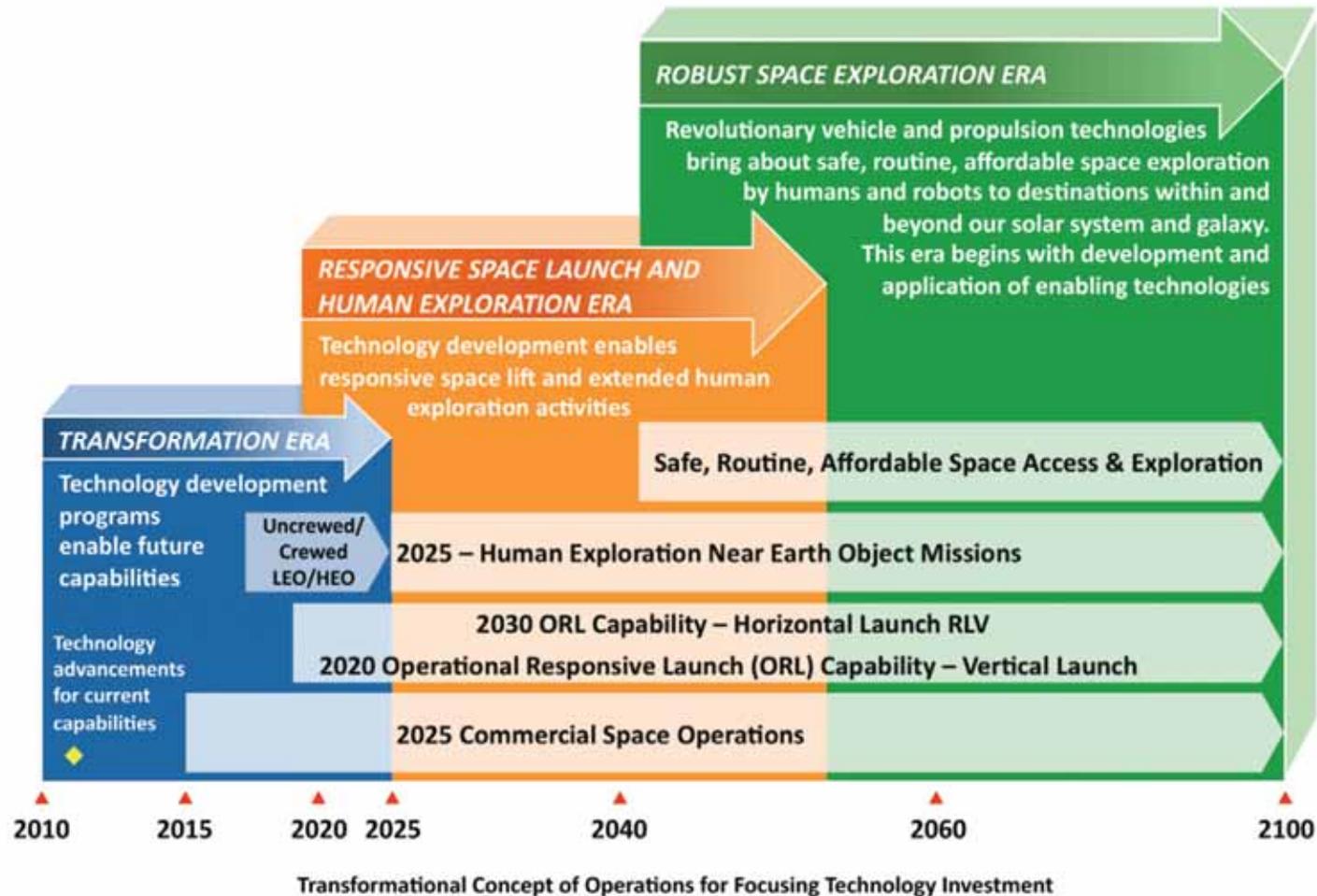


CFM技術とCPST概要

LH2蒸発ロス抑制技術(ULA) 15
JAXA提供情報

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.