

### 資料3-3

科学技術・学術審議会  
研究計画・評価分科会  
宇宙開発利用部会  
将来宇宙輸送システム  
調査検討小委員会  
(第3回) R2.2.20

# 宇宙輸送系の取り巻く状況と 将来に向けた今後の取組方策について

令和2年2月20日

国立研究開発法人  
宇宙航空研究開発機構

# 1. 状況認識

## ① 宇宙輸送産業基盤の保持に関する各国動向

- 我が国においては、宇宙開発利用の根幹である我が国の自立的持続可能な宇宙輸送システムを確保しており、安全保障を中心とする政府衛星や海外の商業衛星、探査機等を打ち上げてきている。
- 米国では、空軍を主体としたNational Security Space Launch (NSSL) プログラム (旧 EELV) の国主導の宇宙へのアクセス手段確保の施策 (ULA/Boeing/ Lockheed Martin, Northrop Grumman Innovation Systems等) に加え、NASAの商業宇宙施策の下で新興企業 (SpaceX等) が想定以上の速さでロケット開発、事業化を推進。欧州、ロシア等においても、国主導の政策の下で基幹ロケット開発及びその維持を実施している。
- 特に米国新興企業は、政府衛星の獲得と併せて、シェア獲得優先で進めているのが特徴であり、商業打上げ市場は過当競争領域となるおそれも考えられる。
- こうした状況下、各国とも将来の宇宙輸送システムに向けた中長期的な戦略的な研究開発にも取り組んでおり、革新的イノベーションへの挑戦を推進しつつ、次世代を担う人材の育成にも貢献している。

## ② 民間事業者による宇宙輸送事業の立ち上がり

- 宇宙先進各国と同様に、国内においても新興企業を含む、複数の民間企業が宇宙輸送事業を立ち上げ、推進しつつある状況。我が国の宇宙輸送産業拡大に貢献するため、JAXAにおいてもそれらと共創すべく、J-SPARCの枠組みにて連携を模索し始めたところ。

# 1. 状況認識

## ③ 月探査を第一ステップとした宇宙探査活動の構想実現化の動き

- 米国では、2024年の有人月面着陸、2030年代の有人火星着陸を目指す「アルテミス計画」を発表。同時に、我が国でも、国際宇宙探査計画への参画を決定。宇宙輸送系関連では、HTV-X/H3ロケットによる月周回有人拠点（Gateway）への物資・燃料補給ミッションで貢献する計画。また、将来的な月・火星探査構想検討において輸送需要の増加が見込まれる状況。

## ④ 宇宙利用活動の広がりおよび宇宙領域の戦略的重要性の高まり

- 宇宙は他分野から独立していた時代から、国民生活にデータを介して不可欠なものになり、宇宙の果たす役割は飛躍的に増大。衛星コンステレーションによる民間事業など、新たな価値（ビジネス）を創造する動きが加速。
- 同時に、宇宙は我が国としての優位性を獲得する上で死活的に重要な領域と識別され※、新たな防衛力構築に向けて従来とは抜本的に異なる速度で変革を進めることとされた。  
※「平成31年度以降に係る防衛計画の大綱について」
- 米国においても、国防総省に宇宙軍を新たに創設することを決定。
- また、スペースデブリ増加が宇宙空間の安定的な利用への脅威になるとの国際的な共通認識の下、対策の取り組みや規範作り等の検討・議論が加速してきている。
- 民間の宇宙活動が活発化する中、安全保障用途を含めたデュアルユースとして、宇宙空間の利用・技術とその価値が多様に変化していくとともに、国が主体となる活動が広がっていくことも想定される。

# 1. 状況認識

## ⑤ 将来輸送系研究開発の取組

- 米国民間企業SpaceXによる1段ステージ再使用の実用化が進む中、米国、ヨーロッパ、中国で同様の1段再使用化の研究開発が行われているが、未だ抜本的な輸送コスト低減につながる技術革新、研究開発成果が創出しているとは必ずしも言えない状況。（現状の市場競争では、マーケットシェア拡大戦略に合わせて行う、大量生産、垂直統合型生産方式等製造・調達改革によるコストダウン取組が主。1段再使用についてはその効果は不明。）

## ⑥ 人的基盤維持・拡大の必要性

- 将来輸送系のような研究開発は、既成概念にとらわれず、次世代を担う若手研究者、若手エンジニア、広く内外有識者などの多様な交流を実現する環境の醸成が重要であり、これにより技術革新のポテンシャルを高め、長期にわたり様々な挑戦に取り組んでいくことが可能となる。今後、我が国産業・科学技術基盤を支える人材の育成・確保の施策推進が急務。

## 2. 基本的な対応の考え方

### (1) 我が国宇宙政策の実現、宇宙輸送産業の確保

- 各国、宇宙への自立的輸送手段として、直接的・間接的に主力となるロケットを政策的に維持・発展させている。
- 我が国としても、宇宙空間への自立的なアクセス手段を確保し続けることは、引き続き維持すべき重要な施策。基幹ロケットの維持・発展を通じて、そのアクセス手段を継続的に保持していくとともに、我が国の宇宙輸送系全体の産業・科学技術基盤を支えていくことが重要。
- 上記を踏まえ、一層激化する国際競争、多様化する需要、宇宙環境課題等に対応し、JAXAは基幹ロケットの国際競争力強化などに必要な研究開発の取組を継続的に進めていく必要がある。また、国際宇宙探査をベースとした、人類の活動領域拡大の活動に際しても、基幹ロケットとして将来的なニーズに技術で効果的に応えられるよう研究開発を進める。
- 同時に、地球周回軌道は、市場原理をベースに民間による競争力強化、低コスト化、あるいは技術革新等の活動が活発に行われている、あるいは今後期待できる領域。意欲を持って挑戦しようとする民間の活力を最大限発揮し、我が国の宇宙輸送系全体の産業・科学技術基盤の発展に資していくため、ベンチャーを含む産業界のチャレンジをJAXAは積極的に事業化支援していく。

## 2. 基本的な対応の考え方

### (2) 将来宇宙輸送システムの研究開発

- これまでのJAXAの活動では、「宇宙輸送システム長期ビジョン」（平成26年内閣府宇宙政策委員会）等を踏まえ、将来の選択肢となる複数の有望技術について、**実用化に向けた技術成熟度を着実に向上。**
- 特にエアブリージングエンジン技術は安全保障関連機関との連携、再使用技術であるCALLISTOは国際連携にて効率的かつ着実に進めるとともに、LNGエンジン技術については世界最高レベルに概ね到達し、今後の実用化を見据えた具体的なアプリケーション検討が可能な状況。
- 他方、**抜本的な輸送コスト低減を実現**するためには、既存技術の延長上にある技術発展のみならず、**ブレークスルーを起こしうる新たな要素技術の創出が必要**。その際、異業種・異分野連携によるイノベーション創出がキー。
- 今後の取り組みとしては、宇宙輸送システム長期ビジョンで提示された**「マルチパスアプローチ」**を基本として以下を柱として推進する。
  - ✓ 将来の選択肢となる複数の有望技術の発展に資する研究開発
  - ✓ 抜本的な輸送コスト低減に資するイノベーション活動（異業種・異分野との連携がしやすい環境を醸成し、先端研究を推進）
- **これらの取組により先端技術の獲得・更なる高度化を進めるとともに、将来の需要動向、技術動向を踏まえ、時間軸を意識しながら次世代宇宙輸送システムの実現に向けた選択と集中を図る。**

## 2. 基本的な対応の考え方

### (3) 研究開発の進め方 (体制)

- 前項までに述べた、以下の取組を同時に進めるにあたり、厳しい財政状況や我が国の宇宙産業の規模を踏まえると、JAXA/民間の有機的な連携の中で共通的な技術戦略を共有し、各々が成果の最大化を図ることが重要 (= 協調領域・競争領域の区別・推進)。 政府全体の宇宙開発利用を技術で支える中核的实施機関であるJAXAが当該連携の中心となり、戦略的に研究開発をマネジメントする方策を提案する (革新的宇宙輸送技術の共創体制)。 その際、人的基盤の拡大も目的として明確に位置づけ進めていく。
  - ✓ 基幹ロケットの競争力強化、多機能化等に関する研究開発
  - ✓ 民間事業者による宇宙輸送システム開発・その支援
  - ✓ 将来の革新的宇宙輸送システムの構築に向けた研究開発

◎重要共通技術として横串の取り組みを展開
- 特に、国際市場動向として低価格競争が一段と激しくなる中、基幹ロケットのコスト競争力強化は喫緊の課題。上記取組を速やかに推進すべく、民間との共創環境の構築を図る。
- その際、よりイノベーションを目指した以下のプロセスのもと、技術ロードマップをセキュリティ・知財管理の下、参加企業と共有しながら、推進する。
  1. 背景として未知の分野 (発展によるニーズの可能性) や、必要とされている技術 (市場のニーズ) への問題点の識別
  2. 問題点を解決するためのアプローチを創出
  3. 問題点が解決されることによるメリットを実験などで検証・明確化
  4. 先行研究・既存技術・国際競争力との比較を行うことにより研究の優位性を評価

# (補足1) 革新的宇宙輸送技術の共創体制

(目的1) 我が国宇宙輸送システムの自立性確保・安全保障政策等支える活動

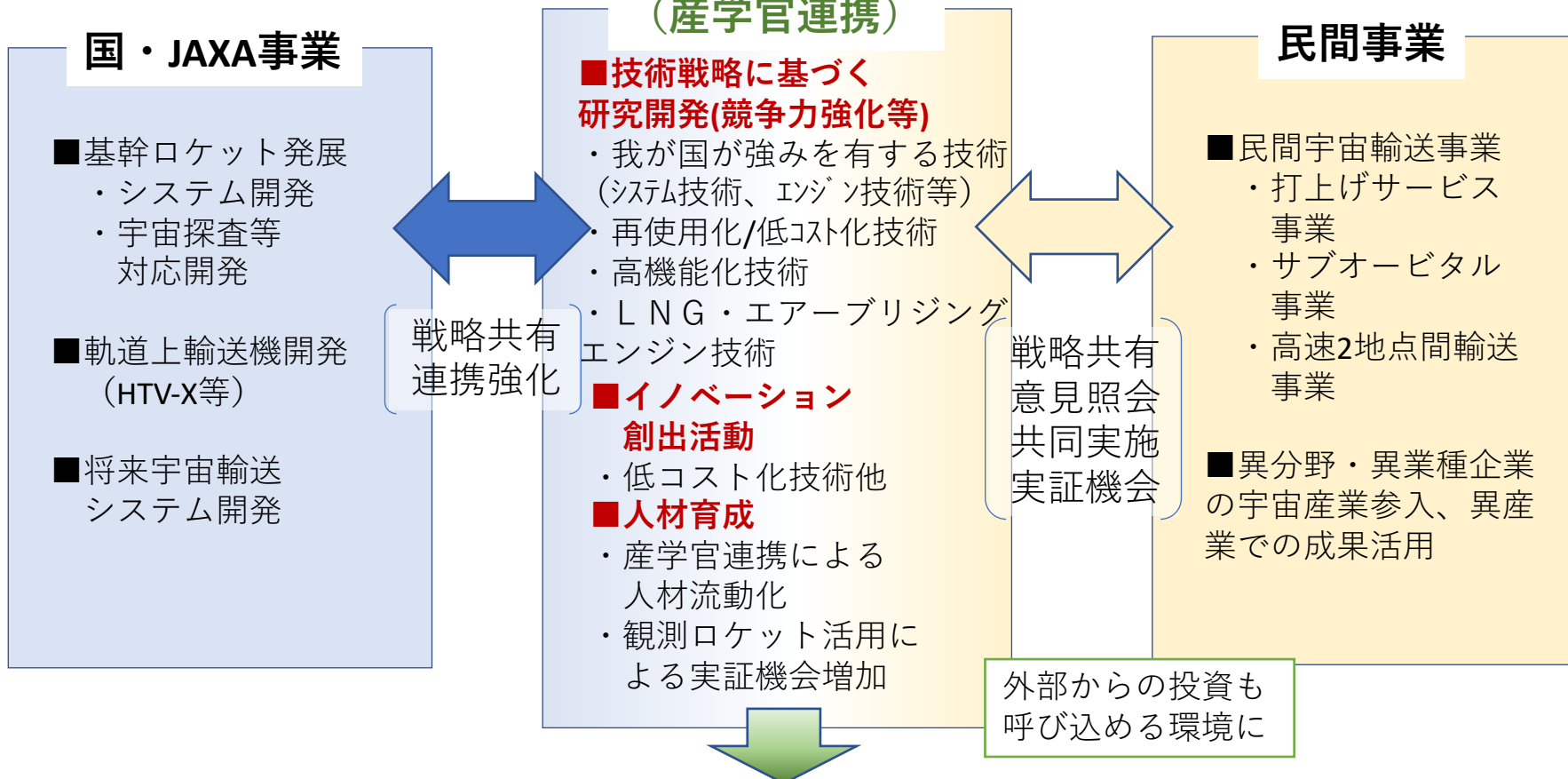
(基幹ロケット競争力強化等)

(目的2) 産業界による  
宇宙利用拡大・産業発展

## 革新的宇宙輸送技術の共創体制

<JAXAを中心とした技術マネジメント>

(産学官連携)

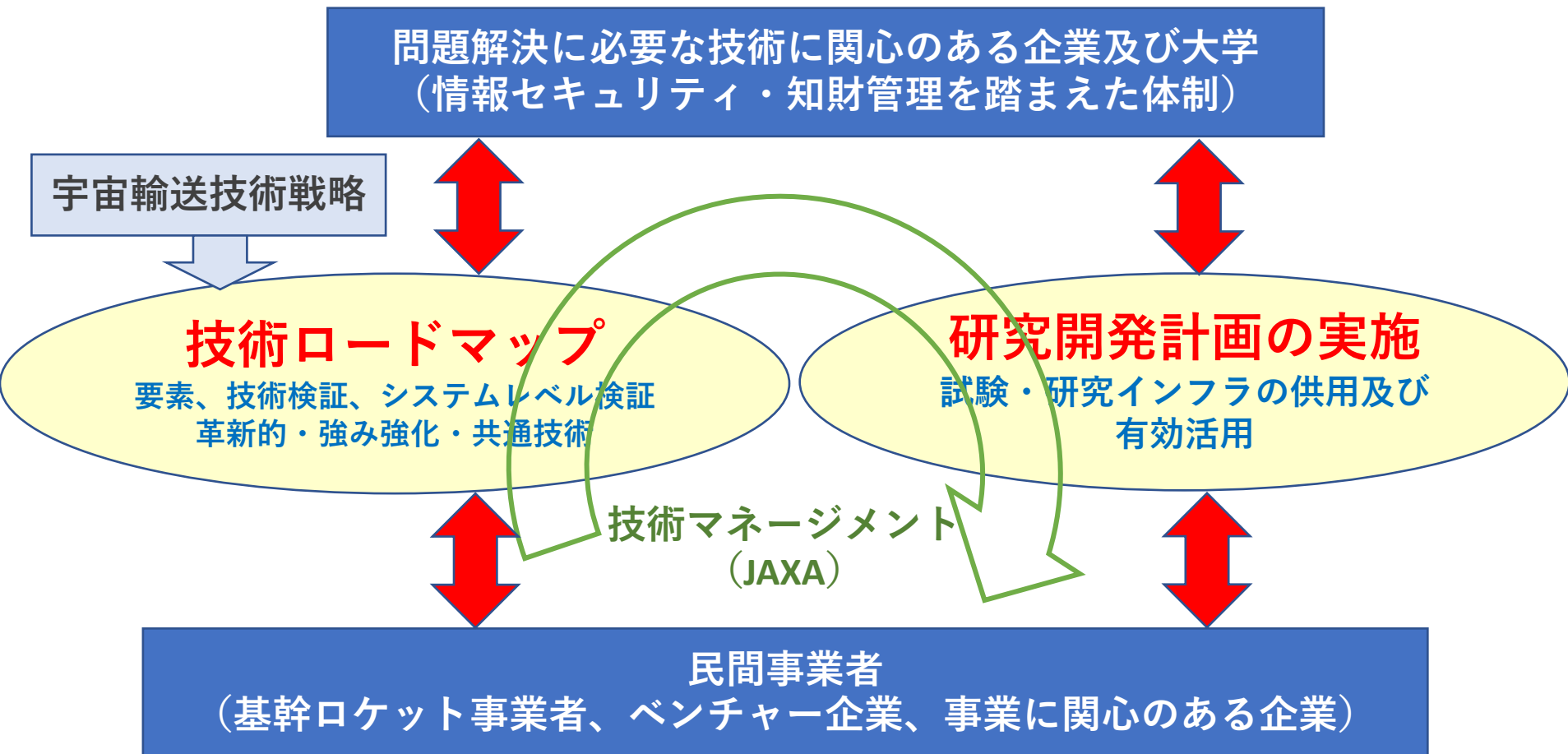


抜本的な低コストを実現した宇宙輸送システムの獲得へ (~2040年代)



# (補足2) 革新的宇宙輸送技術の共創による実現体制

- 国による方針に基づく、JAXAを中心とする技術マネジメントをベースとした参画企業、大学等との成果共有のためのグループ（産学官連携の共創体制）を構築。10年先を見据えた技術ロードマップを民間の意見も踏まえながら策定・共有。企業毎の知財及び競争力を確保しながら、競争力強化に向けた低コスト化技術、多機能化技術などの研究開発を課題毎に迅速に推進する。



# (補足3) 技術戦略の方向性 (案)

- 自立的なアクセス手段を確保し続けるため、安全保障、月探査等多様な需要への対応および継続的な国際競争力の強化に向けた現有技術の改善・高度化に関わる研究開発と、長期的な技術革新を視野に入れた、抜本的な輸送コストの低減等に資する研究開発、の**両輪**を推進。
- 4つの技術系統を機軸として、一貫性とバランスのある研究開発計画を構築。適宜、需要対応、競争力強化、産業振興への適用を見据えた技術実証・社会実装化を図りつつ、着実に技術獲得を推進。

	現有技術の改善・改良 に関わる研究開発	技術革新に向けた研究開発
低コスト化技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 再使用化技術 (大気飛行フェーズ)</li> <li>○ 高効率推進系技術 (打上単価減)</li> <li>○ 設備簡素化技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 再使用化技術 (上段フェーズ)</li> <li>○ 新材料・構造超軽量化技術</li> <li>○ エアブリージング技術大推力化</li> </ul>
多機能化技術 (ミッション多様化対応)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 上段フェーズ機能付加技術 ・ 軌道上ランデブ・推進薬補給技術</li> <li>○ 上段フェーズ長時間対応技術 ・ 推進薬マネジメント技術他</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 有人化技術</li> </ul>
デブリ化防止技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 制御再突入技術高度化 ・ 自律リエントリ・制御技術 ・ 溶融解析技術高度化</li> <li>○ 固体推進薬技術高度化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 完全再使用化技術</li> <li>○ 自律航法誘導制御技術 ・ デブリ回避航法技術 (AI活用)</li> <li>○ 自律点検・自己診断技術</li> </ul>
共通基盤技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ システム技術</li> <li>○ 自律飛行安全技術</li> <li>○ SE/デジタルイゼーション改革</li> </ul>	

# 技術戦略の方向性 (案)

## 選択と集中 (一本化)

**SSTOを実現。**また、現在の航空機以上の運用性を実現。将来の有人輸送にもつながり得る高頻度大量輸送、航空機の繰り返し運航、輸送コスト数十分の一、故障許容システム (機体喪失率 = 百万回に一回) を目指す。



## SSTO / スペースプレーン

### 完全再使用化

完全再使用技術

エアブリージング技術大推力化

再使用化技術 (上段フェーズ)

自律航法誘導制御技術

戦略技術の維持

高頻度開発・高頻度輸送技術

高効率推進系技術

### 部分再使用化

開発・製造プロセスのデジタル化

自動ヘルスマモニタリング技術

### 基幹ロケット (液体燃料・固体燃料)

制御再突入技術高度化

自律飛行安全技術

### マルチパスアプローチ

1段再使用化技術及び上段再使用化技術の獲得に伴い、**基幹ロケットの低コスト化、多機能化、デブリ対策に貢献していく**

# 国際・国内動向 (サマリ)

# 国際・国内動向変化

## ①軌道投入ロケット（部分再使用含む）

### (1) 米国

- 月探査では、SLSによる有人飛行のほか、民間ロケットによる燃料補給等の打上げを計画。
- SpaceX Falcon9/Heavyによるロケットの部分再使用が実用化。
- New Glenn, Vulcan, Electron等も部分再使用ロケットを開発中。
- SpaceXによる完全再使用ロケットStarship/Super Heavyも段階的に開発進行中。



Falcon Heavy New Glenn



Starshipプロトタイプ ©SpaceX

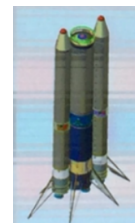
### (2) 中国

- 2017年、次世代の有人ロケット「長征7型」打上げ成功。
- SLSと同規模の超大型ロケット「長征9型」（2028年打上げ目標）
- 1段コア、固体ブースタを再利用する「長征8号」を開発中。
- 小型ロケットベンチャーも100社以上。再使用実験も成功。
- 2035年までに完全再使用輸送システムの段階的実現を計画。



長征7型

長征9型



長征8号



© CASIC  
完全再使用輸送システム

### (3) 欧州

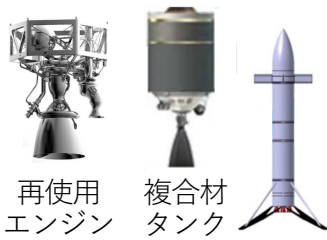
- 大・中・小ロケットを刷新し競争力強化する計画。
- 再使用エンジン等、再使用ロケットに関わる先進技術の研究開発を推進中。
- CallistoのほかThemisも計画。
- 英国Reaction Engines社が完全再使用輸送機Skylonを開発中。



Ariane64

Ariane62

VEGA-C



再使用エンジン  
Prometheus

複合材タンク  
Icarus

Themis

©CNES

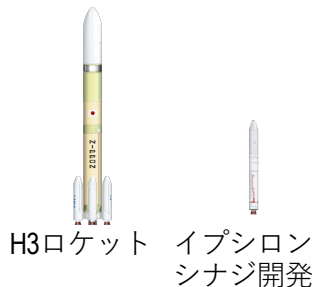


Skylon

©Reaction Engines

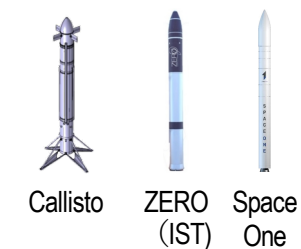
### (4) 日本

- H3ロケット、イプシロンロケットのH3とのシナジー対応開発を実施中。
- 再使用に必要な技術実証CallistoをCNES/DLRと共同開発中。
- IST、SpaceOneなどのベンチャーによる小型ロケット開発が推進。



H3ロケット

イプシロン  
シナジ開発



Callisto

ZERO  
(IST)

Space  
One

# 国際・国内動向変化

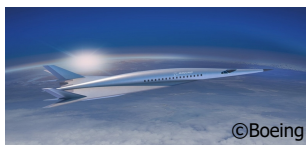
## ②エアブリージングエンジン搭載の単/二段式スペースプレーン

### (1) 米国

- Robust Scramjet計画で、徐々に寸法・機能を付加しながら、段階に応じた社会実装（安全保障目的中心）を推進。
- ターボジェットとスクラムジェットを組み合わせた複合エンジンの極超音速機を開発中。



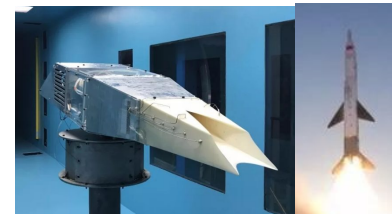
©Lockheed Martin  
極超音速偵察機SR-72



©Boeing  
Boeing極超音速旅客機

### (2) 中国

- 国有企業、大学において、エアブリージングエンジンおよび輸送システムの開発が進められている模様。



© Space Transportation



light.com  
© CASIC  
再使用宇宙輸送機Tengyun



XTER (廈門大学)

© CASIC

Turbo-aided Rocket-augmented Ram/scramjet Engine (TRRE)

### (3) 欧州

- 2008年以降、EC及び欧州企業16社の共同出資により、マッハ数5及び8の極超音速旅客機の研究開発「LAPCAT II」が推進中。
- LAPCAT-A2はマッハ5で巡行する300人乗りの極超音速旅客機。Sylonの予冷ターボジェット複合サイクルSABREの派生型エンジンScimitarを搭載予定。



© EC  
LAPCAT-A2



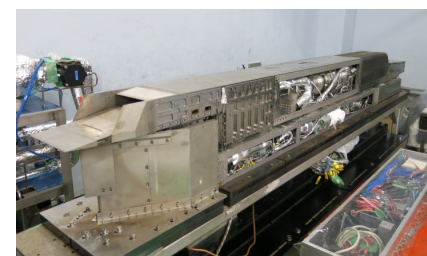
© EC  
LAPCAT-MR1

### (4) 日本

- ロケット複合エンジン (RBCC) と極超音速予冷ターボジェット (PCTJ) の2種類のエンジンの研究を推進。



航空装備研究所間の研究協力により開発予定  
RBCCシステム実証構想



極超音速予冷ターボジェット

# 再使用技術の取組意義と今後（技術開発の観点）

- 精度の高い飛行を実現する誘導制御技術、幅広い機体挙動に対する制御を可能にする推進薬マネジメント技術、再使用運用に必須のエンジン（ヘルスマネジメント）技術、の3つは将来輸送の技術ロードマップにおいてコアとなる技術。これまでも様々なプロジェクトを通じ発展させてきた強みを有する技術領域。
- 当該3領域の技術について、大気上層・超音速域といった広範な領域を対象として部分再使用化としてのシステム飛行実証を国際協力枠組みにて効率的に実施し、以降も将来に向けて着実に高度化を図る。

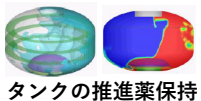
## ●JAXAが強みを有する技術領域（下記は実績）

### 航法・誘導制御技術



HTV D-SEND

### 推進薬マネジメント技術



タンクの推進薬保持



H-IIA高度化 (ロケット)

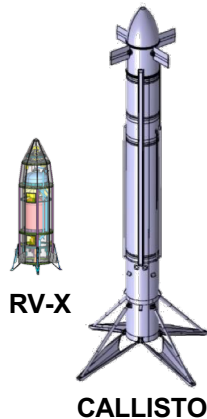
### エンジン技術



LE-5B3



LE-9



RV-X

CALLISTO



舵面による超音速誘導制御

舵面+エンジンによる極超音速誘導制御

速い姿勢変更による無効推進薬量削減

荷重による負荷を中心とした再整備

荷重+熱による負荷を中心とした再整備

宇宙輸送技術戦略をベースとした研究開発の取り組み（上記以外）

# 再使用技術の取組意義と今後（基盤の観点）

## ●我が国の自律性確保、産業競争力強化の観点

- 飛行済みの機体を市場に再投入できれば、製造能力が限られていても、今後期待される宇宙利用拡大に対応できる。
- 日本のロケット製造能力・産業規模を大幅に拡大していくことは容易ではないが、そのような日本に対して打上げ需要が拡大すれば再使用システムは効果的。
- 特に、再使用1段であれば、大量の需要がなくても再使用化は成立し、需要増加に合わせて再使用回数を増やすことができる。

### 再使用1段の概念・使い方

- 再使用のための最低限の装備を追加した**安価な機体**
  - 1回目の打上げで再使用部分の製造費を回収し、2回目以降の打上げ価格を下げる
  - 打上げ需要が限られる場合、再使用回数を少なくし、新規製造数を確保
  - 宇宙利用の拡大による需要増加に合わせて、再使用回数を多くする
- 現在のところ、1段再使用化でどのくらいコスト削減ができるかは検証が必要であるが、有意な低コスト化が実現できれば、低価格による需要増、需要増（高頻度化）によるさらなる低コスト化（1回あたりの固定費の減少等）という好循環が期待できる。



宇宙輸送システム  
長期ビジョン  
(抜粋)

# (参考) 「宇宙輸送システム長期ビジョン」について (抜粋)

(平成26年4月宇宙政策委員会)

## ① 長期ビジョン策定の目的

- 新たな宇宙利用の姿を示し、そこから要求される技術的な目標を設定して、**将来宇宙輸送システムの発展過程とこれを実現するためのプロセスを示すことで、長期的な観点からの我が国の宇宙輸送システムの在り方を明らかにすること。**(検討対象は、2040年以降において実現が期待される宇宙輸送システム手段のあるべき姿)

## ② 検討の前提

- **新たな宇宙利用の姿**とは、以下を想定したもの。
  - ✓ 商業宇宙輸送スタディ (CSTS)では、**宇宙環境を利用した製造、一般人による滞在型の宇宙旅行や物資運搬等の輸送サービス、エンターテインメント、デブリ対策、宇宙医療施設、資源採掘及びエネルギー (宇宙太陽光発電) 等の新たな形態の宇宙利用が大幅に拡大すると想定。**
  - ✓ このような新たな宇宙利用を実現するためには、**年間数万トン規模の宇宙輸送が必要。**
  - ✓ 新たな宇宙利用が実現した場合、**国が宇宙活動を主導する現在の世界から、民間が宇宙活動を主導する世界へと転換**していく。
  - ✓ また、宇宙輸送は、従来のように特定のミッションに限定した特別な輸送手段ではなく、**鉄道や航空機のようなインフラとして当たり前**に存在し、**誰でも自由に利用できる世界。**
  - ✓ **2030年代までは使い切り型ロケットが低軌道への主な輸送手段と想定し、その間に再使用型宇宙輸送システムの実用化に向けた研究開発が進展し、基幹ロケットの低コスト化に向けた部分再使用化等が進むと想定。**

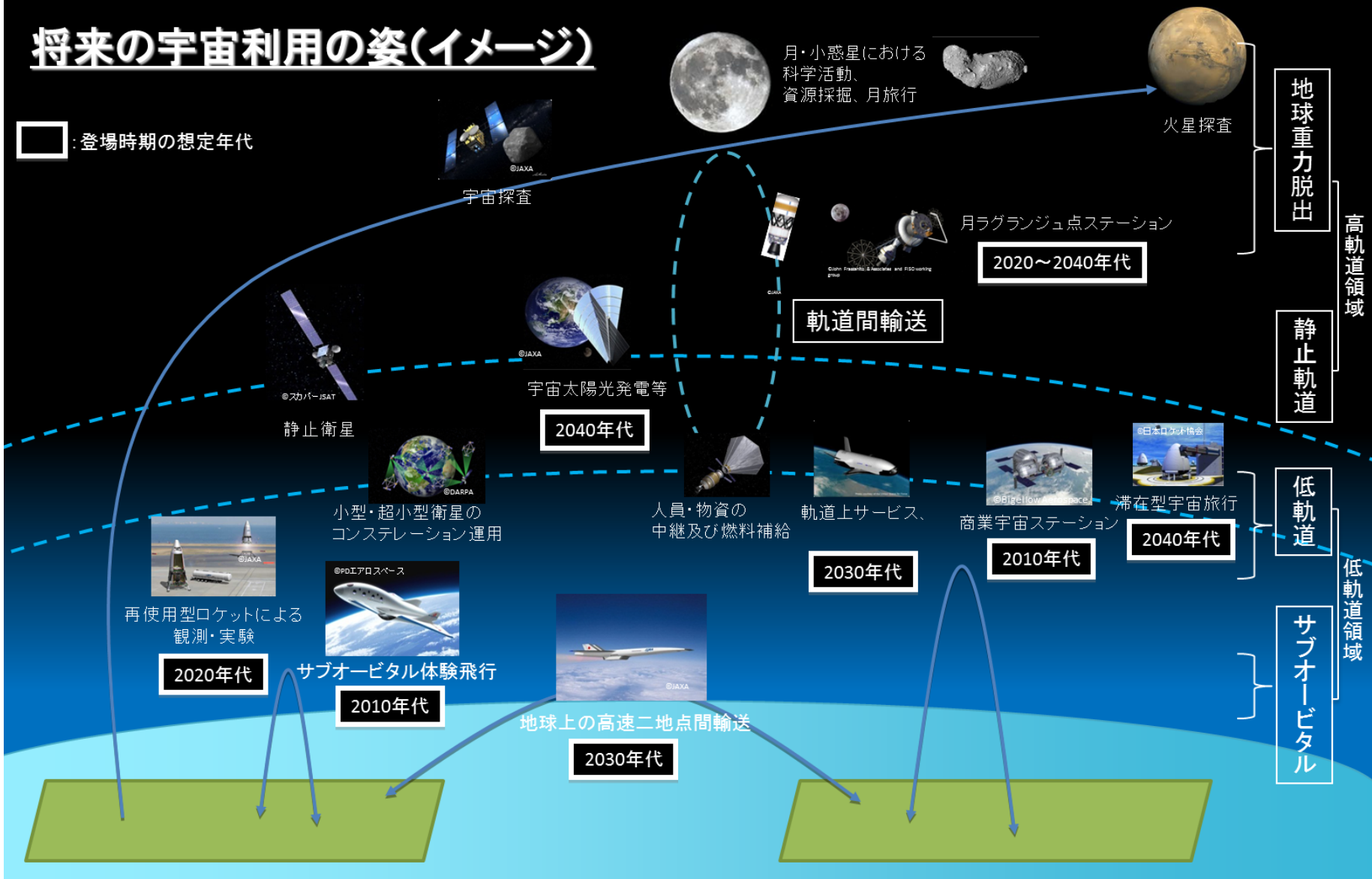
## ③ 将来宇宙輸送システムの実現に向けた取組の意義

- ◇ 長期的な自律性の確保
- ◇ 新たな飛躍的な宇宙利用の拡大と宇宙産業の発展
- ◇ 先端技術の獲得
- ◇ 国際優位性の確保
- ◇ 人材育成
- ◇ 有人宇宙輸送への発展性

宇宙輸送コストの大幅な低減により、新たな宇宙利用の出現・拡大が考えられる。サブオービタル体験飛行、二地点間高速輸送、滞在型宇宙旅行、軌道上サービス、大規模構造物(SSPS等)建設、資源採掘など。

## 将来の宇宙利用の姿(イメージ)

□: 登場時期の想定年代



(出典) 宇宙輸送システム長期ビジョン (宇宙政策委員会)

# 低軌道領域の将来宇宙輸送システムの発展経路

材料技術の革新による単段式再使用型ロケット、エンジン技術の革新によるエアブリージングエンジン搭載単段式スペースプレーン、両者の技術を活用した二段式スペースプレーンの3つの発展経路（パス）を想定。再使用型宇宙輸送システムの発展経路は、複数のパスが考えられるが、適切な時期に適切なパスを選択する必要がある。ただし、どのパスにおいても共通に必要な技術があることや、各パスが進展する途上で、実用化できるシステムが生まれる可能性もあることから、開発の初期の段階では、各パスの発展可能性を追求することが必要。

