

革新的将来宇宙輸送システム実現に向けたロードマップ検討会 中間取りまとめ

令和3年6月22日
研究開発局
宇宙開発利用課

はじめに

今日、人工衛星による宇宙開発利用は、気象観測、測位、衛星通信の活動を支え、国民生活や社会経済・安全保障の活動を支えるための不可欠のインフラとなっている。

それらの人工衛星を宇宙空間に運搬する宇宙輸送システムは、宇宙へアクセスするための根幹のインフラとして、その自立性を確保することが我が国の宇宙政策の基本となっている。

他方、近年スペースX等が宇宙輸送市場を席捲する中で我が国においても国際的な民間市場で価格競争力のある宇宙輸送システムを作ることができなければ、国はコストの高いロケットを調達して打上げを続けることになるか、あるいは、我が国の宇宙輸送システムが世界の民間市場より退出させられることになり、我が国独自の打上げ手段を失い、自立的に宇宙にアクセスできなくなる懸念がある。

このような状況認識、問題意識等も踏まえ、文部科学省宇宙開発利用部会において将来宇宙輸送システム調査検討小委員会が設置され、令和2年1月から5月に掛けて検討が行われた。

そこでの検討の結果、2040年代前半までに我が国の宇宙輸送システムの自立性確保、国際的競争力確保及び産業発展を目指し、新たな宇宙輸送市場の形成・獲得に向け、抜本的な低コスト化等も含めて技術の革新による革新的将来宇宙輸送システムを実現することとされた。また、そのための段階的な計画・道筋（ロードマップ）の策定に当たっての基本的な考え方が示された。

上記の考え方を受け、本検討会は、令和2年11月より議論を開始した。

ロードマップの目標は、我が国の宇宙輸送システムが継続的に自立性を確保した上で、遅くとも2040年代前半までに抜本的な低コスト化等も含めて革新的技術により革新的将来宇宙輸送システムを実現し、我が国の民間事業者が主体的に事業を展開することで、自立した宇宙開発利用を飛躍的に拡大させるとともに、宇宙輸送をはじめとする宇宙産業を我が国の経済社会を支える主要産業の一つとするものである。

また、ロードマップの内容は、2040年代前半の革新的将来宇宙輸送システム実現のために、2030年頃の技術実証、その後の実用システム開発と事業化に向けて、今後10年から20年にわたり、可能な限り、研究開発から実用化までの道

筋とその実現方法を示すものとする。

抜本的な低コスト化等を含めた革新的技術の開発にあたっては、官民の英知を結集し、双方の適切な役割分担の下で共創体制を構築することが必要である。

近年、宇宙分野においては、新たな民間のプレイヤーが現れていることも踏まえ、民間企業の力を活用しながら、官民で革新的将来宇宙輸送システムを開発することが求められている。

本検討会ではまず、2040 年頃の社会ビジョンを示し、それから想定される宇宙でのミッションを軌道別、輸送対象別、官民別に整理した。また、2040 年頃の民間宇宙市場の試算を行い、将来宇宙輸送システムで想定されるミッションと飛行形態との適合性について検討した。更に市場規模が大きく民間が関心を持つミッションにも適用できる将来宇宙輸送システムについて民間企業の参画を促す官民の開発体制等、2040 年代前半までのロードマップについて検討を行った。

1. 抜本的な低コスト化を中心とした将来宇宙輸送システム開発を日本が行う意義

(1) 宇宙輸送システムに係る国内外の動向

① 国内における宇宙輸送システム研究開発と運用

我が国では、これまで自立性確保と国際的競争力強化を目指して、H-IIA/B ロケット・イプシロンロケットの開発・運用、イプシロンシナジー対応開発、H3 ロケットの開発等を我が国の基幹ロケットとして推進してきた。

液体燃料ロケットについては、2000 年まで大型ロケットである H-II ロケットとして高性能液体水素エンジン等の基幹技術の国産化、エンジンの大型化を進め、2001 年から H-IIA ロケットの開発・運用を行っている。2007 年の H-IIA ロケット 13 号機からは、民間事業者の主体的役割を重視し、打上げサービス事業を民間事業者が担っている。それ以降も国としても継続的な改良を実施し、現在までの打上げ成功率は 98%と世界最高水準である。

また、2009 年から 2020 年の間には国際宇宙ステーション（ISS）への必要な物資輸送のため、宇宙ステーション補給機「こうのとり」を打ち上げる H-IIB ロケットの運用を行い、当該ロケットでの打上げ成功率は 100%となっている。

加えて次世代の新型基幹ロケットである H3 ロケットの開発を進めてきており、2021、2022 年度にわたって試験機の打上げを実施し、その後民間事業者主体による打上げサービス事業に移行していくこととしている。

固体燃料ロケットについては、科学目的として我が国独自の固体ロケットシステム技術を発展させてきた。我が国初の人工衛星「おおすみ」を50年前に軌道上へ打ち上げたのも固体燃料ロケットL（ラムダ）-4Sロケットであり、その後科学衛星打上げ用ロケットとして、世界最大級の固体燃料ロケットであるM（ミュー）-Vロケットが2006年まで運用された。

戦略的技術であるこの固体ロケットシステム技術とH-IIAロケットの固体ロケットブースター技術を統合して開発され、低コストで運用性を向上させたものが現在のイプシロンロケットであり、これも基幹ロケットとして位置づけられ、これまで4機打上げに成功している。

現在、イプシロンロケットは民間事業者主体による打上げサービス事業に移行しつつあり、H3ロケットの固体ロケットブースター技術との相乗効果（シナジー）を目指してイプシロンSロケットとして開発を進めている。

一方、海外では、ロケット第1段の再使用による価格競争力強化を目指した取組が進められており、我が国でもそのような国際動向を踏まえ、第1段再使用型宇宙輸送技術の欧州の宇宙機関との国際共同実証実験に向けた取組を国として推進している。

これらを通じて、我が国の宇宙輸送システムを担う研究者・技術者等の育成・能力向上を通じた人的基盤の強化、サプライチェーン、熟練技能者の技術継承等の関連産業基盤の育成・成熟、射場・試験設備基盤の構築が行われ、これを維持してきた。過去のロケット開発は、国主導により行われてきたが、国内における技術・産業・人的基盤の成熟により、H3ロケットの開発等においては、民間事業者の役割が増してきている。

国内においても民間宇宙市場獲得に向けて、民間事業者主導による小型ロケットによる打上げサービスや有翼サブオービタル飛行ビジネス等、様々な宇宙輸送サービスの実現に向けた取組が活発化している¹。

② 国外の宇宙輸送システムの動向

宇宙分野の先進諸国は、引き続き、基幹ロケットシステムの維持・発展に注力している。

米国は、月探査用の大型ロケットSLS（Space Launch System）の開発を推進するとともに、既存のISSへの物資・人員輸送については、民間事業者の主体性を重視して宇宙輸送システムの開発・運用に対する支援を行っている。

欧州は、基幹ロケットであるアリアン5の運用を行うとともに、次期基幹ロケットとしてアリアン6の開発を推進している。

¹ インターステラテクノロジズ社、スペースワン社による小型ロケットや、PD エアロスペース社、スペースウォーカー社によるサブオービタル飛行等。

ロシア、中国は、基幹となる大型主力ロケットの研究開発と運用を通じて自立性の維持・発展を推進している。

ISS に対する有人宇宙輸送システムは、ロシアのソユーズロケットに加え、米国の民間事業者であるスペースX社のファルコン9 ロケットによるクルードラゴンの打上げ運用が開始されている。

中国では、長征ロケットによる有人宇宙輸送システムを実現しているが、さらに将来の有人月探査に向けたロケットの開発を推進している。

米国、欧州、中国、インドでは大型ロケットだけでなく、小型ロケットシステムの開発・運用も活発に行われており、これらの取組を通じて技術・産業基盤を支える人材・設備の維持・更新が図られている。

これらの動向も相まって、スペースX社のような新興民間事業者による宇宙輸送サービスが発展しており、また、当該民間事業者自らの巨大資本や政府支援等を背景に、その低価格戦略で打上げサービスの国際競争は激化している。

特に海外の民間宇宙市場では、小型メガコンステレーションによる地球規模の通信サービス網の構築、あるいは宇宙旅行事業の提供において宇宙輸送システムがそれぞれの事業の一部として位置づけられている等、市場の形成と一体化した宇宙輸送システムの開発・運用が進行している。

また、各国においては、宇宙輸送システム技術基盤の充実・強化と将来宇宙市場の獲得に向けて、新型ロケットエンジン技術、エアブリージングエンジン技術、材料技術、製造技術等の最先端技術開発を踏まえながら、再使用型宇宙輸送システムを含む将来宇宙輸送システムの実現に向けた様々な研究開発が積極的に推し進められている。

③ 宇宙利用の拡大及び将来宇宙輸送ビジネスの可能性

近年、月以遠探査までを見据えた深宇宙探査といった宇宙開発利用の国際的な広がりや、民間事業者による小型衛星を用いたメガコンステレーション、宇宙旅行、さらに、二地点間高速輸送（P2P: Point to Point）等の様々な宇宙輸送ビジネスの可能性が出現している。

これらは、将来大きな需要を生み出し、更なる宇宙開発利用の拡大につながる可能性がある。

また、低軌道領域への打上げ需要が民間事業者による活動の活性化により増大してきており、この低軌道領域への打上げ拡大傾向は、打上げ事業環境を改善する方向にあると考えられる。

一方で、スペースデブリといった宇宙環境の悪化も進行しており、その低減に向けた取組が国際的に検討される等、世界的に宇宙輸送システムに関する周辺環境は大きく変化している。

(2) 革新的将来宇宙輸送システムの開発に挑む意義、必要性

スペースX社等の台頭により、国際的な民間市場での競争は激化している。

このような中で我が国において抜本的な低コスト化を図り民間市場でコスト競争力のあるロケットを作ることができなければ、市場発展性の少ない官ミッションのみに対応したコストの高いロケットを国は調達して打上げを続けることになる。あるいは我が国の宇宙輸送システムが民間市場から退出させられることにより、我が国独自の打上げ手段を失い、自立的に宇宙にアクセスすることができなくなり、国益、経済的な利益が失われる可能性がある。

また、抜本的な低コスト化が実現することにより、宇宙へのアクセスが容易になれば、今以上に宇宙のプレイヤーが拡大し、宇宙利用の幅が拡大することが見込まれる。

一方、従来の延長線上の研究開発だけでは、抜本的な低コスト化を実現することは容易ではない。機体の量産効果や、製造ラインの共通化等により低コスト化を実現するため、市場規模が大きく民間が関心を持つミッションにも適用できる革新的将来宇宙輸送システムの開発を国と民間が連携して取り組む必要がある。

2. 2040 年代前半の社会ビジョンを踏まえての 2040 年代前半に想定される宇宙輸送ミッション

(1) 2040 年代前半の社会ビジョン

我が国で 2040 年代までに生じる大きな社会様相の変化として、人口の減少・高齢化の進行等が見込まれている。特に人口においては、2040 年時点では、2020 年時点より総人口が 13%減少（1 億 2600 万人⇒1 億 1100 万人）、生産年齢人口が 25%減（7500 万人⇒6000 万人）となり、65 才以上の人口は総人口の 35%超になる見込みである（国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口（平成 29 年推計）」）。

他方、世界の人口は、現在の約 78 億人が 92 億人に増加する見込み（国際連合 world population prospect 2019）であり、日本の人口は減少する一方で、世界の人口は増加していくことから、この人口拡大に伴う、経済的発展、新たな民間サービスが現れてくることに留意すべきである。

2040 年の社会イメージについては、文部科学省科学技術・学術政策研究所が第 11 回「科学技術予測調査」を実施している。当該調査は、科学技術の発展による社会の未来像を描く調査であり、第 11 回調査は①科学技術や社会のトレン

ド把握（スキャニング法）、②社会の未来像検討（ビジョニング法）、③科学技術の未来像検討（デルファイ法）、④科学技術の発展による社会の未来像検討（シナリオ法）の4手法を組み合わせて実施している。

宇宙に関連のある、可能性が高い予測調査としては、インフラとしての宇宙（地球観測・測位・通信等）を活用したアプリケーションとして、準天頂・地球観測衛星を活用したリアルタイムの災害リスク評価システム、IoT を利用した精密農業の普及、場所を限定せず操作できる自動運転システム等があり、宇宙が生活、産業を支えるインフラとしてますます活用されていることが予測されている。

更に世界を取り巻く変化としては、2050 年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、カーボンニュートラル、脱炭素社会への対応がある。

我が国をはじめ主要国において、2050 年頃のカーボンニュートラルを表明する国はあるが、世界的な人口が引き続き増加し、エネルギーの消費量が上昇する中、2050 年のカーボンニュートラルの達成は地上のみを考慮しては容易な課題ではない。今後、宇宙輸送システムが抜本的に低コスト化し、宇宙利用が拡大することにより、カーボンニュートラルの達成に貢献する技術革新が生まれることが期待できる。

（2）宇宙開発利用ミッション

2040 年頃の官ミッションも含め想定されるミッション及び規模を紹介する。官ミッションについては、現在国内では年間3機程度の大型ロケット打上げが行われているが、今後宇宙科学探査や深宇宙探査等の進展や、新たな取り組みとして、スペースデブリ対策が開始される等の軌道上サービスの広がりが期待され、これらの官ミッションの需要が高まっていくことが想定される。

以降、各宇宙利用ミッションでの市場規模予測を示すが、これらの数値は Northern Sky Research 社が 2019 年／2020 年に実施した調査結果による 2030 年迄の各宇宙利用ミッションでの累計市場規模予測データを活用し、10 年間で市場拡大率が同じであると仮定して、2040 年時点のグローバルな市場規模を予測したものである。

1）サブオービタル軌道

●二地点間高速輸送

2040 年に向けて、高頻度輸送を実現するために、最も輸送量が見込める市場の1つである。

現時点で市場が創出されていないため、2040 年の市場予測は困難であるが、既存の旅客航空機需要の一部が代替されると仮定して概算すると、我が国発着ベースで年間 5.2 兆円程度※の市場規模となる可能性がある。

※2040 年に向けての航空需要の伸び、二地点間高速輸送に置き換わる範囲等の一定の前提をおいた試算に基づく。

●宇宙旅行

現在、世界的に民間によるサブオービタル宇宙旅行の事業創出に向けた取組が盛んであるが、低軌道宇宙旅行も今後の成長が期待される市場である。

Northern Sky Research 社による 2030 年の需要予測では、サブオービタル軌道での宇宙旅行及び地球低軌道（ISS 活用等）への宇宙旅行を合わせて、約 3,400 億円の市場となることが見込まれる。

宇宙輸送市場全体が 2018～2030 年と同様に、2030～2040 年においても年間 10%で成長すると仮定すると、宇宙旅行市場は、サブオービタル軌道・地球低軌道を併せて、8,800 億円程度の市場となることが見込まれる。

なお、旅行費用及び 1 フライトあたりの席数が 2030 年から変わらない、という前提に立つと、サブオービタル軌道での宇宙旅行で年間 8,800 フライト、地球低軌道への宇宙旅行で年間 21 フライトという市場概況となる。

●微小重力環境実験

現在、航空機あるいは観測ロケットにより微小重力環境で特徴のある物質、材料等の製造による新市場は見込まれるが、2040 年頃の市場規模を予測することは現時点では困難である。

2) 低・静止軌道

●低軌道における通信・地球観測・メガコンステレーション等

メガコンステレーションを筆頭に、今後成長が期待される市場である。Northern Sky Research 社による 2030 年の需要予測では、年間 2,900 億円となっているが、宇宙輸送市場全体が 2018～2030 年と同様に、2030～2040 年においても年間 10%で成長すると仮定すると、低軌道市場は、グローバルで約 1 兆円の市場規模となることが見込まれる。

●静止軌道における通信・宇宙状況把握（SSA）・地球観測

Northern Sky Research 社による 2030 年の需要予測から、静止軌道における通信・宇宙状況把握・地球観測等のグローバル市場は年間 4,000～5,000 億円程度の見込みである。

一方、静止軌道市場は、2020 年代において、凡そ横ばいの見込みであり、その傾向は 2030 年代も継続されると予想される。

●ISS活用

2025 年以降の ISS を含む地球低軌道活動については、各国の検討状況も注視しつつ、これまでの軌道上技術実証、科学実験に加えて、将来の宇宙探査を視野に入れた高度な戦略的技術の実証や民間主体による研究開発利用等への利用拡大の状況等を踏まえて、国／JAXA にてその在り方について検討中である。また、民間の新たな構想等についても考えられているが利用規模の予測は現時点では困難である。

●軌道上サービス

デブリ除去、衛星デオービット、衛星検査ロボティクス、衛星寿命延長、衛星燃料補給等の軌道上サービス市場は、今後の成長が見込まれる市場である。一部企業による各種軌道上実証実験は開始されているが、現時点では、市場がまだ十分に形成されておらず、2040 年頃の市場規模を予測することは現時点では困難である。

また、「宇宙太陽光発電」についても、今後の研究開発の進展により、我が国のエネルギー政策に貢献しうる技術ではあるが、実用化は 2040 年代後半以降となる見込み（経済産業省「宇宙太陽光発電システム研究開発ロードマップについて」（2017 年 3 月））であり、現時点でその市場規模を予測することは困難である。

●安全保障、防災利用等

安全保障や防災利用等においても、衛星データ利用の需要の増大等により、打上げの需要が高まってくることが考えられる。

2040 年における利用規模は不明であるが、国の存続、国民生活にとって非常に影響が大きい分野であり、民間によって代替される分野でもないことから低・静止軌道にかけて官ミッションとして確実に実施する必要がある、現時点で予測は困難であるが、利用規模が増加することが想定される。

3) 深宇宙

●宇宙科学・探査及びアルテミス計画／国際協力

宇宙科学・探査及び国際協力に基づくアルテミス計画等の深宇宙探査については、我が国の国際社会におけるプレゼンス向上等に貢献するものであり、官ミッションとして確実に実施する必要がある。

今後も月・月以遠（火星等）の探査活動に向けて、需要が高まってくることが考えられる。

一方、2040 年において、どのような利用規模となっているかは、今後の科学ミッションの成果や国際情勢にもよることから、現時点で予測は困難であるが、利用規模が増加することが想定される。

●月経済圏

2040 年に向けて、高頻度輸送を実現するために、最も輸送量が見込める市場の 1 つである。

2040 年頃の月面においては、1,000 人が居住し、年間 10,000 人が月面を訪問するという検討もある。（第 4 回ロードマップ検討会での iSpace 社発表内容による）。

2040 年の市場規模を予測することは現時点では困難であるが、常時 7 人程度の滞在である ISS に比して、設備等を含め 100 倍近くの輸送量が求められると仮定すると、2 兆円程度の市場規模となる可能性がある（ISS への輸送量は年間 15～20t、月面への輸送コストを 10 億円／t と仮定）。

以上の（１）～（３）の行き先別の 2040 年頃の宇宙開発利用の状況予測を表 1 にまとめる。

表 1 2040 年頃の宇宙開発利用の状況予測（赤字は主に官ミッション）

		行き先		
		サブオービタル軌道	低・静止軌道	深宇宙
輸 送 対 象	有 人	二地点間高速輸送 宇宙旅行	宇宙旅行	月経済圏 アルテミス計画 (国際協力)
	無 人	二地点間高速輸送 微小重力環境実験	通信メガコンステ 地球観測 ISS 活用※ 軌道上サービス 安全保障、防災利用等	

※2025 年以降の ISS を含む地球低軌道活動については、各国の検討状況も注視しつつ、その在り方について国／JAXA にて検討中。

3. 将来宇宙輸送システムのミッションと飛行形態との適合性

前章において示されたミッションに基づき、将来の宇宙利用市場の要求を整理すると以下となる。

- (1) 2030 年初頭までの宇宙利用市場の主体は、地球周回軌道及びサブオービタル軌道での地球観測、通信インフラ及び宇宙旅行が想定される。
- (2) 例えば、地球周回軌道には、年間千機程度のロケットの打上げ、また、サブオービタル軌道での宇宙旅行では年間 3,400 回程度のフライトが試算される（2030 年初頭時点を想定）。
- (3) その後 2040 年代に移行するに従い、国際協力での月探査から月経済圏の拡大あるいは宇宙等を利用した旅客輸送を伴う二地点間高速輸送の拡大が想定される。
- (4) 以上の想定される多数の打上げ需要に対応し、利用可能性を広げつつ、限られた予算の中でその需要に我が国として対応していくためには、海外の競合メーカーに対して市場で優位に立てるための宇宙輸送システムの抜本的な低コスト化が必須となる。

これらの要求を満足する将来宇宙輸送システムの要件としては

- ① 抜本的な低コスト化を実現する総合的システム（宇宙輸送機、射点／射場設備、飛行安全運用、再使用の場合は回収・再打上げ整備設備含む）であること。
- ② 宇宙輸送システムの飛行形態としては、垂直打上げ形態及び水平打上げ形態等が考えられる。将来市場を考慮した上で、システムのメリットとデメリットを比較すると、すべてのミッションに対応するためには双方の形態が必要になる。実現する宇宙輸送システムは一形態か、複数形態かは今後の市場動向、費用対効果から議論する必要がある、複数形態になった場合でもコスト低減の恩恵が十分に得られる選択が重要である。
- ③ 実現する宇宙輸送システムは、将来的な民間市場から大きな需要が想定され、民間の収益が期待されることから、それらも考慮し、官民共同で開発されることが必要である。

これらの要件を考慮して将来宇宙輸送システムを構想する場合、いくつかの飛行形態が考えられる。

前述のように、一つ目は H-IIA ロケット等と同じような垂直に打ち上げられて軌道上に物資等を輸送する「**ロケット形態**」(システムA等)である。

この形態には従来のように使い切りのケース及び1段目の地上回収／再使用のケースが含まれる。

二つ目は航空機のように水平に離陸／上昇して軌道上に物資等を輸送する「**有翼形態**」(システムB等)である。ミッション完了後は地上に帰還し、再使用を前提としたシステムである。

更にこの2形態の派生型がいくつか存在するが、ここでは早期実現性の観点から三つ目として考えられる形態は、システムA等を発展させて2段目を有翼化して地上に帰還させて再使用する「**併用形態**」(システムC等)である。

これらはあくまでも構想案であり、将来の市場ニーズに基づく宇宙輸送システム検討／技術ロードマップ検討の中で、詳細に議論され、検討されていくものであるが、いずれの形態においても、機体の「部分的あるいは完全再使用化」が必須と考えられる。

機体の「再使用化」について、その意義は、宇宙輸送システムの抜本的な低コスト化の実現のためだけに限らず、高頻度の打上げに対応できること、宇宙空間での残機体のデブリ化防止を実現できることでもある。

上記の3つの飛行形態の特徴について表2に記載する。

表2 将来宇宙輸送システム飛行形態例の特徴比較

システム	システムA: ロケット形態(2段式)	システムB: 有翼形態(2段式)	システムC: 併用形態(2段式)
機体イメージ			
	●システムA(2段式) ロケット形態(1段目再使用)	●システムB(2段式) 有翼形態(1段目再使用)	●システムC(2段式) 併用形態 (ロケット+2段目有翼) (1/2段目再使用)
メリット	・サブオービタルを含む大部分のミッションに対応可能(深宇宙への輸送が可能) ・搭載輸送能力が大きい(大型化が相対的に容易) ・開発の知見/関連技術の蓄積がある ・有人輸送の実現可能性あり(有人カプセル輸送など海外での実績あり)	・2地点間高速輸送に最適 ・空港など地上インフラの共用が可能 ・推進剤(酸化剤)を減らせるため、機体軽量化が可能 ・有人輸送の実現可能性あり(航空機運用技術が使用できる)	・2地点間高速輸送、サブオービタルを含むあらゆるミッションに対応可能(深宇宙への輸送が可能) ・ロケット部分は開発の知見/関連技術の蓄積がある(上段部分は技術成熟度低) ・有人輸送の実現可能性あり
デメリット	・射点が限定的 ・機体の軽量化、エンジン高性能化が必要 ・海上回収などの新規設備・維持 ・2地点間高速輸送には対応できない	・単独での大型構造物の軌道上輸送や深宇宙への輸送は困難(現実的な機体サイズを超え、長距離の発着場が必要になる) ・現時点で、主要技術(エンジン・熱構造)の技術成熟度が低い(航空分野との融合が必要)	・搭載輸送能力がロケットタイプに比べ相対的に低い(但し、大型化が相対的に容易) ・現時点で、上段再使用に係る主要技術(軽量熱構造、再突入誘導)の技術成熟度が低い

これらの3つの飛行形態のメリット及びデメリットを要約すると以下の通りとなる。

●「ロケット形態」(システムA等)は将来の宇宙利用市場(サブオービタル宇宙旅行ミッションを含めて)の大部分の要求に対応できる形態であり、また、現在の我が国の宇宙輸送システムである H-IIA/B、H3 ロケットの開発方式/要素技術の蓄積を最大限利用できるものである。特に大量物資の軌道上輸送に適していると言える。

また、将来、宇宙輸送システム打上げ需要が増大してくると、従来型の使い切りロケットでは国内でのロケット製造能力が打上げ回数の律速となるが、1段目の再使用化ができるようになると、打上げ能力は低下するものの、打上げ回数増加への対応も可能となる。

但し、旅客飛行を伴う二地点間高速輸送等用途への対応には２段目（上段）の再使用化等の技術課題がある。また、多頻度打上げに対しては射場の増加が必要になる。

●「有翼形態」（システムＢ等）は空力翼を有した形態であり、水平離陸・着陸、再使用といった航空機的運用方式が可能となる。

従って、旅客飛行を伴う二地点間高速輸送等用途への対応には効果的な形態といえる。

但し、軌道上への輸送のためには「２段目（上段）ロケット」が必要であり、また、同じ輸送量を実現するためにはシステムが大規模となる。

また、主要要素技術である「革新的推進系技術（スクラムジェットエンジン等）」及び「熱防御技術」の成熟度が低いため、実用化までには「ロケット形態」に比較して、期間を要すると想定される。

●「併用形態（ロケット＋２段目有翼）」（システムＣ等）はシステムＡ等の派生型で「２段目（上段）」を有翼形態としていることで地上帰還／再使用化が容易となり、旅客飛行を伴う二地点間高速輸送、サブオービタル宇宙旅行等用途への対応も可能となり、あらゆるミッションに対応が可能となっている。但し、「２段目（上段）」の地上帰還／再使用に係る要素技術である「熱防御技術」、「再突入誘導制御技術」の成熟度が低いため、システムＢ等同様に実用化までには期間を要すると想定される。

将来の宇宙利用市場ニーズに基づき宇宙輸送システムの飛行形態の大まかな評価検討から、軌道上／深宇宙ミッション等には従来の基幹ロケットの発展型である「ロケット形態」（システムＡ等）宇宙輸送システムの実用化を進めることにより、今後の宇宙輸送システムに必要な共通基盤技術の獲得を図ることが妥当である。並行して、国は今後の大型市場が予測される二地点間高速輸送、宇宙旅行用途等の高頻度打上げに対応できるように固有の革新的基盤技術等の獲得を図り、その上で、高頻度往還飛行が可能な「有翼形態」「併用形態」（システムＢ、Ｃ等）宇宙輸送システムの民間主体による開発につなげていく。革新的将来宇宙輸送システム実現に向けたロードマップの詳細について次項に記載する。

4. 革新的将来宇宙輸送システム実現に向けたロードマップ(官民の役割分担)

(1) 二本立ての研究開発の推進

前章までの内容を踏まえ、ロードマップ作成に当たっては、以下の通りミッションに応じて二本立ての研究開発を進めていく。

まずは、国は、低・静止軌道、月面等を対象としたミッション（官ミッション（安全保障、防災利用、アルテミス計画等）を含む）に対応するために、これまでの H-IIA/B、H3 ロケットでの開発・運用で培われた技術も継承し、2030 年頃の初号機打上げを目指して大幅な低コスト化（H3 ロケットの 1/2 程度を目標）を実現するため「基幹ロケット発展型宇宙輸送システム」の開発を進める。

なお、今後の技術獲得状況等を踏まえ、初号機打上げ時期の前倒しについても柔軟に検討する。

更に、以下に示す民間主導で開発される「高頻度往還飛行型宇宙輸送システム」との部品等の共通化による量産効果や全段の完全再使用化等により、抜本的なコスト低減（H3 ロケットの 1/10 程度を目標）を 2040 年代前半に図る。

並行して、上記の飛行形態ではカバーすることが困難な旅客飛行を伴う民間ミッションである宇宙旅行、二地点間高速輸送等の将来の大型市場を確保するために、宇宙輸送システムの高頻度使用、機体の大量生産や製造ラインの共通化等により抜本的な低コスト化（H3 ロケットの 1/10 以下を想定）を 2040 年代前半に実現する「高頻度往還飛行型宇宙輸送システム」に関する研究開発プロジェクトを官民で新たに開始する。

当該新規プロジェクトの実施に当たっては、民間による宇宙輸送事業化を推進するための民間企業等による協議会が本年 5 月に発足しており、この民間での事業化実施機運の高まりを踏まえて、早期に輸送システム開発計画を開始するためにも数年以内に民間中心の事業体制構築を目指す。

「高頻度往還飛行型宇宙輸送システム」として、どのような飛行形態を選択するかは、民間事業者のビジネスモデル次第（サブオービタル宇宙旅行／軌道上宇宙旅行／二地点間高速輸送等）である。国は民間事業者と協議を行い、2040 年代前半の実用機打上げを目標に、2025 年頃までに必要となる要素技術※の絞り込みを行い、JAXA においてその研究開発を実証飛行に必要な技術レベルまで高めていくように進める。その後引き続き 2030 年代初めに民間主導での飛行実証を目指せるように必要な支援を行う。

※革新的推進技術（エアーブリージングエンジン等）、熱防御技術/完全再使用化技術、高頻度輸送技術、性能向上技術、低コスト化技術等

また二地点間高速輸送等は事業化までに時間がかかることから要素技術の獲得状況、市場環境等も踏まえ、「高頻度往還飛行型宇宙輸送システム」の研究開発プロジェクトの進捗について市場環境を踏まえて、適切なマイルストーン毎に文部科学省によるレビューを行い、研究開発計画、官民の役割分担等の見直しを行う。

同時に、国は民間での高頻度往還飛行型宇宙輸送システム事業化に先立って、有人宇宙飛行システムの安全基準や認証に関する国際的議論及び制定等に参画する、また有人飛行実施等に際しての我が国の安全規制・法制度等の対応について検討を進めておく。

「基幹ロケット発展型」、「高頻度往還飛行型」の実現の方策及びそのための共創体制の構築について以下に示す。これらの対応により我が国の将来宇宙輸送システムの国際的競争力を高める。

（２）基幹ロケット発展型宇宙輸送システムの開発

我が国はこれまでの H-IIA/B、H3 ロケットでの開発・運用で培われた技術の継承もあることから、JAXA において「基幹ロケット発展型宇宙輸送システム」に関する要素技術が揃い次第、飛行実証を早期に開始する。

「基幹ロケット発展型宇宙輸送システム」では、主にロケット機体の再使用化をはじめとした低コスト化技術を適用することにより大幅なコスト削減を図る。「基幹ロケット発展型宇宙輸送システム」で想定される 1 回の打上げコストは、再使用化や、オープンイノベーションによる共創体制による部品・材料等のコスト削減により、H3 ロケットの打上げコストの 1/2 程度※が目標となる。

※ 1 段再使用：H3 ロケットの地球低軌道（LEO）単位重量当たりの輸送費 1/2 程度を目標²。

また、更に「高頻度往還飛行型宇宙輸送システム」の要素技術開発が進むことで、熱防御技術、上段回収のための誘導制御技術等を獲得し 2 段目を含めた完全再使用化を図ることや、「高頻度往還飛行型宇宙輸送システム」が実用化され機

² これは今後実現を目指す目標値である。前提として、10 回の再使用、機体製造費は H3 ロケット相当で、推進薬などの消耗品類、基盤維持関連経費（設備運用維持含む）、安全管理維持等は除く。

体が量産される際には、部品の共通化等による量産効果等による製造費の大幅な削減が可能となる。

これらによるコスト削減効果により 2040 年代前半の「基幹ロケット発展型宇宙輸送システム」で想定される 1 回の打上げコストは、H3 ロケットの 1/10 程度※が目標となる。

※完全再使用：H3 ロケットの LE0 単位重量当たりの輸送費 1/10 程度を目標³。

（３）高頻度往還飛行型宇宙輸送システムの開発

民間事業者が自らのビジネスモデルに基づき「高頻度往還飛行型宇宙輸送システム」をどのような飛行形態にするかを選択する。その際、技術的成立性を考慮に入れる必要があり、JAXA において飛行形態による技術的なベンチマーク、フィジビリティスタディ等の研究開発を先行して実施する。その結果を踏まえ民間事業者と国は協議を行い、必要な要素技術を特定し、JAXA においてその研究開発を実施する。

最終的な事業化までの期間が長いことから、民間事業者のビジネスモデルとして、何段階かの事業化を行い開発途中段階での収益化を図る必要性が有る。開発を担う民間事業者に事業予見性を持たせるために、国として以下の取組を検討することが必要であると考えられる。

- ① 高頻度往還飛行型宇宙輸送システムの実現に必要な要素技術の研究開発は、民間事業者とも協議した上で要素技術を絞り込み、技術成熟度（TRL；Technologies Readiness Level）を向上させていく。その中には技術実証のための飛行実験も含まれる。
- ② システムレベルの飛行実証を民間事業者が行う際は、飛行試験のためのシステム技術支援、試験設備／実施場所の貸し出し等必要な支援を行う。
- ③ 実用機の完成後、本宇宙輸送システムでの衛星打上げ等の官需ミッションを民間事業者で担う等のアンカーテナンシーの提供。

ここで「高頻度往還飛行型宇宙輸送システム」で想定される 1 回の打上げコストは、民間事業者が市場をどのように確保するかを経営戦略も考慮されるが、宇宙輸送システムの高頻度使用や機体の大量生産や製造ラインの共通化等により

³ これは今後実現を目指す目標値である。前提として、10 回の完全再使用（1 段目、2 段目、液体ロケットブースタ（LRB）ともに再使用）、機体製造費は H3 ロケット相当で、推進薬などの消耗品類、基盤維持関連経費（設備運用維持費含む）、安全管理維持経費等は除く。

抜本的な低コスト化を図ることで、H3 ロケットの 1/10 以下と想定される。

(4) オープンイノベーションによる共創体制の構築

JAXA において実施する部品・材料等の低コスト化に際しては、製造業等の非宇宙分野の民間事業者と官との「共創体制」を構築し、幅広く革新的将来宇宙輸送システムに必要な最新の知見・技術を取得するとともに、研究開発を通じて得られた最新の知見・技術等の成果を宇宙分野・非宇宙分野の民間事業者へ移転して活用・波及させる。これらで得られた知財については「宇宙用途」では原則としてライセンスアウトすることを承諾することにより、「基幹ロケット発展型宇宙輸送システム」、「高頻度往還飛行型宇宙輸送システム」の両方に技術を適用する。また、これらの研究開発活動により、地上で十分に市場性を有する部品・材料等を宇宙でも使用することにより、部品・材料等のコストを大幅に削減する。

また、本検討会で策定した「ロードマップ」に基づき、JAXA において将来宇宙輸送システムを実現するために必要な革新的な技術をいつまでに獲得するかについての「技術ロードマップ」を策定する。

この「技術ロードマップ」に基づき、宇宙輸送事業者からのニーズ把握等を通じて、宇宙輸送システムに要求される技術に適用可能な地上技術について情報提供要請（RFI：Request for Information）を行い、当該分野の個別調査を行う。

これら JAXA において集めた技術情報の中から革新的将来宇宙輸送システムに必須技術（抜本的な低コスト化に資するもの等）を絞り込んだ上で、研究提案募集（RFP：Request for Proposal）を行い、民間事業者から具体的な技術提案を募集する。

得られた提案を、技術的な観点から審査するためのシステム・技術の専門家と、地上も含めて技術の波及する市場の有無等事業見込み（地上での出口）を評価するための金融・コンサル等の専門家から構成される選定委員会において研究開発を進める技術の絞り込みを行う。

これらの取組を通じて、必要な技術の獲得及び、宇宙輸送システムのコスト削減をはかり、国際競争力を高める。

5. 革新的将来宇宙輸送システムに必須となる抜本的な低コスト化の方策

革新的将来宇宙輸送システムの抜本的な低コスト化のためには、次のような取り組みが必要となる。

(1) 部品・材料等の低コスト化（地上部品・汎用材料等の適用、国際共同調達・技術協力）

- 設計仕様を従来の宇宙仕様から JIS 規格など一般的な地上民間市場規格に基づく仕様に変更し、代わりに信頼性を確保するための冗長化等のシステム設計により宇宙用途としての信頼性を維持したまま大幅な低コスト化を実現する。
- 材料、機器等宇宙輸送システムに使用される共通的な製品に関しては、国際企業間で製品の共同調達、技術協力を推進して、個別発生費用の削減を図り、宇宙輸送システムの大幅な低コスト化を実現する。

(2) 宇宙輸送システムの再使用化

- 機体システムの再使用化により、新規製造部位を最小限にすることでコスト削減を図る。
- 更なる費用削減のための新規製造費、打上げ費、再使用品等の整備費の削減及び再使用化による費用低減効果が得られる使用回数（打上げ頻度；10回程度を想定）の確保が必要。

但し、再使用の回数がある回数を超えると、打上げ費、整備費が支配的となり、費用削減の効果は低減するため、再使用化によるコスト低減には限りがある。再使用化によるコスト低減効果例は図1である。

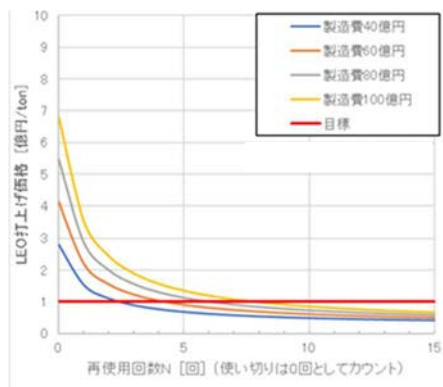


図1 ロケット形態での目標価格と再使用回数

(H3 ロケット相当 LE0=15 トン)

(第6回革新的将来宇宙輸送システムロードマップ検討会資料より抜粋)

（３）宇宙輸送システムの大量生産に伴う量産効果

製品の大量生産に伴う量産効果要因としては、①製造・試験設備等の固定費の割掛け減少効果、②作業員習熟度向上による製造費低減、③大量生産に伴う製造設備の大規模化、製造ノウハウに基づく製造工程の自動化・効率化等 が想定される。量産によるコスト低減効果例を以下に示す。但し、これらの効果は初期設計段階から考慮しておく必要がある。

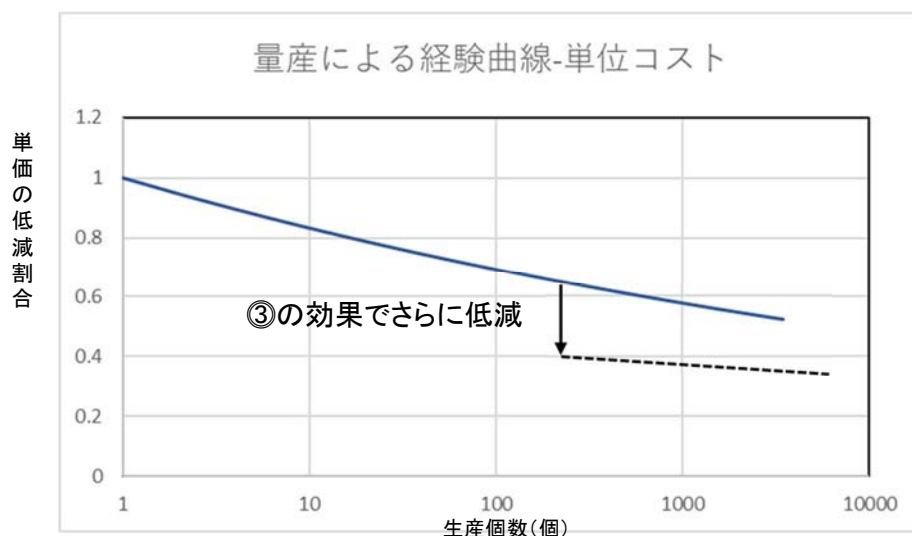


図2 量産によるコスト低減効果

（第6回革新的将来宇宙輸送システムロードマップ検討会資料より抜粋）

（４）製造工程のIT技術利用等による革新化

- 3D プリント技術／デジタルツイン技術により設計・製造プロセスの効率化をはかり低コスト製品を実現する。
- モデルベース開発による実試験、検査工程の省力化等で低コスト製品を実現する。

これらの低コスト化の方策の詳細については、官民共創体制の中で詳細な検討を行い、実現を図る。

6. 本検討会での引き続きの検討事項

本検討会において引き続き検討が必要と考えられる事項は以下の通りである。

(1) 官民の役割分担

- 「高頻度往還飛行型宇宙輸送システム」の開発を官民共同で推進していくための、官民の協議体制、官の支援方策等
- 国と民間の研究開発の分担（知財の持ち方に係るものを含む。）
- これまでの我が国の宇宙開発で、JAXA や民間の培われた技術や知見などの効率的活用のための仕組みづくり
- 開発を担う民間事業者の選定方法
- 我が国の宇宙輸送システムの自立性確保のために、国が責任を負うべきキー技術の維持方策
- 機体以外のシステム（地上施設設備・打上安全管理）の開発、運用主体と役割分担

(2) 射場・スペースポート

(3) 制度的障壁（法律・条約事項、型式証明要否等）

(4) 国際協業の在り方

(5) 利用ミッション動向を含む将来市場環境及び宇宙輸送事業者に関する継続的な分析・評価

以上