

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(案)

0. 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、安全保障の活動を支え、国民生活や社会経済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等が市場を席捲する中で我が国において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、高コストでロケットの打上げを続けるか、最悪の場合、国内の宇宙輸送システム開発メーカーが世界市場より退出を迫られ、我が国が打上げ手段の自立性を喪失する懸念がある。

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なわれた。

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、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月より検討を開始した。

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る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、官民で宇宙輸送システムを開発することが求められる。

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、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の適合性について検討し、民間のミッションを盛り込み、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エンジン等の基幹技術の国産化・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98.1%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

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、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 ロケットの固体燃料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、H-IIBロケット、H3 ロケットの開発・運用等においては、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、月探査用の有人大型ロケット SLS（Space Launch System）の開発を推進するとともに、既存の国際宇宙ステーション（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。

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

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。

るクルードラゴンの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。

大型ロケットだけでなく、米国、欧州、中国、インドでは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、当該民間事業者の巨大資本や政府支援等を背景に、その価格戦略も相まって打上げサービスの国際競争は更に激化している。

特に海外の民間市場では、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、宇宙旅行事業の提供において宇宙輸送システムがそ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、火星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、近年、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いる。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。

同時に、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) 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調達して打上げを続けるか、あるいは我が国の宇宙輸送システムが民間市場より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。

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将来宇宙輸送のミッション

●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（平成31年3月 内閣官房 まち・ひと・しごと創生本部事務局）。

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、増加していく人口に伴う、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」を実施しており、「令和2年版科学技術白書」に紹介されている。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に解決できないので、カーボンニュートラルに資する取り組みが宇宙空間においても実施される可能性がある。

以下、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、現在年間3機程度の打上げを行っているが、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軌道上サービスの広がりが期待される等、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 年間での市場拡大率が同じであると仮定して、2040 年時点の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、年間 5.2 兆円程度※の市場規模(我が国発着ベース)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になっており、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・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・状況把握・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、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・状況把握・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・状況把握・地球観測等の市場は年間 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

これまでの軌道上技術実証、科学実証から、2030年頃迄は将来探査を視野に入れた高度な戦略的技術の実証、民間主体による研究開発利用等へのISS活用の拡大が想定されるが、それ以降については民間の新たな構想等についても考えられているが市場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り、一部企業による実証実験は開始されているが、現時点では、市場が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と、市場が増加することが期待される。

（3）深宇宙（月・火星）

●商業月・火星経済圏

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)。

●宇宙科学・探査及びアルテミス計画／国際協力

宇宙科学・探査及びアルテミス計画等の深宇宙探査については、国際協力に基づくものでもあり、官ミッションとして確実に実施する必要がある。

今後も火星等の探査が本格化するため、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。

表 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(月・火星)
輸 送 対 象	有 人	二地点間高速輸送 宇宙旅行	宇宙旅行	月・火星経済圏 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 ISS 活用 軌道上サービス 安全保障、防災利用等	

3. 将来宇宙輸送システムのミッションと飛行形態の適合性

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状況把握、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を利用した二地点間高速輸送での有人輸送拡大が想定される。
- (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をこなしていくためには、海外の競合メーカーに対して優位に立つ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システム（総合システム：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）であること。

そのためには、打上げに係る製造費用等を低減するのみならず、同一システムでの打上げが年間 10 機以上である必要がある。

- ② 宇宙輸送システムの飛行形態としては、次ページに示すシステム A、B 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システム A、B 等の双方のタイプが必要になる。実現する宇宙輸送システムとして一形態か、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り、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、それらも考慮した官民の共創体制により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。

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の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／上昇して軌道の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のは、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。

以上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」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、宇宙区間で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下表に記載する。

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) ハイブリッド形態 (ロケット+2段目有翼) (1/2段目再使用)
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ・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 ・有人輸送の可能性(有人カプセル輸送など海外での実績あり) 	<ul style="list-style-type: none"> ・二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 ・有人輸送の可能性(航空機運用技術が使用できる) 	<ul style="list-style-type: none"> ・二地点間高速輸送、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) ・有人輸送の可能性
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> ・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 ・二地点間高速輸送には対応できない 	<ul style="list-style-type: none"> ・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) 	<ul style="list-style-type: none"> ・搭載輸送能力がロケット形態に比べ相対的に低い(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、現在の宇宙輸送システムであるH-IIA、H3ロケットの開発方式/技術要素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、1段目の再使用化により打上げ期間が短縮化され、打上げ回数の増加も可能となる。

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」を追加する必要があり、輸送量は相対的に少量である。

また、主要必要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）、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、期間を要することが想定されている。

「併用形態（ロケット＋上段有翼）」（システムC等）はシステムA等の派生型で二地点間高速輸送、サブオービタル宇宙旅行を含むあらゆるミッションに対応が可能であるとともに「2段目（上段）」を有翼形態とすることで地上帰還／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等用途への対応も可能にしている。但し、「2段目（上段）」の地上帰還／再使用に係る必要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ことが想定されている。

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発展型である「ロケット形態」（システムA等）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）の民間主体による開発につなげる。

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、ロードマップ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による「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。

次に、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、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、早期に計画を開始するためにも、将来の二地点間高速輸送事業化等を含めた宇宙輸送事業を進めるための民間の幅広い関係者の集まりである「宇宙旅客輸送推進協議会」が発足予定であり、民間での実施機運が高まっていることも踏まえて、数年以内に民間中心の開発体制構築を目指す。

「高頻度往還飛行型宇宙輸送システム」は、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（その飛行形態、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用途）である。国は民間事業者と協議を行い、要素技術※を特定し、JAXA においてその研究開発を実施する。

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

「高頻度往還飛行型宇宙輸送システム」は 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、2030 年代始めに民間主導で飛行実証を目指せるように必要な支援を行う。

（事業までに時間がかかることから）要素技術の獲得状況等も踏まえ、「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 5 年毎に文部科学省によるレビューを行い、継続するか否かを含め研究開発計画、官民の役割分担等の見直しを行う。

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 往還飛行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、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。

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、有人飛行実施に際しての安全規制・法制度等の対応について検討を進めておく。

(2) 基幹ロケット発展型宇宙輸送システムの実現

我が国はこれまで垂直打上方式のシステム以外について開発した経験がないことから、JAXA での技術成熟度の向上や、オープンイノベーションによる共創体制による必要技術の獲得は、垂直打上方式のものが先行する可能性が高い。

従って、先んじて揃った技術で「基幹ロケット発展型宇宙輸送システム」の飛行実証を早期に開始する。

実用化が進めば、打上げコスト削減効果も得られ、実機の打上げにより技術を更に信頼性の高いものにすることができる。

技術成熟度（TRL）を向上させるために時間を要する技術開発及び実機での実証による技術の信頼性の向上を経て、「高頻度往還飛行型宇宙輸送システム」に実証技術を提供する。

また、「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。

今後実現を目指す目標値。前提として、10 回の再使用、1 段再使用機の製造費及び消耗品が H3 ロケットと同等で、設備運用維持費は除く。

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」との部品の共通化による量産化や共通の製造ラインでの同時製造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LEO 単位重量当たりの輸送費 1/10 程度を目標。今後実現を目指す目標値。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）、機体製造費及び消耗品は H3 ロケット 24 型相当で、設備運用維持費は除く。

（3）高頻度往還飛行型宇宙輸送システムの実現

「基幹ロケット発展型宇宙輸送システム」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、「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、民間で開発体制が構築されることが不可欠であり、早期に計画を開始するためにも、将来の二地点間高速輸送事業化等を含めた宇宙輸送事業を進めるための民間の幅広い関係者の集まりである「宇宙旅客輸送推進協議会」が発足予定であり、民間での実施機運が高まっていることも踏まえて、数年以内に民間中心の開発体制構築を目指す。

「高頻度往還飛行型宇宙輸送システム」は、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であり、開発を担う民間事業者と国は協議を行い、要素技術※を特定し、JAXA においてその研究開発を実施する。

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可能性が有る。

また、開発を担う民間事業者に事業予見性を持たせるために、国としてアンカーテナンシー等の支援の取組を検討することが必要であると考えられる。

「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、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抜本的な低コスト化を図ることや、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有るが、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、製造業などの非宇宙分野の民間事業者と官民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の活用については JAXA において知財を保有することにより、「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・材料等を宇宙で使用することが可能になると、宇宙輸送システムに使用する部品・材料等のコストを大幅に削減できる。

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、宇宙分野で必要な技術について、地上でも利用がなされているもの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宇宙輸送システムに必要な技術（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市場が有るか等事業見込み（地上での出口）を見極めるための金融・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行う。

5. 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

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。

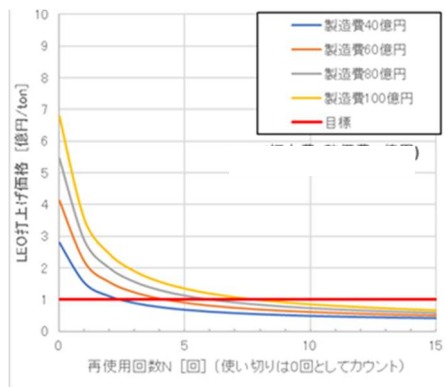
(1) 部品・材料等の低コスト化（地上部品・汎用材料等との共通化、国際調達・技術協力）

- 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の仕様に変更し、代わりに信頼性を確保する冗長化などのシステム設計により宇宙用途の信頼性を維持したままで従来以上の低コスト化を実現する。
- 材料、機器等宇宙輸送システムに共通的な製品に関しては、国際企業間で製品の調達、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品製造費、打上げ費、再使用品等の整備費の削減及び再使用化の効果が得られる使用回数（打上げ頻度）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以下である。

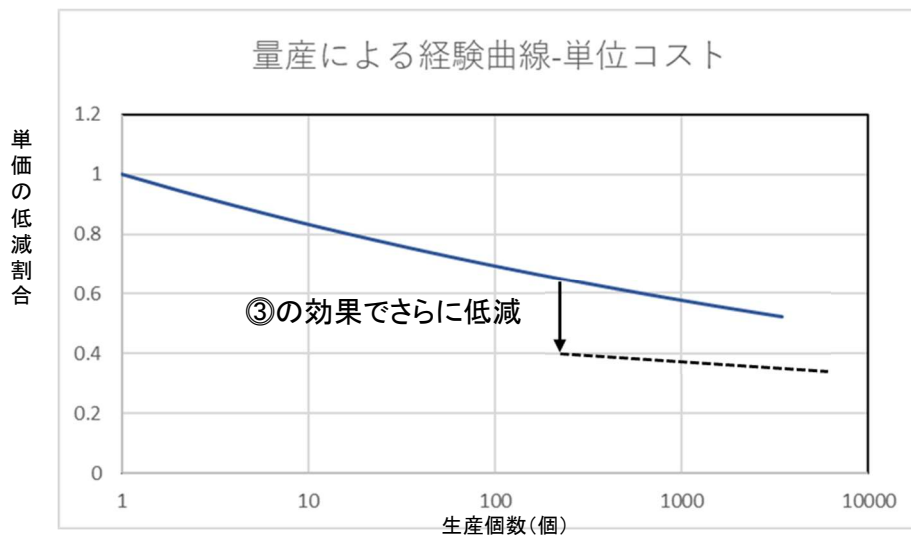
図1 ロケット形態での目標価格と再使用回数（H3 ロケット相当 LEO=15トン）



（第6回革新的将来宇宙輸送ロードマップ検討会資料より）

（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は、①固定費の割掛け減少効果、②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大規模化、装置ノウハウに基づく製造の自動化・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かないと効果は少ない。



（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）

（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・製造のプロセスの効率化や低コスト製品の実現

- 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の
実現

上記の低コスト化の方策の詳細については、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」を官民で進めていくための、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。）
- 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
- 機体システム以外のシステム（地上施設設備・打上安全管理）の主体、役割分担

(2) 射場・スペースポート

(3) 制度的障壁（法律・条約事項等）

(4) 国際協業の在り方