

宇宙技術戦略
(令和7年度改訂)

内閣府宇宙開発戦略推進事務局
令和8年3月**日

宇宙技術戦略

～略～

③宇宙輸送

i. 技術的優位性

人類の活動領域は、地球、地球低軌道を越え、月面、更に深宇宙へと、本格的に宇宙空間に拡大しつつあり、我が国の宇宙活動を支える重要な基盤としての宇宙輸送については、研究開発やイノベーションを通じて技術的優位性を強化する必要がある。

このため、宇宙輸送能力の強化、安価な宇宙輸送価格の実現、打上げの高頻度化を実現する観点から必要な技術であるかどうかを評価した。

また、宇宙輸送能力の機能面及び性能面、コスト面及び納期面（リードタイム短縮等）、開発ステージにおける先行性、国際競争力に基づく輸出可能性等の観点から、当該技術を保有又は保有しようとする企業等が国際市場で勝ち残る意志とビジネスモデルを有するかについても評価した。さらに、技術成熟度の低い技術であっても、競争力の強化に向けて先行開発が必要な重要な技術であるかどうかについても評価した。

ii. 自律性

H-IIAロケットの部品点数は約 100 万点、そのサプライヤーは約 1,000 社に達すると指摘されており、我が国が他国に依存することなく宇宙へのアクセスを確保していくためには、ロケットのコンポーネントや部品、材料に関するサプライチェーン及び開発能力を継続的に維持していく必要がある。このため、基幹ロケット及び民間ロケットに関するサプライチェーンリスクに関して、関係企業に対してヒアリングを実施する等により、サプライチェーン上の代替困難度や調達自在性のリスクやシステム構築上のコア技術であるかどうかについて評価した。また、技術成熟度の低い技術であっても、将来的に自律性確保の観点から先行開発が必要な技術であるかどうかについても評価した。

iii. 多様な宇宙輸送ニーズへの対応

宇宙基本計画では、次期基幹ロケットの運用実現、完全再使用化及び有人輸送への拡張、及び高速二地点間輸送や宇宙旅行などの新たな宇宙輸送システムの実現を目指すことが示されており、こうした宇宙輸送分野のイノベーションを積極的に創出することにより、多様な宇宙輸送ニーズに確実に対応できるようにすることが求められている。

このため、様々なペイロードへの対応（衛星、実験機材、食料、燃料、構造物、ローバ、宇宙飛行士、ロボット等）、多様な宇宙輸送ルートの実現（高速二地点間輸送、軌道間輸送、洋上打上げ、宇宙旅行、月・火星等）、柔軟かつタイムリーな打上げ機会の提供、信頼性の高い宇宙輸送ロジスティクスの提供等、多様な輸送ニーズに対応する宇宙輸送サービスを実現するために必要な技術であるかどうかを評価した。その際、当該技術に係る市場セグメントの市場性や将来性が十分に期待できるかについても評価した。

また、増加する国内の衛星打上げ需要やグローバル需要に応えるため、海外の宇宙輸送技術の国内での活用、サブオービタル飛行などの我が国に前例のない多様な取組を進めることが期待されており、こうした取組により我が国の宇宙産業の裾野を拡大させ、ひいては我が国がアジア・中東における宇宙輸送ハブとしての地位を築くことを目指す必要がある。このため、ロケットの打上げや帰還をホストする宇宙輸送ハブとしての射場・宇宙港の機能強化に資する技術であるか

どうかについても評価した。

～略～

1. 宇宙輸送

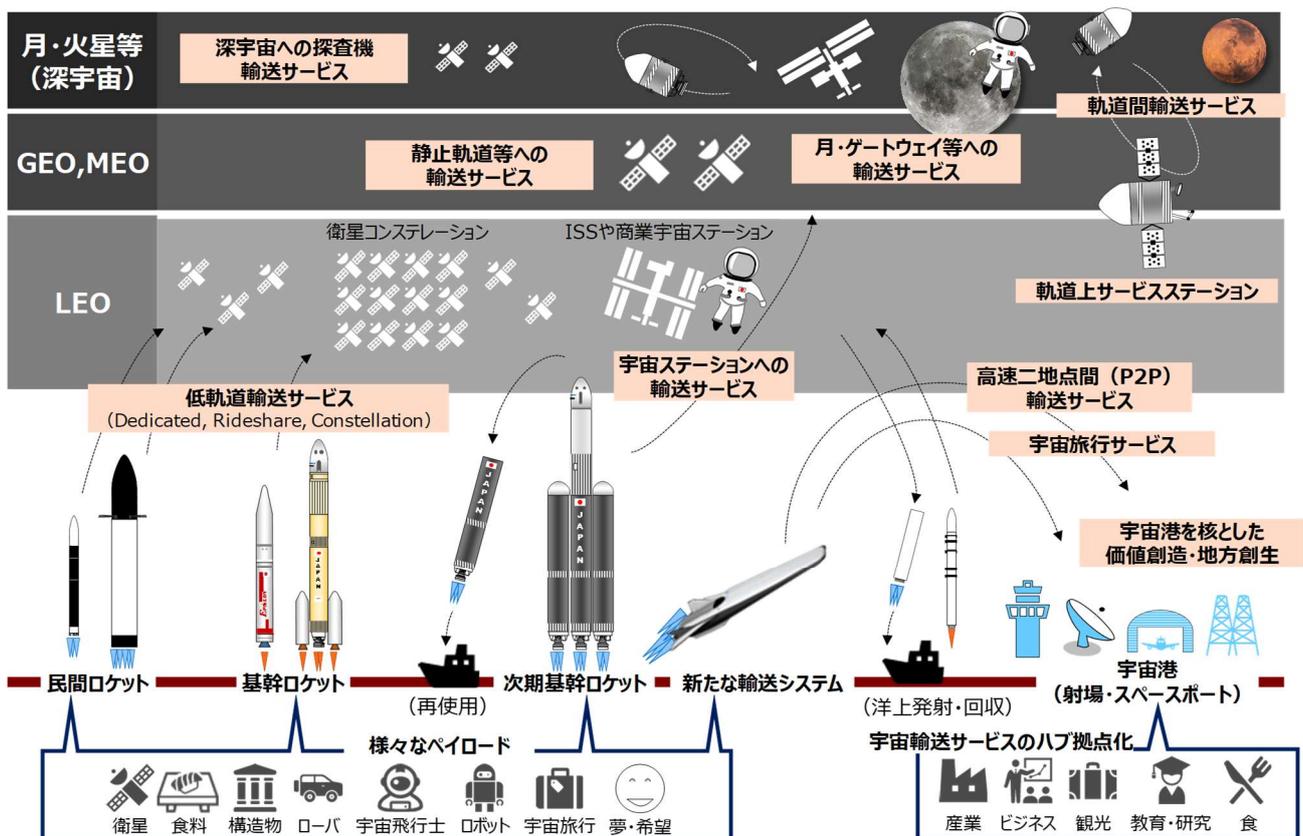
(1) 将来像

人類の活動領域は、地球低軌道を越え、月、更に火星等の深宇宙へと、本格的に宇宙空間に拡大する。それに伴い、宇宙空間への輸送ニーズが多様化し、その輸送ニーズに対応した柔軟性の高い宇宙輸送サービスが実現される。

具体的には、宇宙空間へ輸送されるペイロードは、これまでは人工衛星や探査機が中心であるところ、宇宙における人類の活動拠点(宇宙ステーションやゲートウェイ、月面基地等)に向けて、その構築に必要な構造物、活動に当たっての物資・食料やローバ、ロボット、そこで活動する人員など、従来以上に多様かつ大量のペイロードの輸送ニーズが生まれる。

これらの多様な輸送ニーズに対応するため、宇宙への輸送はより高頻度になるとともに、軌道上のサービスステーションや月以遠、最終的には軌道間輸送を組み合わせた地球と宇宙空間をつなぐネットワークが構築され、より柔軟性が高く、高頻度なロジスティクスを実現するサービスへと進化する。加えて、ロケットやサブオービタル機を利用した宇宙旅行や、地球上の二地点間を高速で結ぶP2P(Point to Point: 高速二地点間輸送)のような新たな宇宙輸送サービスが生まれる。

これらの宇宙輸送サービスの拠点となる宇宙港においては、本来の機能であるロケットやペイロードの試験・整備・打上げ等をホストすることに加え、その周辺で教育、研究、観光、エンターテインメント等の産業が広がる。宇宙港とそうした周辺産業が相乗効果を発揮することで、宇宙港の機能が強化され、技術的に高度なロケットや宇宙旅行、有人飛行への対応が可能になるとともに、宇宙輸送サービスのハブとして、価値創造や地方創生につながるエコシステムが形成される。



【図1: 宇宙輸送の将来像】

(2) 環境認識と技術戦略

i. 環境認識

（宇宙輸送ニーズの増加と将来展望）

宇宙への輸送ニーズは、この 10 年間大幅な増加を続けており、[20252024](#) 年に打ち上げられた人工衛星等¹の機数は [2,822機](#) [4517](#) であり、その数は 10 年前と比較して約 [1120](#) 倍に増加している²。今後、数千基以上の衛星で構築されるメガコンステレーションの構築に取り組む事業者や、主要国政府による宇宙利用の拡大方針などを踏まえると、宇宙輸送ニーズは一層拡大することが見込まれる。

また、宇宙での人類の活動領域が商業宇宙ステーションやゲートウェイ、月面拠点へ展開することに伴い、地球上から宇宙空間へ運ばれるペイロードは、拠点構築のための構造部材や有人活動に要する資機材等、質的・量的に大きく拡大する見通しである。

さらに、ロケットを活用した P2P (Point to Point: 高速二地点間輸送) は、米国においても安全保障面からの検討が進められ³、また、サブオービタル飛行による宇宙旅行は民間が事業化を主導している。これらのシステムは、いずれは大陸間の超高速移動サービスへ発展していくことが予想され、航空輸送市場の一角を占めるサービスセグメントへ発展すると予測される。

さらに、これまで宇宙への有人輸送を実現した国は米国とロシア、中国に限られていたが、インドは [20262025](#) 年以降の**に**有人輸送の実現を計画しており、欧州においても有人輸送の実現に向けた構想が練られている。

他方、これまで宇宙輸送システムを持たなかった国においても、安全保障や産業育成の観点から、ロケットの自主開発や他国からの宇宙輸送技術の輸入、宇宙港の整備などを通じて、宇宙へのアクセス手段の確保に向けた動きが盛んになっている⁴。

（拡大する宇宙輸送市場）

これまで、自国で宇宙輸送システムを保有する各国は、その維持と強化を目的とした政策を実施してきた。その中でも近年、米国⁵及び中国⁶は、国自らが開発することに加え、民間企業によるロケット開発への支援及び輸送サービスの政府調達に積極的であり、その動向は欧州⁷やインド⁸でも顕著になりつつある。また、我が国でも、民間企業によるロケット開発への支援を開始してい

¹ ここでは宇宙空間に打ち上げられた人工衛星と探査機、宇宙ステーションへの補給機・有人宇宙船、宇宙ステーションの構造物を指す。

² 内閣府宇宙開発戦略推進事務局の調べに基づく。

³ 米国では国防総省が、軍事物資や人道援助の輸送を短期間で実現するためのグローバル・ロジスティクス構築に向けたロケットの活用 (Rocket Cargo プログラムと呼ばれる) に係る研究を進めている。

⁴ 一例として、韓国では 2022 年に国産の液体燃料ロケットである KSLV の打上げに成功、また 2023 年には固体燃料ロケットの打上げ実験に成功。英国やニュージーランド等は米国ロケットの国内からの打上げに向け、米国との間で Technology Safeguards Agreement を締結、また国内で複数個所の宇宙港整備も進めている。同様に、ノルウェーやスウェーデン、カナダ等においても宇宙港整備が進んでいる。

⁵ 米国においては、ISS への輸送機の開発に向けた COTS (Commercial Orbital Transportation Services) を 2005 年に実施して以来、NSSL (National Security Space Launch、現在は 2025 年以降の打上げ機の開発と調達に向けた Phase 3 を実施中) や、VCLS (Venture Class Launch Services) 等を通じた、民間ロケットの開発と調達を実施。

⁶ 中国は、2021 年に発表した「中国的航天」(中国宇宙白書) において、「中国の宇宙産業は、全体的な国家戦略の対象であり、国家戦略に奉仕するものである」とし、企業への支援として、主要科学研究施設・設備のアクセス権や共有権を与え、企業が研究開発に参加できるようにし、宇宙製品・サービスの政府調達の範囲拡大を目指している。

⁷ ESA は 2023 年 11 月に、2028 年までに ISS への物資輸送を行う民間ロケットを開発し、また打上げの一部を Ariane6・VegaC 以外の欧州民間ロケットで行うことを表明。

⁸ [インド政府は宇宙分野のスタートアップ企業を支援するための基金を設立。](#)

る⁹。

このような民間企業による宇宙輸送産業への参入は、市場のグローバル化と国際競争の進展をもたらし、その結果、宇宙輸送技術のイノベーションが加速するとともに、宇宙輸送サービスの高頻度化や価格低減といったサービスレベルの向上が実現している。

具体的には、民間企業によるロケット開発が活発化する中、過去5年間で68社が宇宙輸送サービス市場に新規参入したが、今後数年以内には新たに 20 社近い企業の参入が見込まれている。このような流れの中で、20252024年のロケットの打上げ回数は過去最大の 253316 回¹⁰に達し、その中で、小型ロケットによる小型衛星単独の打上げや、複数顧客の小型衛星をまとめて打ち上げるライドシェアと呼ばれる輸送サービスが拡大したことで、これまで手段やタイミングが限られていた宇宙へのアクセス機会が増加している。

また、輸送価格の面では、米 SpaceX 社の Falcon9 が、それまでの価格水準を大幅に下回る輸送価格を実現¹¹したことで、その価格が国際的な宇宙輸送市場におけるベンチマークとなっている。

さらに、衛星の打上げ後に最終的な投入軌道へのラストマイルの軌道遷移サービスを行う OTV (Orbital Transfer Vehicle) のような新たな宇宙輸送サービスの形態が登場している。このようなサービスは、この先、軌道上や月面上での宇宙輸送機向け燃料の生成・補給などを行うサービスステーション構築や宇宙機の軌道間輸送サービスへ発展し、より重いペイロードを、より安く、より早く、より遠くまで運ぶことのできる宇宙輸送ネットワークが実現することが見込まれる。

(加速する宇宙輸送技術のイノベーション)

ロケット一段目の再使用化では、米 SpaceX 社が 2013 年に世界で初めて実用化して以来、20245 年末までに 534371 回¹²の一段目の帰還に成功している¹³。ロケット一段目の再使用化は打上げの高頻度化や打上げコストの低減へ一定の効果があると言われ、米 SpaceX 社の成功は、多くのロケット開発企業を再使用化に向けた技術開発に駆り立てている。米国では Rocket Lab 社が 2023 年以降、海上着水後に回収した一段目の再使用を実用化している他、2025 年 11 月には、米 Blue Origin 社の New Glenn ロケットが海上着陸船へのロケット一段目の帰還を成功させている。また、中国では LandSpace 社が再使用型の大型ロケットである朱雀 3 号の初打上げを 2025 年 12 月に実施し、第 1 段階着陸には失敗したものの、衛星の軌道投入には成功するなど、米国以外でも再使用ロケットの開発が進んでいる¹⁴。我が国でも、JAXA がフランスとドイツの宇宙機関との連携のもと、機体の再使用化に向けたプロジェクト (CALLISTO プロジェクト) を進めており、2026 年度に実証試験を予定しているとともに、そのフロントローディング研究活動として小型実験機 (RV-X) を用いた研究を実施中である。また、2025 年 6 月には本田技術研究所が自社開発の再使用型ロケット実験機を用いて離着陸実験を成功させた¹⁵。

⁹ 我が国では、2023 年度より SBIR フェーズ 3 基金事業を通じて、2027 年度までに打上げを行う民間ロケットの開発支援を開始した。

¹⁰ 内閣府宇宙開発戦略推進事務局の調べに基づく。なお、我が国における 2024 年のロケットの打上げ成功回数は 5 回であり、米国、中国、ロシアに次いで 4 番目 (インドと同数) であった。

¹¹ 大型ロケットの打上げ価格は 2010 年頃まで、10K US ドル/キロ程度が水準だったが、2010 年に米 SpaceX 社は Falcon9 を通じて、2.9K US ドル/キロ、その後 Falcon Heavy を通じて 1.5K US ドル/キロの打上げ価格を実現した。

¹² 内閣府宇宙開発戦略推進事務局による調べに基づく。

¹³ 米 SpaceX 社は 2024 年 10 月、Starship の 1 段ロケットの帰還において、射場に備え付けられたアームにより機体を空中で捕獲することにも成功した。

¹⁴ 米 SpaceX 社は 2024 年 10 月、Starship の 1 段ロケットの帰還において、射場に備え付けられたアームにより機体を空中で捕獲することにも成功した。

¹⁵ 実験機は全長 6.3m、直径 85cm、重量 Dry 900kg/Wet 1,312kg であり、到達高度 271.4m、着地位置の目標との誤差 37cm、飛行時間 56.6 秒を達成した。

一方、輸送能力の強化やロケットの使用性の向上、その先の完全再使用化や深宇宙への輸送の実現に向けて、推進系の技術開発が激化している。とりわけ、技術的に利点の多い液化メタンエンジンは、2023年から2024年にかけて、中国及び米国でそれぞれ初めての打上げに成功し、日欧においても開発が進められていることもあり、今後の宇宙輸送システムの重要課題になると考えられる。また、ハイブリッドロケットエンジンは、安全性に優れることから日本でも大学等のロケット打上げ実験で広く使用されているとともに、2025年に海外でこれを使用したロケットによる人工衛星打上げが試みられる¹⁶など、日本・豪州・韓国等のスタートアップ企業を中心として、事業化を見据えた開発が進んできている。その他にも、エアブリージングエンジン¹⁷、熱核推進¹⁸、我が国が世界で初めて宇宙実証に成功したデトネーションエンジンなど、旧来の技術方式と比較して飛躍的な性能向上を見込める革新的技術についても国内外で開発が進められている。

加えて、宇宙での環境への対応や、大型構造体の製造において難易度が高いと言われていた、3D積層技術¹⁹や複合素材成型技術²⁰のロケット構造体の製造プロセスへの適用が進んでおり、構造質量の低減や製造期間の短縮、製造コストの低減を実現しつつある。

(宇宙港の整備、関連制度の国際調和)

拡大する宇宙輸送サービスをホストする拠点として、宇宙港²¹の開発・整備も盛んになっている。これまでは、政府自身がロケットの打上げ拠点を整備してきたが、米国では、宇宙港が17箇所設置²²され、民間のロケット打上げをホストしつつ、研究開発や実証実験、教育産業等の宇宙輸送の周辺産業を取り込む形で、一定の経済波及効果を生み出している²³。

また、民間が開発を進めるロケットは世界中どこからでも打ち上げられることを指向してシステム設計されているものが多く²⁴、実際、英国や北欧、豪州では、そのようなロケットの打上げをホストし、かつ国内の宇宙産業の拠点とすることを目指した宇宙港の整備が進められている。

以上のような宇宙輸送技術の高度化や宇宙港の発展に伴い、かつての航空産業と同様、宇宙輸送市場は国境を越えたグローバル化が実現すると予想される。具体的には、ロケット機体の輸出入、我が国の宇宙港への海外からの宇宙機の乗り入れ、我が国の宇宙機の海外宇宙港への帰還等、様々なグローバルビジネスが予想されている。

このため、我が国として宇宙輸送産業のグローバル化を推進し、かつ、企業が国際競争力を獲

¹⁶ 豪州の Gilmour Space Technologies が 2025 年 7 月、韓国の INNOSPACE が 2025 年 12 月に、ハイブリッドロケットエンジンを搭載したロケットによる軌道投入を目指した打上げを実施したが、どちらも軌道投入には至らなかった。

¹⁷ エアブリージングエンジンについては米空軍研究所 (Mayhem エンジン) や ESA (SABRE エンジン) が開発を進める。

¹⁸ 熱核推進 (NTP: Nuclear Thermal Propulsion) については、NASA と米国防高等研究局が民間企業との共同研究を進めており、2027 年までの軌道上実証を目指している。

¹⁹ 米国の Relativity Space や Firefly Aerospace Inc.等は、エンジンやロケットの構造体を 3D プリンタで製造し、製造期間を大幅に短縮している。ESA においても、再使用 LNG エンジン (Prometheus Engine) を 3D プリンタで製造すべく、大型 3D プリンタ装置を開発中。

²⁰ 米国の Rocket Lab, Inc.や Firefly Aerospace Inc.は推進薬タンクに CFRP を活用し軽量化を実現。また、ESA や NASA においても、ロケット上段タンクへの CFRP 活用を目指した研究開発を推進している。

²¹ ここでは、ロケットの垂直打上げに対応する射点や水平方向の離着陸に対応する滑走路のいずれか又は両方を備え、かつ宇宙輸送サービスの拠点や宇宙輸送に関連する周辺産業を集積するインフラのことをいう。

²² 米国連邦航空局 (FAA) が認可する 14 箇所に加え、NASA や米宇宙軍、民間企業が管理する宇宙港を合計した数。

²³ 一例として、米国のニューメキシコ州にある Spaceport America は、宇宙港を拠点とした宇宙産業に係る研究開発や周辺産業との連携を通じて、2022 年に 811 名の雇用を生み出し、244MUS ドルの経済波及効果を生み出したと報告されている。(Economic Impact of Spaceport America, 2022, The New Mexico Spaceport Authority)

²⁴ 一例として、米国の Astra Space, Inc.や ABL Space Systems は地球上の複数箇所から打ち上げられるロケットを指向し輸送サービスを開発している。

得できるようにするためには、宇宙輸送に係る各国の規制枠組みや安全審査基準、ロケット・人工衛星と射場・宇宙港の間の技術インターフェースのそれぞれについて、国際的な調和や規制当局間の相互承認、各種規格やオペレーションの国際標準化が不可欠になると予想される²⁵。

ii. 技術の重要性と進め方

宇宙輸送の将来像と環境認識を踏まえた上で、宇宙基本計画で掲げた、基幹ロケットの運用・高度化、次期基幹ロケット及び民間ロケットの開発・運用、新たな宇宙輸送システム(高速二地点間輸送等)の構築²⁶を、我が国の産学官で効果的・効率的に実現していくため、それらに不可欠となる重要技術のスクリーニングを行い、その結果、以下の技術の研究開発等に取り組むこととする。

なお、我が国の宇宙活動を支える基盤としての宇宙輸送は、月・ゲートウェイへの輸送サービス、軌道間輸送サービス、深宇宙への探査機の輸送サービス、有人輸送サービスといった宇宙空間にニーズが拡大することに十分に留意して技術開発等に取り組む必要がある。

① システム技術

ロケットシステムの設計・開発・製造・運用に当たり、個々のサブシステムやソフトウェア等を全体として統合し、運用するシステムインテグレーション技術は、ロケット開発の基幹的技術であり、最優先で取り組むことが非常に重要である。本技術はロケット開発に関わる高度な技術とノウハウの塊であることから、新規のロケット開発を通じてロケットの開発基盤(人材・組織、開発ツール、ソフトウェア、試験装置、計算機基盤、実験場等)を確保し、その上で国内における技術継承や経験蓄積を図りつつ、かつ将来の事業拡大に向けた大量生産技術へ対応させていく。そのため、我が国がこれまで基幹ロケットの開発を通じて蓄積・継承してきた本技術に、民間ロケットの開発を加えることで、我が国全体の技術基盤を確立させ、宇宙輸送システムに関わるイノベーションを促進させていく。さらに、安全保障に対する宇宙システムの重要性が高まる中で、これまで我が国が独自に培った戦略技術としての固体ロケットシステムに係るシステムインテグレーション技術を継承・発展させることが求められる。

また、ロケットシステムの要件定義・設計・開発・製造・運用及びこれらの検証・妥当性確認に係るプロセスにおいて高度なモデルを使用することにより、システムズエンジニアリングを高度化・高信頼化・効率化する MBSE²⁷(Model-Based Systems Engineering)については、ロケット開発で求められつつあるアジャイル開発や、調達から設計・開発・製造・運用までのプロセスの最適化を支援する重要技術であることから、積極的な導入を推進することが非常に重要である。MBSE の導入に向けては、先行して適用が進む自動車業界等の知見や基準を活用するとともに、宇宙輸送システム特有の要素や開発リスクが高い要素に対する仮想環境上のモデルやエンジニアリングツ-

²⁵ 2024年10月には、商業宇宙輸送に係る政策・規制の国際調和、安全規制に関する政府間協力、ライセンスの重複低減等を推進するため、米・連邦航空局商業宇宙輸送局(FAA-AST)がGlobal Spaceport Allianceとの共催により、第一回国際宇宙港会議(International Spaceport Meeting)を開催し、各国政府や宇宙機関・宇宙港等の関係者が参加して議論が行われた。

²⁶ 次期基幹ロケットでは、2030年代早期の初号機打上げを目指して、低軌道の場合における単位質量当たりの打上げコストをH3ロケットの2分の1程度を実現する。また、民間主導で開発される新たな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利用化等により、2040年代前半に単位質量当たりの打上げコストをH3ロケットの10分の1程度の実現を目標とする。新たな宇宙輸送システムでは、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単位質量当たりの打上げコストをH3ロケットの10分の1以下の実現を目標とする。

²⁷ 本技術は、分野共通技術としても掲げているが、宇宙輸送システムは、ロケットシステム、サブシステム、地上系やそれらの運用など、様々な特徴のある機構が相互作用を及ぼすシステム構成であり、この複雑なシステムを効率的に、アジャイルに開発していく上で重要であることから、宇宙輸送分野の重要技術として記載。

ルの整備を進める。その上で JAXA が整備したモデルやツールを、我が国で宇宙輸送システムの開発に取り組む民間企業へ共有することにより、我が国全体としてのシステム技術の向上につなげ、イノベーションの創出を推進する。

② 構造系技術

3D プリントを活用したロケットの大型構造体(ロケットエンジン、大型タンク等)の製造技術である 3D 積層技術²⁸については、複数部品の一体成型や従来の工程では製造・加工ができない軽量化形状が可能となるため、製造期間短縮や製造コスト低減、機体軽量化による打上げ能力向上が期待されるため、非常に重要な技術である。3D 積層技術は、基幹ロケットに用いるエンジンのコンポーネントの一部に活用されているが、ロケットの構造体への適用に際しては、製造装置の大型化と製造品質の向上が課題である。そのため、宇宙産業以外での活用実績を取り入れつつ、小型の要素レベルから大型の実機サイズの製造における試作・検証を段階的に進め、製造と品質保証に関する技術を確立・向上させていく。

また、CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)等の複合素材を用いたロケットの構造体の成型技術である複合素材成型技術についても、これまで重量のある金属を用いて製造してきたロケット構造体を軽量化することが可能になり、機体軽量化による打上げ能力の向上が期待されるため、非常に重要な技術である。本技術については、既に基幹ロケットの一部(モータケースや衛星フェアリング等)にも CFRP が活用されているが、大型の極低温推進薬タンクやエンジン支持構造等の荷重集中部への適用には至っていない。推進薬タンクなど大型構造物の設計技術の向上や製造工程の最適化、高温や極低温環境に対する地上での検証を通じて、実機大の推進薬タンクや推進系配管等へ複合素材の適用範囲を拡大する。

一方、ロケット機体や衛星、フェアリングの分離機構に火工品を用いる場合、分離時の衝撃が大きくなるため、搭載機器の設計・検証に要する時間及びコストの負担となっている。特に衛星やフェアリングの分離時の衝撃は、ペイロードの設計条件に直結するため、これを小さくすることは、多様なペイロード輸送の実現や、小型衛星ライドシェアの搭載機会拡大に向けて意義が高く、火薬を用いない非火工品分離機構技術の開発が重要である。

なお、これらの構造系技術は、宇宙輸送のみならず、衛星開発や宇宙科学・探査分野でも活用されることが期待されるため、分野共通的に開発に取り組むことも重要である。

③ 推進系技術

液体水素より経済性・貯蔵性・安全性が高く、かつ、密度が大きい液化メタンを燃料とする液化メタンエンジンは、機体サイズの小型化とそれによる低コスト化、宇宙輸送能力の向上、運用性の向上が期待される重要技術であり、我が国が LNG エンジン研究開発で培った技術を更に発展させることで、様々な基幹ロケットや民間ロケット、軌道間輸送機等に対して適用されることが期待される技術であり、非常に重要である。液化メタンエンジンについては、我が国では JAXA や民間企業において研究開発が進められ、技術基盤を培ってきた。さらに近年では、複数のスタートアップ企業による開発も進展しており、[これらの開発や事業化を後押しする大推力にも対応可能な燃焼試験場技術の検討が必要である。](#)^{いる。}加えて、液化メタンエンジンに使用される高純度液化メタンは今後、ますます需要が高まることが見込まれるため、高純度液化メタンの製造方法の確立や射場、試験場等への供給体制の構築は重要である。今後は、我が国がこれまで蓄積した大型の液体ロケットエンジンに係る知見と技術に、これらの技術基盤を組み合わせ、将来のロケットの開発へとつなげていく。

また、ターボポンプによる昇圧なしに超音速燃焼を可能にするデトネーションエンジンは、昇圧

²⁸ 本技術は、分野共通技術としても掲げているが、宇宙輸送分野における共通的な要求である軽量化、高品質化、低コスト化に加え、宇宙輸送システム特有の要素(高温・高圧・極低温・大型化等)への対応に向けた技術開発が重要であり、宇宙輸送分野の重要技術として記載。

装置や燃焼室などの機構を不要にすることでエンジンの大幅な小型化・軽量化・経済化を実現するとともに、燃焼効率の飛躍的向上が可能になるため、我が国の重要技術として開発に取り組むことが重要である。

さらに、大気中の酸素をそのまま酸化剤として使用するエアブリージングエンジンは、液体酸素の搭載量削減によるロケットの軽量化と比推力の向上が可能になる技術であり、エンジンの実用化によって打上げ能力の強化や機体コストの低減が期待され、非常に重要である。離陸から極超音速までの幅広い作動域を有するエアブリージングエンジン(複合エンジン)技術の獲得を目指して、要素技術の地上実証を行う。加えて、飛行実証に向けたシステム検討を[行い、小規模な実験機による段階的な飛行実証](#)を行う。一方、ロケットの固体モータについては、年間当たりの製造能力に限界があり、また、国内メーカーが供給する主要材料(インシュレーション・火工品・推進薬・ノズル・モータケース)において生産設備の老朽化や増加する需要に対する供給量不足等のサプライチェーンリスクを抱えている。このため、固体モータ量産化技術の開発等に取り組むことにより、増加する固体ロケットの打上げ需要に応えつつ、サプライチェーンの自律性確保を目指すことが非常に重要であり、推進薬の製造における前処理工程や硬化工程等、製造工程の短縮・高度化に関わる研究開発を推進する。また、固体ロケットによる打上げ需要に柔軟かつ効率的に対応するためには、低コスト化・製造期間短縮・デブリ低減を可能とする推進薬高度製造技術や、複数の固体モータをクラスタ化することで打上げ能力向上につながる固体ロケットクラスタ化技術等も戦略的技術として検討が必要である。

なお、既存の液体水素エンジンについては、更なる高性能化によって機体サイズの小型化とそれによる低コスト化や運用性向上が期待されることから、継続的に研究開発に取り組むことが重要である。さらには、宇宙輸送能力の強化のために機体サイズが従来より大きくなることが予想され、大型機体を打ち上げるために液体ロケットエンジンの大推力化が重要である。さらに、衛星推進系や1段再使用機、軌道間輸送機等の低コスト化・効率化に有効なハイブリッドロケットを含む低毒推進薬技術の研究開発に継続的に取り組むことも重要である。

加えて、往還型宇宙輸送サービスに適した宇宙輸送システムの実現に向け、産学官で連携し、人材や技術の裾野を広げるべく、コア技術として基盤的な活用が見込まれる幅広いエンジン技術の検討が必要である。

④ その他の基盤技術

従来、地上で人の判断により行っていた飛行安全管理については、オンボード自律飛行安全技術を実用化することにより、ロケット機体側で自律的・自動的に判断を実施する自律飛行安全を実現し、地上の管制設備・管制要員・運用コストの大幅な縮減やロケット飛翔時の安全確保が期待され、非常に重要である。オンボード自律飛行安全技術については、我が国では、H3 ロケットや一部の民間ロケットへの適用が計画されており、民間ロケットなどに向けた自律飛行安全管理ソフトウェアを搭載した高機能な次世代航法センサの開発や大幅に事前解析作業を効率化する自律飛行安全のアルゴリズム、高性能搭載計算機の研究開発などを進める。また、アビオニクス機器や推進系部品・コンポーネントの低コスト化技術、小型化技術などこれまで我が国が基幹ロケットで培った技術を、民間ロケットを含めた複数のロケットで共通して利用することを可能にするとともに、機器の製造数量の拡大によるサプライチェーンの強靱化が重要である。さらに、将来の打上げの高頻度化に向けて、多くの計算時間を要する打上げミッション解析の自動化・共通化による高速化、[地上局の効率的な運用](#)や洋上での通信・管制システム、[衛星を用いたテレメトリシステム](#)による多様なミッションへの対応など、打上げ運用の効率化・高度化技術が重要である。加えて、発注から納入までに時間を要する大型の部品・コンポーネントの製造工程の短縮に資する、難加工・

特殊加工の効率化技術や、ロボット等による組立作業の自動化技術、効率的な品質保証技術等による製造プロセスの刷新が重要である。

また、打上げの高頻度化や打上げ価格の低減に寄与することが期待される再使用型ロケットを実現するためには、機体を地球上に帰還・着陸・回収し、機体の点検・整備を行うための技術が求められる。そのため、帰還時に必要な高耐熱を実現する熱防護技術、熱防御技術を研究開発するための検証や評価試験を行う極超音速風洞技術、極超音速から低速までの飛行性能を向上する空力設計技術、エンジンの繰り返しの実現する長寿命液体エンジン技術、機体を着陸に際して高度・水平位置・機体姿勢等の制御等を行う帰還時誘導飛行制御技術、帰還時の推進薬の挙動を予測する推進薬マネジメント技術、機体の異常やエンジンの健全性を検知し、余寿命や故障を予測するヘルスマニタ技術、着陸時の衝撃吸収性や転倒防止、エンジンの排気炎による加熱への耐性と、機体構造の軽量化を両立させる着陸機構技術を獲得することが非常に重要である。なお、再使用型ロケットは、機体を地上に帰還させるための着陸装置や追加的燃料、機体の回収・点検・整備プロセスが必要となることで、逆に製造費や燃料費が割高になる場合も考えられることから、コスト抑制や各種プロセスの効率化に同時に取り組むことが重要である。

再使用技術の獲得に向けては、上述の熱防護技術や推進薬マネジメント技術等の基盤となる技術の獲得に向けた研究開発を進めるとともに、小型実験機(RV-X)飛行実験及び日・仏・独が共同で実施するCALLISTO飛行実験を通じて、1段再使用の回収、点検、整備に係る技術とデータの取得を行う。さらに、次期基幹ロケットや民間による再使用型ロケットの実用化に向けた1段再使用のサブスケール飛行実証を行う飛行試験場の整備が必要である。加えて、洋上船舶への機体の安全な着陸と回収を実現させる洋上回収技術、及び帰還後の機体を再飛行できる状態にするため、機体の信頼性を確保しつつ、効率的に短期間で再打上げを実現する点検・整備技術の研究開発に取り組むことが非常に重要である。なお、再使用ロケットは、民間主導の開発も進むことから、射場、飛行試験場、洋上回収システムが共通的に利用可能となるよう、技術開発や標準化、設備整備を効果的・効率的に促進していくことが期待される。

さらに、宇宙空間の安定的・持続的な利用を確保する上で、宇宙輸送分野においては、ロケットに起因するスペースデブリの発生を抑制していくことが必要となっている。そのためには、軌道上のマニューバ・制御再突入をロケット機体側で自律的に実施することによりロケット上段の安全なリエントリを可能にするオンボード制御再突入技術、大気圏再突入時の落下物の熔融解析や落下損害予測数の解析を行う飛行安全解析技術、機構(テザー等)を用いて機体上段をミッション終了後に軌道離脱させるPMD(Post Mission Disposal)機構技術、軌道投入段に使用する固体モータが燃焼時に排出するスラグ低減技術が重要である。

⑤ 輸送サービス技術

宇宙における活動領域が拡大するにつれ、宇宙に運ぶペイロードが大型化・多様化し、宇宙輸送のルートも地上からのロケット打上げだけでなく、軌道間輸送や高速二地点間輸送など多様なニーズが登場することが見込まれる。このため、宇宙輸送サービスに関するイノベーションを積極的に創出することで、多様な輸送ニーズやユーザーに対応できる輸送サービス技術を獲得していく。

こうした輸送サービス技術の獲得にあたっては、民間ロケットが国内衛星打上げ需要に対応した上で競争力を強化していくことが必要であり、打上げ成功の実績を積み重ねつつ、打上げサービス拡充に向けたシステム機能の開発・実証や、信頼性向上・低コスト化・運用性向上に向けたロケットの設計・製造工程の改良といった開発・実証等を進めることが非常に重要である。

加えて、多様なペイロードの輸送を実現することは、喫緊の課題である基幹ロケットの競争力強化にも寄与することから、様々な衛星搭載形態に汎用的に対応をすることを可能にする複数衛星

搭載技術、フェアリング内へより多くのペイロードを搭載するための衛星許容包絡域の拡大や飛行荷重・環境を緩和させるペイロードインターフェース効率化技術、大型のペイロードの搭載を可能にするフェアリングの大型化技術が重要となる。

また、宇宙活動の領域が拡大し、その領域への輸送需要のニーズに対応していく上では、軌道間輸送技術を通じて構築していくことが求められる。地上からのロケット打上げと軌道間輸送を組み合わせた宇宙輸送ネットワークの構築は、月域や深宇宙への輸送能力を増強し、打上げ価格の低減や輸送機会の増加などにつながることを期待される。軌道間輸送技術については、我が国は、ISS への物資補給機である HTV(H-II Transfer Vehicle)の開発と運用、その後継である HTV-X の開発を通じて、軌道間輸送技術(ランデブー・ドッキング技術、高機動バス技術)を蓄積してきており、我が国の強みを生かした宇宙輸送ネットワークの実現に向け、軌道上で推進薬の貯蔵・制御・管理を行う推進薬保持・補給技術や宇宙船のランデブー・ドッキング技術、宇宙空間での輸送機の推進性能を更に向上させる高機動バス技術が重要である。

さらに、我が国から有人宇宙旅行などの輸送サービスを実現するためには、有人輸送技術を獲得することが求められる。国内実績が少ない有人輸送技術を段階的に成熟させるためには、まずは搭乗員を軌道上に送る技術を確認させるための環境制御装置や生命維持装置(与圧キャビン・与圧服などを含む)の基盤技術、搭乗員の安全確保にむけた異常検知や緊急退避の基盤技術が重要である。加えて、米国更には、軌道上のスペースシャトルや我が国の HOPE 等の経験搭乗員を踏まえ、点検・整備が容易で運用性の良い低コスト熱安全に地球に還す技術の獲得に向け搭乗部を対象とした熱防護技術素材や、帰還飛行における誘導制御の基盤技術の検討が重要必要である。また、これらの技術開発にあたって必要実証回数を低減させるための、信頼性・リスク評価技術の検討が必要である。その結果については関連技術の規格化・標準化で活用できるようにする必要がある。

また、宇宙船と搭乗員のインターフェースや与圧キャビンを開発するためのヒューマンファクターエンジニアリング技術、大気圏再突入において搭乗員を安全に地球に還す、総合的なシステム安全性評価技術を含む帰還技術の検討が必要である。

加えて、宇宙空間を経由して地球上の二地点を高速でつなぐ高速二地点間輸送の実現に向けた取組が求められる。このため、構造系や推進系等の技術開発に加えて、推進薬搭載と帰還時空力荷重の視点による機体構造を極限まで軽量化するトポロジー最適化設計技術、機体の着陸のための着陸脚やタイヤを設計・製造する水平着陸機構技術等が重要である。また、空気吸い込みエンジン利用を考慮した飛行経路作成自動化技術の検討が必要である。

⑥ 射場・宇宙港技術

多様な宇宙輸送サービスを我が国から実現させるためには、宇宙輸送の拠点となる射場・宇宙港について、打上げ運用、追跡管制、地上支援などの分野において抜本的な機能強化を図る必要がある。特に、民間事業者が主体となって開発する商業宇宙港の整備が本格化するにつれ、これまで我が国が基幹ロケットの運用を通じて培った技術・ノウハウを水平展開し、我が国全体として宇宙輸送サービスを支えることが求められる。

そのため、まず打上げ運用においては、射場・宇宙港におけるペイロードの組立点検整備、管理、打上げ環境予測やロケットへの搭載運用を安全かつ効率的に実施するロケット打上げ運用技術、打上げ時の無人化・安全確保を効率的に実施する射場安全確保技術、液化メタン等の新たな推進薬を使用とする場合の保安距離算定技術が重要である。また、打上げ時の各種の制約条件の解消に役立つ洋上打上げ技術の検討が重要必要である。

加えて、追跡管制や地上支援の高度化を通じて、民間主導のロケット開発運用にも共通的かつ

低コストで広く利用可能な基盤的技術を獲得していくことが必要であり、官民で基盤的技術の開発を推し進めることが求められる。追跡管制においては、ロケットのコマンドやテレメータを送受信する地上局の官民共同利用に向けた地上局の共同利用技術及び複数局の一体的な利用を可能とする技術、地上局の無いエリアを通過する軌道傾斜角への対応を実現する衛星や専用船を用いたテレメトリ技術が重要である。地上支援においては、射場で複数のロケットへの打上げへの対応を可能にするロケット・射場間のインターフェース共通化技術、打上げ時の射点や飛行経路の天候・風・氷結層等の環境を精度高く予測する打上げ時の環境予測精度の向上技術、テレメトリの送受信装置を小型化・可搬化・低コスト化し、複数のロケットで汎用的に利用することに向けた小型で汎用性の高いテレメトリ技術、極低温燃料の貯蔵・充填・排出等を安全かつ効率的に行う極低温推進薬制御技術等の開発が重要である。

さらに、宇宙機の帰還に際しての管制、安全確保、環境保護、帰還後の整備等を行う往還型宇宙港技術、射場・宇宙港におけるロケット燃料の生成を行うロケット燃料生成技術、ロケット開発において必要となる飛行実験場技術や燃焼試験場技術等も重要である。

なお、これらの射場設備や打上げ運用等に関する技術を実現する際には、射場における打上げ回数や打上げ頻度に関する具体的なビジネスモデルを前提条件として想定し、コスト面及び納期面（リードタイム短縮等）で国際競争力を強化できる技術を目指すべきである。そのような技術の一例として、複数事業者に対応したセットアップや管理・検証等のスマート化に係るシステム技術は重要である。また、その結果については関連技術の規格化・標準化で活用できるようにする必要がある。

最後に、宇宙港は、ロケットの打上げ拠点としてだけでなく、ロケット・宇宙機の帰還拠点として重要な役割を果たすとともに、周辺における観光・教育・体験、研究・創薬・材料などの様々な産業集積によって、新たな価値創造や地方創生を進める宇宙ビジネスのハブ拠点として期待される。このような相乗効果を生み出すためには、海外の宇宙港整備の事例を研究しつつ、宇宙輸送分野と他産業の間、及び宇宙港間のオープンイノベーションを積極的に創出する仕組みが必要であり、宇宙港価値創造技術として、周辺産業との連携・協業を促すことに取り組むことが非常に重要である。宇宙港については、国内で複数のスタートアップがロケットの開発を進めている。そのため、宇宙港におけるロケット打上げ運用や整備・組立等の本来機能を、安全性と信頼性をもって効率的に果たせる技術を向上させるとともに、企業の研究や教育拠点などの周辺産業との連携を通じて、更に技術的に高度な宇宙旅行などへ対応させることが求められる。このような取組を通じ、宇宙港を核に価値を創造し、地方創生へつなげ、宇宙産業におけるイノベーションを創出し、我が国の宇宙輸送サービスのハブ拠点へとつなげていく。



【図2：宇宙港の将来像】

(3) 今後の課題

i. サプライチェーンの自律性確保

ロケットに関するサプライチェーンリスクに関しては、関係企業 14 社(延べ 45 製品)に対してヒアリングを行った結果、産業基盤(生産基盤、試験設備、材料入手等)、技術基盤(量産化技術等)及び人的基盤(人材不足等)のそれぞれにおいて様々なリスクを抱えていることが判明した。

産業基盤については、部品・コンポーネントの生産設備の老朽化、部品・材料の枯渇、代替可能な製品の欠如、一社依存による供給途絶、事業の採算割れ(製造ライン維持に必要な数量不足)、海外製品への過度な依存、海外製品の価格高騰・長納期化・輸出許可手続・不利な条件の調達契約等のリスクを抱えていることが確認された。一方、技術基盤については、品質管理・品質保証の能力不足、各種試験設備の不足、部品枯渇に伴う代替品の再試験・再開発の負担、ロケットの量産化技術の欠如、まとめ生産する需要規模の不足、業界全体が利用できる部品に関するデータベース不足、ロケット製造や打上げオペレーションの自動化・省人化の遅れ等の問題が確認されている。また、人的基盤については、生産事業における後継者不足と事業撤退、民生品の宇宙適用に必要な環境試験や品質保証に関する技術者不足(非宇宙部品の耐放射線試験等)、部品の枯渇リスクを早期検知する体制不足等のリスクが確認された。

以上を踏まえ、ロケットに関するサプライチェーンリスクに係る課題を克服できるよう、関係府省・企業が連携して緊急性や重要性、困難性等の観点からの優先度を見極めつつ、サプライチェーンの自律性確保に向けた取組を中長期的な課題として進める必要がある。

なお、政府による取組を検討する場合は、複数のロケット事業者が共通的に使用できる部品・コンポーネント・データベース・試験設備であることなど、サプライチェーンリスクを業界横断的に軽減できる基盤性を有する部品等であることを評価軸として取り入れるべきである。

ii. 宇宙輸送分野の人的課題

我が国が宇宙輸送システムの開発を進める際、ロケットの設計・開発・打上げを着実に担うことのできる人的基盤の強化が不可欠となっており、開発人材の厚みが我が国の宇宙輸送サービスの国際競争力を左右する。このため、ロケット開発・事業化に取り組む民間事業者等への支援強化や、JAXAにおける官民共創活動や産学官連携の共同研究等を通じて、非宇宙分野からの人材の参画拡大や大学等からの宇宙業界への人材輩出・供給を含め、宇宙輸送システムを支える人材の量的拡大を図ることが非常に重要である。また、例えば、ロケットの研究・設計・開発・製造・打上げ・運用・デザイン・提供等に従事する学生・研究者・社会人が身につけるべきスキル(知識・能力・技能等)を宇宙スキル標準として定義し、作成された試作版を活用して人材モデルの標準的な指標として広く国内で参照できるようにするなどの取組が非常に重要である。

iii. 宇宙輸送分野の規格化・標準化

宇宙輸送市場のグローバル化に伴い、我が国の宇宙輸送産業が国際競争力を獲得できるようにするためには、宇宙輸送に係る各国の規制枠組みや安全審査基準、ロケット・人工衛星間や、[ロケット・人工衛星](#)と射場・宇宙港の間の技術インターフェース等について、国際動向を把握した上で、我が国における規格化・標準化の在り方を検討する取組が重要である。

～略～