

(案)

宇宙技術戦略(探査分野)
令和7年度改訂に向けた検討資料

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●月●日

宇宙技術戦略

1. 基本的考え方

(1) 策定の趣旨

「宇宙基本計画」(令和5年6月13日閣議決定)に基づき、世界の技術開発トレンドやユーザーニーズの継続的な調査分析を踏まえ、安全保障・民生分野において横断的に、我が国の勝ち筋を見据えながら、我が国が開発を進めるべき技術を見極め、その開発のタイムラインを示した技術ロードマップを含んだ「宇宙技術戦略」を策定した。

本戦略においては、「衛星」、「宇宙科学・探査」、「宇宙輸送」、加えて「分野共通技術」の分野について、安全保障や宇宙科学・探査ミッション、商業ミッション、また、それらミッションに実装する前段階の先端・基盤技術開発に加え、民間事業者を主体とした商業化に向けた開発支援について、開発の進め方や重要性を検討し、可能な範囲で示した。関係省庁における技術開発予算に加え、10年間で総額1兆円規模の支援を行うことを目指す「宇宙戦略基金¹」を含め、関係省庁・機関²が今後の予算要求、執行において参照していくとともに、最新の状況を踏まえたローリング³を行っていく。

(2) 重要技術の評価軸

開発の道筋を検討するに当たって、必要な宇宙活動を自前で行うことができる能力を保持(「自立性」の確保)するため、我が国の技術的優位性の強化に資する技術開発や、経済安全保障環境の変化を踏まえ、我が国の宇宙活動を支えるサプライチェーンが断絶するリスクを念頭に置いたサプライチェーンの強化(サプライチェーンの「自律性」の確保)に資する技術開発等を推進していく視点が重要となる。

このため、各分野において以下の評価軸に基づき、技術開発の重要性を総合的に評価した。

①衛星、分野共通技術

i. 技術的優位性

我が国の衛星産業の競争力の維持・発展の観点での重要性や、国内外市場における勝ち筋につながり得る技術を戦略的に支援していく。具体的には、機能・性能面、コスト・納期面での優位性、開発ステージにおける先行性、輸出可能性等を評価した。また、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技術、事業モデルを有するかについて評価した。加えて、現在技術成熟度の低い技術であっても将来的に競争力の発展等に重要な技術として先行する研究開発が必要な技術であるかどうか等を評価した。

ii. 自律性

我が国がシステムとして衛星開発を継続する上で、サプライチェーン上における重要性の高い技術とそれを支える施設・能力について支援していく。具体的には、当該技術のサプライチェーン上の代替困難度、調達自在性のリスクに加え、衛星システム構築のコア技術であるかどうか、衛星には通信、測位、観測、軌道上サービス、宇宙科学・探査等、ユースケースが広く存在するとこ

¹ 「輸送」「衛星等」「探査等」の3つの分野において、宇宙技術戦略で抽出された技術項目を参照しつつ、技術開発テーマを設定し、スタートアップをはじめとする民間企業や大学等が複数年度(最大10年)にわたって大胆に技術開発に取り組めるよう、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)に新たに基金を設置し、支援するもの。

² 内閣官房、内閣府、総務省、文部科学省、農林水産省、経済産業省、国土交通省、環境省、防衛省、JAXA、国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)等。

³ 宇宙技術戦略において特定された取組を実施しながら、継続的に最新動向等を踏まえた改訂を行うこと。

ろ、様々なユースケース実現への影響があるか、現在技術成熟度の低い技術であっても、将来的に上記の自律性の観点から重要な技術として先行する研究開発が必要な技術であるかどうか等を評価した。

iii. ユースケース

安全保障・民生分野横断的に、開発した先に当該衛星技術のエコシステムを支えるのに十分なユースケースや市場等が期待できるかについても評価した。技術的優位性又は自律性の観点で重要性が確認できる技術開発についても、本評価軸も比較衡量の上、支援について検討する。

②宇宙科学・探査

i. 技術的優位性

世界的に見て独創的な科学的アイデアの実現に必要な特長ある技術や、独創的・先鋭的な宇宙探査のための技術、国際協力ミッションにおける我が国の役割分担の履行のための技術について支援していく。具体的には、当該技術がコアとなって実現されるミッションの成果が科学的に高い評価を得られるか、又は機能・性能面で優位であるか(今後、優位性を獲得し得るか)、国際協力ミッションに関する技術については、当該技術がコアとなって実現される国際貢献により我が国のプレゼンスを発揮・向上できるかについて評価した。

なお、先端的な科学的成果を得るために、まず、独創的な科学的アイデアを広く集め、基礎研究段階からの育成や必要な要素技術開発を行う。宇宙科学・探査ミッションとして具体化する段階に当たっては、世界的な科学的成果が得られるか、コスト・納期面を含め技術的に実現可能性があるかという観点から、スクリーニングやステージゲート等により評価した。

また、将来の地球低軌道活動や持続的な月面活動等が段階的に進展していくことを見据え、開発した技術が、その技術的優位性を活かして、将来の活動の進展に応じた基盤整備や市場創出等につながる可能性があるかどうかについても評価した。

ii. 自律性

宇宙科学・探査ミッションは、独創的なアイデアを実現する観点から一点物が多く、技術によっては必ずしも広い市場が見込めない場合もあるが、我が国において継続・発展させていくためには、サプライチェーン上における重要性の高い技術とそれを支える施設・能力について、企業と研究開発機関で適切に役割分担しつつ、継続的に支えていく必要がある。

具体的には、当該技術のサプライチェーン上の代替困難度、調達自在性のリスクに加え、システム構築のコア技術であるかどうかを評価した。また、当該技術を開発する企業や研究開発機関が、技術の維持・開発リスクを低下させるため、技術開発プロジェクト計画の早期の明確化や要素技術の先行的な研究開発、商業分野や国際市場への展開、当該技術を支える施設や能力の維持、必要に応じて海外に協力を求める場合にも戦略性を持って行う等、国内需要を支える意志や計画を有するかについても、評価した。

iii. 緊要性

これらに加えて、宇宙科学・探査の分野においては、緊要性を評価した。具体的には、これまでに国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)を中心とした科学コミュニティ等での検討を踏まえ、既にミッション化しているものや、国際的な枠組みの中で、我が国として研究開発することをコミットしているもの等が挙げられる。

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。

(3)技術開発支援の在り方

世界における競争環境が厳しくなる中、我が国の国内需要は部品産業を含めたサプライチェーンを維持するには不十分であることから、国内の技術開発プロジェクトや政府需要の機会を、国内市場のみならず国際市場への展開のために戦略的に活用していくことが重要である。このため、当該技術を保有又は今後保有しようとする企業等が、国内需要を支え、国内市場を拡大させるとともに、国際市場で勝ち残る意志と技術、事業モデルを有するかを確認し、重点的に育成・支援していく。

評価軸を踏まえてスクリーニングされた重要技術については、国は技術開発計画の早期の明確化等により、技術開発投資の予見可能性を高めるとともに、先行的な研究開発を含め必要な技術開発を支援し、必要に応じて国産コンポーネントの開発とそれを支える施設・能力についても支援を実施していく。技術実証を行うに当たっては、失敗を恐れず、高頻度で宇宙実証を行うアジャイルな開発手法を取り入れていく。加えて、可能な限り民間事業者からサービス・財を調達することで、民間事業者の投資を促進する好循環を形成していく。

(4) 策定プロセスとローリングの在り方

本文書を取りまとめるに当たっては、衛星、宇宙科学・探査、宇宙輸送のそれぞれの技術分野について、衛星開発・実証小委員会、宇宙科学・探査小委員会、宇宙輸送小委員会において専門的議論を深め、それに基づいて、宇宙政策委員会・基本政策部会において、宇宙技術戦略の全体を取りまとめた。関係省庁の参画の下、安全保障・民生分野横断的に議論を行い、執筆に当たっては、産学官・国内外における技術開発・実証、人材、技術情報等における結節点として、JAXAからの技術的支援も受けた。それぞれの技術分野について、技術・産業・人材基盤の維持・発展に係る課題について検討し、宇宙技術戦略の策定に当たって参照していくため、官民プラットフォームや業界・学術団体からも意見聴取を実施した。

欧米の宇宙開発機関や政府においては、地域・国全体で一貫した産業基盤支援を実施するため、産学官のステークホルダーを巻き込み、先端・基盤技術開発から商業化に至るまで、技術戦略・ロードマップを策定し、ローリングを行っている。

ローリングを行うに当たっては、こうした事例も参考にしながら、個別技術分野に係る国内の英知を結集し、本文書をベースに戦略的議論を深めていく。例えば、毎年度、ローリングの重点テーマを検討・決定し、世界の技術開発トレンドやユーザーニーズについて調査分析を実施し、最新の調査と予算の状況等を踏まえたアップデートを実施していく。その際、文献調査の実施に加え、本文書について官民プラットフォームや業界・学術団体等の意見を聴取する。また、必要に応じて情報提供依頼(RFI)等も活用し、本文書のローリングを実施していく。

2. 宇宙科学・探査

I. 宇宙物理分野

(1) 将来像

宇宙物理分野においては、宇宙の起源や進化の理解、生命の可能性の探求を主要な目的としている。宇宙初期のインフレーション現象(宇宙空間の急激な膨張)を検証する研究や、天の川銀河を含む銀河・銀河団など宇宙の構造形成、生命を生むに至る化学組成の進化や惑星の形成過程、太陽系以外の惑星系の在り方を理解する研究を発展させて、宇宙の理解や、ダークマターやダークエネルギーの正体解明を目指す宇宙科学ミッションが国内外で実施・計画されている。

2040 年頃までには、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)の後継計画など、超大型宇宙望遠鏡プロジェクトが、我が国を含む国際協力によって進展することが期待される。並行して、各国では超大型だけではカバーできない様々な波長の電磁波や重力波などの観測ミッションも多数実施・計画されている。我が国において、宇宙物理分野における尖鋭的な中・小型計画を戦略的に実施し、海外の大型宇宙望遠鏡や地上の望遠鏡群と効果的に連携することで、初期宇宙から現在に至る進化、太陽系外惑星における生命の存在条件、宇宙の極限環境における高エネルギー現象に関する理解が進展する。

(2) 環境認識と技術戦略

海外の旗艦ミッションでは、「より遠くまで、より鮮明に」観測することが特に重視されている。例えば JWST は、1990 年から稼働するハッブル宇宙望遠鏡と比して数倍の面積の主鏡等により、高い集光力・解像度を実現し、科学史に残るような顕著な成果を挙げつつある。国際的に見ると、このようにミッションの大型化・高精度化が進み、旗艦ミッションでは予算が数千億円から1兆円を超える大規模なものとなっている。同等のミッションを我が国単独で実施することは極めて困難であるため、今後はこれらの国際大型計画に存在感を持った形で参画を進めることが、一層重要となる。そのため、NASA や ESA 等の海外宇宙機関の情報を積極的に収集しつつ、長期戦略の立案、先行的な技術開発・宇宙実証、JAXA と理工が融合した科学コミュニティが一体となった国際協力体制の構築等、積極的な事前準備を行う必要がある。

また、我が国の強みや特徴ある技術を発展させ、日本独自の尖鋭的な中・小型計画を実施し、国際大型計画だけでは開拓できない波長域での天体観測や、広域サーベイ・即応観測等を通して、これまでの宇宙観を改めるような、革新的な成果創出を目指す。

① 宇宙用冷却技術

i. 環境認識

宇宙物理分野で求められる、「より遠くまでの、より鮮明な」観測の実現には、宇宙望遠鏡により電波、赤外線、可視光、X/γ 線など様々な波長域での微弱な放射を高感度に観測することが必要となる。また、より長期間にわたる観測の必要性も高まっている。これらの実現には、大面積の望遠鏡、検出器の高感度化、冷却技術やデータ処理技術の高度化といった方法が有効である。

我が国は、冷却技術に関して、JAXA と国内企業の共同により、約 30 年にわたって技術と実績を蓄積してきた。液体ヘリウムなどの冷媒を用いた冷却システムは、その冷媒が枯渇すると、高感度の観測ができなくなる。ミッションの長寿命化を図る上では、冷媒を使わず、気体の膨張圧縮を用いる機械式冷凍機等の手法が必要であり、X 線分光撮像衛星(XRISM)等において我が国の技術が使用され、高感度な観測を実現している。海外では、欧米や中国が、この手法の研究開発を進めている。現状、数 K 級の機械式冷凍機では、我が国が先行している。他方で、広範な温度対応に課題がある。

ii. 技術開発の重要性と進め方

冷却技術は、高感度な観測を実現する上で、非常に重要である。これは、望遠鏡全体の冷却による放射雑音の低減や、検出器を冷却することによる、回路素子由来の熱雑音の低減を可能とする技術である。高感度・長寿命での観測による我が国の優れた宇宙物理ミッションを実現するとともに欧米ミッションへの機器展開につなげるため、冷凍機 1 台当たりの能力向上(低温化と大冷却能力化)を目指し、世界トップレベルの機械式冷凍機の開発を進める。

具体的には、我が国の技術・実績を生かし、これまで課題となっていた広範な温度に対応すべく、数 10K 級の冷凍機の長寿命化とともに、数 K 級の冷凍機を開発し、宇宙での実証を行う。また、将来的には 1K 以下級の冷凍機の実現を目指す。これらを支える上で、断熱/伝熱/蓄熱を可能とする材料、放射冷却の積極的利用、それらを統合する熱設計技術等の研究開発も進める。

② 観測技術

A. 宇宙用センサシステム技術

i. 環境認識

我が国は X 線/赤外線天文衛星を始めとする宇宙科学ミッションを多数実現してきており、宇宙用センサシステム技術に関して、更なる高機能化や多波長化が求められている。これまで、近赤外線センサは限られた米国企業のみからしか調達できなかったが、一部の波長帯では国内企業もこれに比肩し得る検出器の開発を進めている。なお、X 線分野では、広帯域かつ微弱な X 線を観測する上で重要な低雑音駆動や軌道上・地上でのデータ処理系等、先駆的なセンサシステムを実現してきた。

ii. 技術開発の重要性と進め方

宇宙用センサシステム技術は、宇宙空間での高感度観測と地上でのデータ解析を可能にする一貫したシステムとして、センサの駆動・信号処理技術、評価・試験技法も含め、自在な宇宙観測を継続的に発展させるものであり、重要である。国内外の最先端コンポーネントを結集させることでシステム技術を維持・強化するとともに、センサシステムのキーとなる検出器技術において、国内で独自かつ優れた検出器技術を発掘・強化し、オリジナリティの高いミッション実現と国際協力における日本の独自性の強化を目指す。

B. 系外惑星観測技術

i. 環境認識

太陽系外惑星(我々の太陽以外の恒星を周回する惑星)の観測は、現代天文学の中心的課題であり、宇宙における太陽系や人類の科学的位置付けを探求し、地球外生命の可能性を検証する全人類的な意義を持つ課題である。

欧米では JWST を含む多数の系外惑星ミッションが運用・計画されており、系外惑星分野は次の主流の一つとして目されている。一方、我が国は系外惑星ミッションの実績が無く、欧米に大きく遅れている状況にあるが、我が国において、系外惑星観測に端緒を開くべく、有用な近赤外線の高安定性・高精度測光観測技術や惑星分光観測衛星「ひさき」等を発展させた独自性・空間分解能の高い紫外線望遠鏡観測技術について、小型計画での実証に向けて検討が進められている。また、高安定性・高コントラスト(明るい天体の周辺の暗い天体を検出する能力)観測技術に関しては、グレース・ローマン宇宙望遠鏡計画、系外惑星大気赤外線分光サーベイ衛星計画(Ariel)に参加し、光学素子を提供する。一方、欧米では JWST を含む多数の系外惑星ミッションが運用・計

画されている。系外惑星分野は次の主流の一つとして目されているが、我が国は系外惑星ミッションの実績が無く、欧米に大きく遅れている状況にある。

ii. 技術開発の重要性と進め方

系外惑星観測技術は、我が国において独自の取組を進めつつ、国際協力を通じた大型計画への参加に向けた技術開発の検討が必要である。紫外線等の将来的に有用な波長域の観測センサ技術や高安定性・高コントラスト観測技術の研究開発を進めるとともに、小型計画での搭載、海外リードの計画への小規模機器提供などを通して、着実に実績の獲得を図る。これらを通じて、系外惑星及びより広い分野のミッションのセンサシステムへの応用や、NASA が 2040 年代の打上げを目指して進める紫外線・可視光・近赤外線波長帯をカバーする超大型宇宙望遠鏡計画の [Habitable Worlds Observatory \(HWO\)](#) に存在感を持って参加することを目指す。

③ 軽量化・高精度制御技術

i. 環境認識

「より遠くまで、より鮮明に」という要求から、望遠鏡の有効面積は増大し、ミッションが大型化する傾向にある中、限られたペイロードの中において、望遠鏡の軽量化や高精度化が一層求められている。

軽量化・高精度制御技術の実績の例には、科学衛星では、赤外線天文衛星「あかり」(ASTRO-F)、太陽観測衛星「ひので」(SOLAR-B)の両衛星に搭載した高精度望遠鏡が挙げられ、軽量鏡面材及び副鏡の制御機構を実現している。大型分割鏡に鏡面の形状制御機能を取り入れた JWST が大きな科学的成果を挙げていることを踏まえ、今後の国際共同ミッションで重要な役割を果たす上でも、軽量・安価かつ高精度な望遠鏡を実現する技術を保持しておくことは戦略的に有効である。

ii. 技術開発の重要性と進め方

軽量かつ望遠鏡の鏡面の精度補正制御機能を搭載した宇宙望遠鏡の実現に向けた技術開発を検討する必要がある。より大型かつ高精度な観測が可能な宇宙望遠鏡を実現するキー技術として、軽量素材を活用した鏡の形状や位置を可変とし、温度変化や経年劣化による観測精度の劣化を補正できる宇宙望遠鏡の実現を図る。今後の我が国の宇宙望遠鏡ミッションに、プログラマ的に適用することを念頭に、個々の技術を共通技術として蓄積し、複数の小型計画への適用を進め、将来の能動制御セグメント鏡から成る大型宇宙望遠鏡を実現するための基本技術の獲得を図る。

④ 精密協調編隊飛行技術

i. 環境認識

精密協調編隊飛行は、単一の宇宙機の物理サイズを越えた先鋭的な宇宙科学・探査の実現を目指すものであり、宇宙の始まりを直接観測する重力波干渉計(宇宙干渉計:宇宙空間で複数のアンテナを組み合わせると一つの望遠鏡とする観測方法)や、赤外線干渉計による系外ハビタブル惑星(生命を育む環境にある太陽系外の惑星)の直接探査といった刷新的な科学観測を可能とするが、これらを実現するためには、従来の地球 [測地](#) 観測用と比べて、更に精密な協調制御等が求められる。

我が国は、技術試験衛星 ETS-7 でのランデブー・ドッキング技術の実証等を通じて高精度編隊

飛行技術を先駆的に獲得してきた。NASA や ESA 等は 0.1～1 ミリ級の制御精度を目指した宇宙科学・探査ミッションの軌道上実験開発を進めている。我が国では近年、レーザを用いた測距・測角技術と組み合わせ、刷新的な科学観測を可能とする1マイクロメートル以下の超精密な編隊飛行制御の実現を目指しており、他国の既存計画・構想に比べて3桁程度、制御精度の改善を目指している。1マイクロメートル以下の制御精度を達成することで、レーザ光や天体からの光を物差しとして利用し、時空宇宙空間等の微弱な変化や系外惑星からの熱放射を捉えることができる。

ii. 技術開発の重要性と進め方

精密協調編隊飛行技術は、昨今の世界的な装置大型化の潮流とは異なり、我が国の限られたリソースやこれまでの技術知見を活用できることから、高精度協調運用技術を更に発展させた精密協調編隊飛行技術の開発を世界に先駆けて段階的に実施することで、当該分野における我が国の優位性の獲得を目指すことが重要である。

技術要素として、測距技術、測角技術、精密協調制御技術、低擾乱制御技術の中で、特に精密協調制御技術に焦点を当て、世界的にも前例の少ない精密協調編隊飛行技術を検証する地上試験設備を先行して構築し、今後、技術実証により得られた軌道上データを設備環境に反映することで、本格的な観測ミッションに向けた検証環境の高度化より軌道上に近い状態を模擬することを目指す。そのための前段階として、まずは高精度協調運用技術の高度化を行う。

⑤ データ解析技術

i. 環境認識

宇宙物理分野の研究には、大量の観測データの取得と解析を要する。大量のデータへのアクセスを容易にするため、海外ではクラウド上において観測データのアーカイブ・解析を行うプラットフォームの計画・実装が進められている。AI 等の情報科学技術を活用した高度なデータ解析技術について、国際競争力のあるプロダクトが生み出されており、我が国でも技術蓄積が進んでいる。一方、データ整備技術に関して、データ処理パイプラインの開発・運用含め、各機器関係の研究者といった限られた人材に依存し、研究成果創出の迅速化に影響を及ぼすといった課題もある。

ii. 技術開発の重要性と進め方

科学衛星・探査機で収集された観測データについて、科学的成果の創出を加速するとともに、データの利用価値、ビジビリティ（認知度）の向上を図る上で、データ解析技術の獲得に向けた検討が必要である。大量の観測データへのアクセスを様々なレベルのユーザーにとって容易にする統合的なプラットフォーム技術の開発・整備を進める。統合的なプラットフォームを実現することにより、オープンサイエンスの観点を含め、ミッション成果を広く一般社会へ還元する。さらに、当該技術に関して産官学の積極的な連携により、最新の情報科学技術を取り入れながら、データ解析技術の高度化を進め、科学的成果の最大化を図る。また、これらの取組を支える上で、データの効率的・効果的な生成プロセスを実現するデータ整備技術の開発も進める。

(3) 今後の課題

JWST の成功も踏まえ、今後も欧米中による大型望遠鏡計画が進行している。これに対して、我が国の主導する宇宙物理学ミッションは、世界的に見れば中・小型計画にとどまり、かつ JWST のような超大型国際プロジェクトへの参加も実現していない。観測手法・科学目的の多様性も増しているなか、限られたリソースのなかで、国際協力も選択肢に含めつつ、我が国独自の尖鋭的なミッ

ション創出能力を維持・発展させることが、今後の我が国の宇宙科学を飛躍させる上で不可欠である。

II. 太陽系科学・探査分野

(1) 将来像

太陽系科学分野は、太陽系と生命の起源と進化を解明することを目指しており、各国の惑星・小天体探査を通じて科学的知見の蓄積が進む。月においては、地殻物質や内部構造の調査、月面からの電波観測により、月の起源や宇宙の進化に関する科学的知見を深めていく。火星においては、表層・内部、起源に関する理解が進展し、生命の痕跡となる有機物の発見の可能性もある。また、小天体・彗星のサンプルリターンや木星以遠の惑星・衛星の観測が進む。また、太陽や磁気圏等の太陽圏の観測により、恒星の活動が地球のような生命が生存できる環境の実現とどのように関連しているか、総合的な理解を深めていくことで、太陽系の形成過程や生命の起源に関する理解が飛躍的に進む。また、これらを通じて、宇宙科学や人類の活動領域を拡大するための技術獲得が進展する。

(2) 環境認識と技術戦略

将来人類が居住できる可能性がある火星に関して、米国、欧州及び中国は、いずれも、火星からのサンプルリターンという大型計画に取り組んでいる。我が国においても、火星衛星からのサンプルリターンを目指し、火星衛星探査計画(MMX)探査機の打上げを予定している。これまで我が国は、未開拓な分野を研究対象に据え、必要な工学技術を磨くことで、理工融合による先端的な研究成果を上げてきた。小惑星探査機「はやぶさ」シリーズは、その代表例であり、我が国独自で磨いた技術でサンプルリターンを実現し、世界でも高く評価される成果を上げた。一方、今後、他の国々がサンプルリターン分野に参入する中で、我が国の優位性が相対的に低下するおそれもある。

我が国が今後も世界的に評価される高度な研究成果を創出するには、萌芽的な基礎研究の中から、独創的な研究領域や先鋭的な技術を見出し、開拓・開発・[宇宙実証](#)することで、我が国の新たな強みとして育てていく必要がある。具体的には、我が国が強みを持つ小天体探査については、「はやぶさ」シリーズで獲得した世界でのリーダーとしての地位の維持・向上を図る。探査機を更に高度化し、サンプルリターンを行う次世代の小天体探査のミッションの対象や手法について具体的な検討を行う。また、強みを活かした国際協力等により、彗星などの海外主導の大型探査計画への中核としての参画について検討を進める。加えて、太陽観測・太陽圏科学分野でも引き続き先鋭的な観測技術・手法の検討を図る。同時に、アルテミス計画との連携を視野に、月及び火星について科学的成果の創出及び技術面での先導的な貢献を図る。

① サンプルリターン技術

i. 環境認識

サンプルリターン計画は、日本が世界に先駆けて、「はやぶさ」(第 20 号科学衛星 MUSES-C)で小惑星のサンプルを持ち帰ることに成功したことにより、惑星探査分野において、大きな変革を起こした。現在、サンプルリターン計画として、MMXを進めている我が国は、この分野を強く先導する立場にあり、技術を更に高めていかなければならない。

本分野において現状、「はやぶさ」シリーズの成果により、我が国がフロントランナーとして実績を有している。今後のミッションとしては、MMXに加え、長周期の小天体からのサンプルリターンや外惑星(スノーライン以遠)での[多様なフライバイ](#)サンプルリターンが検討されている。国際協力の要請も多くあり、サンプルリターンミッション分野において、国際的な評価・プレゼンスは高い。一方、海外では、NASAの小惑星探査機オサイリス・レックス(OSIRIS-REx)が帰還したことや、火星サンプルリターン(MSR:Mars Sample Return)計画が進行中である。また、米国の今後の戦略において

は、火星、月、小惑星からのサンプルリターンについて複数の構想が示されている。その宇宙探査は圧倒的な規模であり、急速に能力を高めつつある状況である。

ii. 技術開発の重要性と進め方

サンプルリターンカプセルやキュレーションに係る技術は、世界的にも高い評価を得ており、国際協力の依頼も多く、国際的なプレゼンスを強力に発揮できる分野となっており、これらを始めとするサンプルリターン技術は、非常に重要である。重要な技術要素としては、「天体のサンプルを獲得し確実に保管する技術」、「惑星間軌道から直接地球大気圏に突入できるサンプルリターンカプセル技術」、「地上での回収技術」、「帰還サンプルの分析技術(キュレーション技術)」である。また、共通の技術課題として汚染管理技術が挙げられる。これらの技術に関して、国内で継続的に計画されるサンプルリターン計画に加えて、これらの鍵となる技術をもって、国際共同ミッションにも積極的に参画していくことで、技術レベルを高め、我が国の優位性を確立していく。

② 超小型探査技術

i. 環境認識

2014 年に「はやぶさ 2」(第 20 号 科学衛星 MUSES-C)と相乗りで打ち上げられた超小型深宇宙探査機(PROCYON)は、50 kg 級の超小型探査機バス技術を実証するとともに、科学的成果も上げ、地球低軌道における超小型衛星の技術を応用し、深宇宙探査の可能性を切り拓いた。PROCYON に続き、更に小さな CubeSat 級の探査機(超小型探査機(OMOTENASHI 及び EQUULEUS))が、2022 年に NASA の新型ロケット SLS により打ち上げられ、超小型探査機の更なる能力拡大に資する成果を得た。世界で初めて CubeSat として火星圏での運用に成功した NASA の MarCO 等、世界中で超小型探査機の小型軽量化と到達領域の拡大が図られてきた。SLS ロケットにおける相乗り CubeSat の低いミッション成功率を踏まえると、深宇宙は依然として挑戦的な領域である一方、超小型探査機に係る技術と経験を蓄積してきた我が国は技術的に優位な立場にある。

特に、「はやぶさ2」等の惑星間航行により獲得した高度な深宇宙軌道解析能力を前提として、多数の超小型探査機を小惑星と地球に交互に接近する特殊な軌道に投入し、プラネタリーディフェンスや小惑星資源探査等を念頭に、地球近傍に飛来する任意の小惑星等を即応的かつ高頻度に直接探査する我が国発のフライバイサイクラー技術等を応用したアイデアが注目を集めている。

ii. 技術開発の重要性と進め方

地球周回軌道で活用されている超小型衛星の技術は太陽系探査に応用されている。小型・軽量で低コストかつ短期開発が特徴であり、遠方領域への到達、探査対象天体での子機としての高リスクミッション、月近傍を含む深宇宙での高頻度探査、コンステレーション構築など、様々な活用が期待されている。我が国の優位性を維持・拡大し、独創的な視点で国際的に大きな存在感を発揮するとともに、人材育成や産業振興に寄与する観点からも、超小型探査技術を高度化することは非常に重要である。要素技術として長寿命化、超長距離通信、超軽量電源、超小型推進系等のバスの能力の拡大とともに、自律的誘導制御、軌道決定、探査機間通信、自律分散的意思決定等の複数機のネットワーク運用技術(地上局運用の効率化含む)について、多様な実証機会を活用した太陽系のより遠方領域への到達を目指した技術開発や、複数機の超小型探査機による連動した運用を目指した段階的な技術開発及びシステムとしての軌道実証を進めることが必要である。また、超小型探査機の特性を踏まえた信頼性の確保も含め効率的な S&MA(ミッション保証)・SE(システムズエンジニアリング)/PM(プロジェクトマネジメント)の在り方の検討及び確立や、

JAXA・大学におけるインハウス開発で蓄積してきた技術・経験のメーカへの技術移転によって、今後の超小型ミッション推進に必要な体制を我が国に構築していく活動も進める。

③ 大気突入・空力減速・着陸技術

i. 環境認識

月・火星のような、重力天体・大気重力天体で自立的に活動を行うためには、それらの天体表面への輸送手段は必須である。

火星などの大気重力天体で必要となる大気圏突入・空力減速技術は、「はやぶさ」のサンプルリターンカプセルなどの数例の実績しか有していない。その中には、次世代の大気圏突入システムとして期待されている展開型エアロシェルがある。これは、国内において、独自の開発が進められ、実証試験が行われるなど、世界的にも競争力があるユニークな技術である。火星探査については、現状は、米国の独壇場であり、1970年代のバイキング計画を皮切りに多くの探査機を火星表面に送り込んでおり、2021年には、質量1tを超える探査機(Perseverance)を、空力誘導技術、超音速パラシュート、逆噴射によるスカイクレーン技術を駆使し、安全に着陸させることに成功している。その間、欧州、ロシア、中国も、火星着陸に挑戦しているが、その成功率は低く、中国が2021年に「祝融号」を着陸させたのが、米国以外での唯一の成功例である。

ii. 技術開発の重要性と進め方

大気突入・空力減速・着陸技術は、大気圏突入・空力減速・着陸技術(EDL(Entry, Descent and Landing)技術)と呼ばれ、非常に重要である。EDL技術について欧米中に対しては遅れている我が国において、強みを生かした独自性のある技術を伸ばしていく必要がある。小型月着陸実証機(SLIM)のピンポイント着陸技術(着陸したい場所に着陸する技術)は、世界でも注目されている特徴的なものである。ここで得られた実績に基づいた更なる着陸天体・場所に適した相対自律画像航法技術、航法センサの開発等を通じて、国際宇宙探査における月探査等で獲得する技術との相互活用も含めて洗練・発展させていく。火星着陸においては、欧米中が指向している従来型の重厚長大な探査に対して、我が国は次世代の大気圏突入技術であり、火星のような薄い大気環境で有効な展開型エアロシェル技術を活用し、目標地点への到達精度の向上のための技術開発を進める。これにより、フットワークの軽い高頻度な新たな火星着陸探査の世界を開拓するなど、我が国の特徴ある技術を生かした独自の探査手法を、国際的に提案・提供していくことを目指す。また、安全に物資を輸送するために、月探査での技術も活用し、小型ローバ技術との連携も含め逆噴射推進系技術等の高精度着陸技術の検討を進める。EDL技術は難易度が高く、技術実証が必須であるため、早期での地球低軌道実証や、火星着陸探査プログラムを計画し、当該技術を段階的に獲得していくことが重要である。

④ 深宇宙軌道間輸送技術

i. 環境認識

深宇宙輸送が可能な国は限られており、惑星間「往復」航行に至っては日米のみが実現している。一方、シスルナ以遠を目指す民間企業も現れる中、NASAのSLSロケットや、SpaceX社のStarshipのような大量輸送では投入軌道の制約があるため、低コストかつ信頼性が高い深宇宙への輸送ニーズや、月や火星への多様な個別輸送ニーズも潜在していると考えられる。米欧中が大型かつ個別の探査機開発にリソースを割く中、火星往還の本格化も見据えて、本技術を産業基盤とともに維持・向上することで、我が国による宇宙航行の自律性・自在性を確保するとともに、現在、ブルー・オーシャンである深宇宙輸送サービス市場に早期に参入し、先行者利益を確保しつつ我

が国の国際影響力を強化につながることを期待できる。

ii. 技術開発の重要性と進め方

多様な軌道間の航行・運用を行い、各種の衛星や軌道上拠点等のインフラ整備、小型宇宙機の集団輸送等、あらゆる宇宙システムの効率的な物流手段として革新をもたらし得る軌道間輸送機(Orbital Transfer Vehicle: OTV)について、ランデブー・ドッキング技術といった我が国の競争優位性も踏まえながら、シスルナ以遠を含めた多様なニーズ・ユースケースを念頭に拡張性・汎用性ある軌道間輸送技術確立し、早期のサービスインが期待できる静止軌道を含むシスルナ領域を中心とした用途での開発を推進することが非常に重要である。特に、GPS がない宇宙空間では、自在な輸送を実現するために、我が国の強みである高自律性の深宇宙飛行制御技術を活用して、分離・結合・周回・滞空に必要な高精度誘導航法の要素技術を獲得する。さらに、輸送、衛星等の他分野との連携・シナジーを図りつつ、多様な軌道での共用化が可能な輸送システム技術の獲得により、著しい部材高騰等の環境においても多様なミッションでの低コスト化の実現が可能となり、我が国の宇宙飛行の自律性・自在性確保とともに、産業基盤を効率的に発展・維持していくことができる。将来的には、我が国の基幹ロケットで月や火星など多様な目的天体へ輸送する深宇宙輸送ビジネスや国際分担の獲得も視野に入れる。また、深宇宙輸送において、化学推進系の性能向上、電気推進(イオンエンジン等)、太陽光推進(ソーラー電力セイル)等、これまでの我が国の強みとなる技術の維持・発展も図る。

⑤ 表面等探査技術

A. 大気・表層・磁気圏等観測技術

i. 環境認識

惑星大気・表層物質分析のためのイオン質量分析器と高分解能質量分析システムに関して、我が国は独自技術を持ち、国際的な競争力を有する。中間赤外イメージングカメラについては、民生品としての広範な使用経験を基に、宇宙搭載器としての品質保証や宇宙環境適用性の知見が存在し、国際的にも高く評価されている。また、プラズマ・高エネルギー荷電粒子・観測と電磁場観測は双方とも欧米に劣らない技術を有しており、特に双方が連携してプラズマ波動とプラズマ粒子の間のエネルギーの授受を直接計測する波動粒子相関器は日本として発展させていくべき特長ある独自の技術である。

ii. 技術開発の重要性と進め方

科学・探査ミッションの成果は観測機器を通じて得られる面が大きく、火星や彗星など多様な天体を探査するためには、着陸探査及びフライバイ・ランデブー観測に必要な質量分析器や中間赤外イメージングカメラ等、太陽圏の構造や変動を理解するためにはプラズマ・高エネルギー荷電粒子・中性粒子、電磁場の観測といった大気・表層・磁気圏等観測技術が非常に重要である。民間・大学が保有し、我が国の強みとなっている、小型で高性能な探査技術の活用を図る。惑星大気・表層物質の分析においては、質量分析器の小型軽量化と高性能化等を進めるとともに、中間赤外イメージングカメラに関しては、国産センサの開発が戦略的に重要であり、着陸機やローバへの適用性を含めた高性能化、軽量化、低コスト化を目指す。プラズマ・高エネルギー荷電粒子・中性粒子、電磁場観測技術については、小型・超小型衛星への搭載を視野に入れて小型軽量化と高性能化を進める。また、火星探査に向けては、火山大国の我が国で培った地下の水やマグマの動態を探る磁場計測技術、気象・地形観測技術等~~の~~を活用を通じてすることで、未踏かつ付加価値の高い分散的な場所からのデータを獲得することで、ユニークな科学的成果の創出を目指す。

B. 惑星保護技術

i. 環境認識

惑星保護技術は、惑星保護について宇宙条約及びそのガイドラインとしての機能を果たしている COSPAR 惑星保護方針といった国際的な規範を遵守しつつ、アストロバイオロジー(宇宙生物学)、惑星形成論に関わる挑戦的なミッションを実現していく上で基盤となる技術である。

我が国は、惑星保護技術の要素技術の開発に着手した段階であり、滅菌・微生物汚染管理設備を有していない。一方、NASA は、1970 年代に実施されたバイキング計画において、既に、微生物汚染管理下で、火星着陸探査を行っている。現在進行中の Mars2020 計画等では、更に高度な惑星保護技術を適用したミッションを実施し、アストロバイオロジーに資する各種その場分析を行っている。NASA、ESA 両宇宙機関は、設備基盤・運用体制が確立しているが、更なる要素技術向上を目指した技術開発が行われている。

ii. 技術開発の重要性と進め方

惑星保護技術を保有しない場合、火星・深宇宙を対象とした生命生息可能性がある天体への探査ミッションに制約が生じるにとどまらず、これらの天体を対象とした国際協力での探査においても、我が国の搭載機器提供が困難となるため、当該技術を我が国において確立することは、非常に重要である。当該技術に関して、組立・試験・輸送・射場に至るまでの清浄度管理されたクリーンルーム、微生物検査を行う実験設備の整備、要素技術の確立とシステム化を進めるとともに、人材の育成、運営体制について、現実的で段階的な構築を目指す。

(3) 今後の課題

現状の強みである小惑星等のサンプルリターン探査は、我が国にとって必要となるリソースと期待される成果とのバランスが取りやすい分野であり、今後も競争力の向上に努めることが重要である。これに加え、ミッション領域を拡張する観点から、重力天体、さらには外惑星域の本格探索等への取組が考えられ、それに対応できる次世代のプロジェクトリーダーの育成や産業界を含めた体制の充実が急務である。一方で、小型宇宙機やキューブサット等について信頼性の向上や寿命の延長、[設計検証の効率化を含めたシステムの刷新等](#)を図り、我が国として深宇宙探査などで効果的・戦略的に活用していくことも検討すべき課題である。

III. 月面探査・開発等

(1) 将来像

我が国は、2019 年 10 月に、将来的な火星有人探査を視野に入れつつ、月での持続的な探査活動を目指す国際宇宙探査プログラムである「アルテミス計画」に参画することを決定している。我が国では、この計画の下、国際協力による月・火星探査を実施するとともに、持続的な有人活動に必要な環境制御・生命維持システムや月周回有人拠点（ゲートウェイ）補給機の研究開発、月面での広域・長期探査を可能とする有人圧ローバの開発、月極域探査機（LUPEX）による水資源関連データの取得等に向けた取組などを着実に実施していくこととしている。また、アルテミス計画の進展に伴い、まずは 2020 年代から科学探査活動の一環として資源探査が行われ、水資源を含め月面における資源の存在状況を把握し、将来の活用の可能性を明らかにする。これを踏まえつつ、月面での有人活動を持続的に行っていくため、民間の参画も得ながら、月面環境情報の取得、無人建設等の新技術を開発・活用して電力・通信・測位システムや食料供給システムなどの技術実証と整備を段階的に行っていく。そのための定期的な月面への輸送機会の確保が望まれる。さらに、将来的には、月面が段階的に人類の生活圏となり、新たな経済・社会活動が生み出されることにより、月面宇宙旅行の実現なども期待される。また、アルテミス計画を始めとした各国が実施する月面プログラムを通じて、民間事業者が地上技術を発展させて宇宙転用することを含め、新たな産業の創出も見込まれ、月面経済圏として発展していく可能性がある。月面の水資源について一定量の存在が確認されれば、生活用水や、電気分解による呼吸用酸素、燃料の調達がその場で可能となり、持続的な有人活動に貢献し、月以遠の深宇宙探査が効率的になる可能性がある。また、シリコンや、鉄・アルミを始めとする金属資源の存在も確認されており、月面は火星等の他天体へ行くための資機材工場となる可能性もある。

(2) 環境認識と技術戦略

① 月面科学に係る技術

i. 環境認識

米国、ロシアや中国は、月面活動を通じて月面での科学や探査技術を獲得している。我が国では月面科学に資する観測センサについては開発実績があるものが多いが、月面での本格的な観測実績は一部にとどまっている。また、月面天文台や月震計ネットワーク観測のためには、観測装置の広域展開が必要であり、月震計やサンプルその場分析装置等において、世界最先端の観測技術を持ち、月面での科学観測を速やかに実施することができれば、国際協力によって推進される月面科学や探査においてプレゼンスを発揮し、主導権を握ることが可能な状況である。

ii. 技術開発の重要性和進め方

月面科学に係る技術は、我が国の強みを活かして月面科学に取り組み、アルテミス計画を通して一級の科学的成果を得て、国際的プレゼンスを向上させるとともに、獲得技術を火星探査等に応用することで、我が国の探査活動の自在性の拡大に資するため、非常に重要である。月面天文台、月サンプル選別・採取・分析、月震計等に関する検討・開発を進め、観測機器を月面への輸送機会（民間サービスの活用可能性も含む）を捉えて、科学観測機器等についてのプリアーサミッションによる早期に段階的な実証を目指す。また、越夜に必要な太陽光に依存しない半永久電源や、科学観測機器の自立的な運用を行う上での通信、電源、構造、熱制御等のパッケージ化技術の開発を進める。これらにより、第一級の科学的成果を創出するとともに、得られたデータや知見、技術を今後の月面インフラ構築等に資する基礎情報として活用し、国際協力の枠組みを利用し、観測システムの広域展開等により本格的な科学観測を行うことで、科学によりアルテミス

計画の価値向上につなげる。

② 月着陸技術

i. 環境認識

月着陸技術は、我が国として探査活動の自在性を維持するために国内で確保、発展させていく必要がある。特に、従来の月着陸は位置精度にして数 km 程度の誤差が発生するものであったが、我が国は、小型月着陸実証機 (SLIM) により世界に先駆けて 100m 以内の高精度着陸技術の実証を達成しており、技術的優位性を有することとなった。これにより、科学的に調査価値の高い場所に着陸することや面積の限られた長期日照領域への着陸等も可能となる。今後は、持続的な有人での月面活動の候補地点である月極域での輸送手段の確立を念頭に置きつつ、より多くの輸送能力や、安全に着陸する技術等を獲得し、月着陸機システムによる月面への物資輸送等へ発展させていくことが期待される。

ii. 技術開発の重要性と進め方

SLIM で実証した画像航法アルゴリズムを始め、各種航法センサや誘導アルゴリズム、制御アクチュエータを含めた航法誘導制御系の技術を継承発展させることにより、日向と日陰の明るさが大きく異なり、ハイコントラストとなる日照環境の月極域でも高精度着陸を可能とする航法誘導制御技術確立することは非常に重要である。さらに、月面離着陸が可能な再使用型物資輸送機 (月周回拠点と月面拠点を往復) や有人月着陸機の実現に向けては、月面拠点到隣接する着陸スポットへの定点着陸技術の開発も必要になる。

また、極域のように (太陽光が低い角度で入射することに伴う) 長い影が発生する環境においては光学画像を用いた障害物検知が難しく、Flash LiDAR を始めとしたアクティブセンサが必要となると考えられる。自律障害物検知・回避技術は実用的に安全に着陸するために必要なものであり、その研究開発を行い、技術確立、蓄積していくことも非常に重要である。

安定姿勢・低衝撃での着陸を可能とするための降着系技術 (着陸脚、エアバッグ等) は、月面への物資輸送等の実用的なユースケースにおいて安全に着陸するために必要なものである。本技術は、要素技術としてそのまま調達して実装することが難しく、着陸機を転倒しにくくする構造、重心管理、剛性、脚幅制約等を踏まえた設計能力が必要であり、自在な着陸ミッションを計画するために非常に重要である。また、上述の重要要素技術を獲得し、我が国として自立的に月着陸機システムを開発することも必要である。

高比推力が期待できる極低温推進剤 (LH2, LNG 等) を用いた月面着陸用のエンジン技術は輸送能力の向上に寄与するため、技術獲得に向けた検討が必要である。また、飛行中のホバリング (空中で自重を支えて加速度ゼロの状態を維持すること) のため、スロットリング等による可変推力が必要であり、これは極低温推進剤に限らずストアラブル推進剤 (ヒドラジン系の推進剤で、極低温推進剤よりも比推力では劣るものの蒸発しにくいタイプの推進剤種) を用いるエンジンにも求められる。可変推力機能を有する極低温推進剤エンジンは国際的にも開発例が少なく、本技術確立することにより我が国の月着陸技術の優位性を高めることが可能となる。また、高い比推力の極低温推進剤エンジンを用いて数 10 日 (月探査) ～ 数 100 日 (火星探査) という長期間飛行を可能とするには、推進剤管理技術として、推進剤の蒸発を抑制する高性能断熱材等の断熱技術及び蒸発した推進剤を有効活用して推進剤タンクを冷却する推進剤蒸発低減技術が必要であり、技術獲得に向けた検討が必要である。

また、限られたリソースの中、これらの技術獲得及び我が国の自立的な月面への物資輸送手段の早期確立に向けて、効果的・効率的な開発を推進するためには、政府機関自身による開発

のみならず、民間事業者による月着陸機システムの開発・運用実証を支援していくことが非常に重要である。

③ エネルギー技術

i. 環境認識

我が国では、月・火星探査の本格化に向け、薄膜太陽電池、リチウムイオン電池、燃料電池等を活用しつつ、発電技術・蓄電技術・送電技術の研究開発に取り組んでいる。発電技術について、海外では NASA 火星探査ローバ”Curiosity”への放射性同位元素を用いた動力源の発電デバイスの搭載実績があり、主に熱から電力への変換効率の向上が開発課題となっている。米国や欧州では、熱電素子や変換効率の高いスターリングエンジンの研究が行われている。また、太陽電池による発電が困難な日陰時にも、長期間・安定的に発電する観点で原子力発電システムは有利であり、米国などでは月面の小型原子力発電システム(数十 kW 級)の実現に向けた検討が進められている。蓄電技術について、主流は化学電池であり、リチウムイオン電池と再生型を含む燃料電池に関する研究開発が行われており、各国とも目指しているエネルギー密度は同程度である。送電技術について、我が国では主に宇宙太陽光発電向けに無線送電技術に関する研究開発が行われている。海外では、kW 級の無線送電技術や月極域の永久影等の探査用に 500W 級のレーザ送電技術に関する検討が行われている。

発電技術・蓄電技術は、地上技術がベースであり、我が国では、宇宙関係のみならず発電・蓄電を得意とする民間企業とも連携しつつ研究開発が進められている。民間企業にとっては、宇宙仕様の高い技術目標にチャレンジすることで技術力の底上げができ、かつ宇宙ブランドがあることにより国際的な競争力を得ている。

ii. 技術開発の重要性と進め方

月面拠点、有人・無人ローバ、月面における資源探査・利用、月面建設機械等への適用の観点から発電技術の開発が非常に重要である。発電技術は、展開収納型太陽電池タワー、展開型太陽電池タワー、半永久電源などを含む。約2週間ごとに日照と日陰が交互に訪れる月の低・中緯度では、日陰時のシステムの保温のための断熱技術や効率的な発電技術に加え、輸送コスト削減のために軽量化に向けた技術の開発が必要である。また、月や火星の表面探査においては重力が存在するため、重力に対応した太陽電池の構造や展開/収納機構の開発が必要である。月・火星ではレゴリスの帯電付着や機構への噛み込みにより不具合が生じる可能性があり、そのための防塵技術も開発する必要がある。太陽電池による発電が困難な日陰時でも電力を供給可能な大型の発電システムの開発が必要である。放射性同位元素を用いた発電デバイスは、熱源と関係なく動力源としての性能向上を図ることができるため、発電デバイスの変換効率向上による高エネルギー密度の実現を目指す。また、将来的には、発電技術として、宇宙太陽光発電システム(SSPS)の活用も想定される。宇宙太陽光発電は多数の技術の組合せで実現されるシステムであり、そのシステムに必要な要素技術の開発を着実に進めていくことが重要である。

太陽電池による発電が困難な日陰時でも電力を供給可能な大型の蓄電システムの開発が必要であることから、全固体電池、高エネルギー密度電池などを含む蓄電技術の開発が非常に重要である。宇宙探査では軽量化がより求められるため、全固体電池を含むリチウムイオン電池のエネルギー密度の向上を目指す。また、特に月面は地球周回軌道よりも温度範囲が広いいため、耐環境性向上に関する研究開発も行う。さらに、今後の有人月面探査活動においては、より大きな蓄電容量が必要となるため、リチウムイオン電池よりも高いエネルギー密度が達成できる高エネルギー密度電池として再生型燃料電池の開発を進める。特に、月面では地上とは異なる純酸素

対応(地上では大気中の酸素を使用するが、宇宙では酸素タンクから 100%酸素を供給する必要がある)の材料研究や、低重力環境における水電解装置の研究開発も進める。水電解装置については、真空・高放射線量等の環境条件でも運用可能な技術の確立に向けた実証を行うため、月着陸機にも搭載可能な小型・軽量の装置の開発を着実に実施することが重要である。

月面における資源開発や資源利用の実現のため、送電技術の開発について検討が必要である。送電技術には、有線送電技術、無線送電技術などを含む。我が国の月探査ミッションにおける探査ローバは、現状日照領域で定期的な発電・蓄電を行うことを前提に運用計画を立てることとなるが、着陸機又は中継地点からの無線送電が可能となれば、月面の永久影探査や越夜時の電力供給手段として活用でき、探査ローバの運用性が向上する。また、月面推薬生成プラントなどの月面インフラの構築に当たり、有線以外の発電設備からの電力供給を採用することで打上げ質量を低減することが可能になるため、月面の永久影探査や越夜時の探査ローバの充電を想定した、無線送電技術の月探査への適用性の検討を行う。

④ 月通信・測位技術

i. 環境認識

月面探査における通信・測位技術は、欧米など各国が取組を進めており、国際的に協調して共通のインフラや規格を共同利用する枠組み [\(LunaNet 構想\)にて](#)調整が進められている。2024 年には NASA と ESA がそれぞれ月通信・測位のコンステレーション衛星の企業選定を完了するなど、月通信・測位ネットワークの構築に向けて各国が本格的に動き出している。[今後、我が国もその枠組み調整に参画しておりに参画し、我が国も含む各国が整備する通信中継インフラや月測位インフラ等の相互運用を通じて優位にインフラの開発・利用を進めるためには、光及び電波通信技術、惑星間インターネット技術、月測位システム技術等の月通信・測位インフラに必要となる技術を早期に獲得していくことが必要である。また、電波が地形に反射して複数ルートを通して伝播する現象\(マルチパス\)等を始めとした、月面の物性や地形の特徴に起因する通信特性に応じた技術開発の重要性も認識する必要がある。\[さらには、地上系設備においても既存のアンテナのみでは対応できないことが予想されており、長期的な運用計画を実現する地上局が必要である。\]\(#\)](#)

ii. 技術開発の重要性と進め方

将来の探査活動においては、8K 等の高精細映像データや科学観測データ等の大容量データのリアルタイム通信を実現する光通信技術が有用であり、月と地球圏という長距離通信に必要な要素技術(遠距離捕捉追尾技術、高感度送受信技術、軽量大口径光学系、補償光学系)の研究開発を行うことが非常に重要である。これには、光データ中継衛星 JDRS 等で我が国として実証してきた技術も継承して取り組む。

月圏での通信・測位インフラの構築には、複数機の月周回衛星から構成されるコンステレーションの配備等、装置の物量の増大が予想されるが、月周回・月面への資材輸送は、多額のコストがかかるため、現実的な費用規模でのインフラ構築のためには装置自体を小型軽量化する技術(高周波・高効率 RF 技術等)が重要である。

月探査において、将来的に月面上に複数のユーザー端末や基地局、月周回軌道上にも複数の中継衛星が配備されることが想定され、そのユーザー端末や中継衛星もダイナミックに移動し中継の切り替えも頻繁に発生することが見込まれる。また、通信距離も長いため、遅延が発生し、通信途絶の確率も高まる。実利用に資する月通信インフラの実現には、このような宇宙探査通信の特徴である、超長距離通信に伴う高遅延(データ送受信の遅延が長いこと)や高エラーレート(伝送データのエラー発生率が高いこと)、中継数の多さやそれらがダイナミックに移動することに伴う

流動的なネットワーク接続経路の変化等に対応するために、遅延・途絶耐性ネットワーク(DTN)の高速化技術を始めとする惑星間インターネット技術が非常に重要である。加えて、実際に月通信を行うに当たっては、天候等の地上の状況によらない月と地球圏でのフィードリンク等のための安定的な通信環境を確立することが必要であるところ、まずは地球における地上局の不足等の、現状把握を含む詳細な調査を行うことが重要である。この調査を踏まえ、月と地球圏という長距離通信にも対応可能な電波通信に係る要素技術(国内外地上局ネットワークの統合運用技術や、大容量かつ高精度な補足・追尾機能等)の開発を実施し、地球における地上局を含む通信設備の整備をどのように進めていくか、を進めていくことが非常に重要検討が必要である。

月面・月周回軌道上で、リアルタイムに測位を行うための月測位システム技術は、月探査の運用性の大幅な向上のために、非常に重要である。月測位システム(LNSS)の実現のため、月近傍GNSS 受信機やその観測量に基づく月周回軌道上での軌道決定技術、月面にいるユーザーが自分の位置や時刻の算出に用いる測位衛星から発信される航法メッセージの生成技術等を確立する必要がある。米国や欧州等においても取組が進められている中、日本も含めて相互運用性を確保しつつ、国際協力の下での月面測位実証や、月面上での測位基準局の配備等に初期段階から参画し、我が国として独自性のある貢献を果たすことが必要である。

また、月探査において月面に拠点を建設し、持続可能な活動を実現するに当たっては、月面拠点域内でのネットワーク構築を可能とする通信技術の開発が必要であるところ、まずは Wi-Fi や 5G 等の成熟した地上の技術を可能な限り活用することを前提としつつ、マルチパス等といった環境条件に対応した月面基地局によるモバイル通信環境の構築に資する詳細な調査を実施することが重要である。

⑤ 月表面探査技術

i. 環境認識

月表面探査技術は、月面着陸後の人・物の移動機能や、耐環境機能、作業支援機能を提供し、広域・長期の月面探査活動を実現するための基盤技術である。我が国では、月極域探査ミッション(LUPEX)により、月表面探査技術の実証を行い、アルテミス計画における将来の月表面探査ミッションのための有人与圧ローバの開発等に向けて、確実に技術を発展させることが期待される。

ii. 技術開発の重要性と進め方

月表面探査技術には、航法誘導制御技術、走行機構技術、耐環境技術、作業支援技術があり、月面での自立的な広域探査において必要な技術である。当該技術の開発には、産業振興の観点からも、非宇宙産業(自動車、建設、資源探査/利用、物流、ロボット等)の参入が期待され、地上技術との相乗効果が期待できる。我が国の競争力を活かしつつ当該技術を確立することにより、将来的な月面での有人员拠点構築等においても、我が国が主導的な立場で参画することが可能となる。

月表面探査ミッションにおいて、月面ローバの自己位置と周辺環境を正確に把握し、安全に走行させる観点からは、航法誘導制御技術が非常に重要である。航法誘導制御技術には、自動運転技術(測距/測位、自己位置推定、障害物検知、地図生成、経路生成、制御技術等)、オンボードの有人员操縦と地上遠隔操作の融合技術などを含む。障害物検知については、月極域では影領域が多く存在するため、ステレオカメラによる障害物の検知方法に加え、アクティブセンサである LIDAR 等を活用したセンシング技術の開発を進める。また、航法誘導制御技術については、LUPEX において月極域の影領域においても有効な技術基盤を確立する。

月や火星のような砂が支配的な地盤において、スタックを避けるために地盤を適度な接地圧で

締め固めながら移動する走行機構技術の開発は非常に重要である。走行機構技術には、不整地走行技術、長距離走行技術などを含む。LUPEX において、数 100kg クラス／10km のローバに必要な走行機構を確立し、有人と圧ローバでの 10t クラス／10000km の性能実装を目指す。クレータ内の水資源採掘等のための急斜面走行を目的とした履帯仕様の走行機構と有人と圧ローバなどの速度・効率重視の車輪機構の両方の開発を行う。

耐環境技術は、ローバの寿命に直結するため、その開発が非常に重要である。耐環境技術には、越夜技術、防塵技術、耐摩耗技術、ダスト除去技術などを含む。LUPEX において、月面環境対応の潤滑技術、防塵技術の開発を行い、ローバに必要な要素技術開発を進めることで、将来の有人と圧ローバによる長期間の月面探査活動の実現につなげる。

作業支援技術は、将来的な有人基地建設において土砂の掘削・運搬などに必要不可欠であることから、その開発が重要である。作業支援技術には、月面ロボットアーム技術などを含む。

⑥ 月資源開発技術

i. 環境認識

月を活動拠点とする際にはエネルギー源の確保が極めて重要であり、その資源として「水」が有力視されている中、水循環など月面の水資源の実態の把握は大きな意義を持つ。

また、将来的な資源利用に向けて、水資源を含めた資源探査や、資源利用で必要となる施設・設備等の整備のための事前調査を月面開発の発展段階に合わせて適切に進めることは、持続的な月探査を進めていく上で必須である。

ii. 技術開発の重要性と進め方

地下浅部の広域探査に資する月周回資源探査技術として、衛星搭載用多周波数チャンネルテラヘルツ波センサ、衛星開発技術、観測データから誘電率などの物理量を導出するデータサイエンス技術、計測値の確からしさを評価する検証やサイエンス技術軌道上で衛星とセンサを統一的に制御する衛星デジタル処理技術等が存在し、これらの技術の開発に取り組むことは重要である。これらの技術を活用して月の地下浅部の情報を取得し、これまでに蓄積されている他の観測データ等と組み合わせて分析することにより、月面の水資源の実態の把握に繋げていく。

月面での資源開発の実現に必要なインフラの構築には、月面拠点や月面推薬生成プラントの建設候補地の事前調査等が必要であり、世界トップクラスである我が国の資源開発技術などの高度化・宇宙仕様化（昼夜 200℃以上の寒暖差や過酷な放射線への耐性）等による月面資源探査技術の開発が、非常に重要である。月面資源探査技術には、探査機による資源調査・掘削・採取技術、月面上の基準点に基づいたローカル測位・測量技術、地盤調査技術、環境計測技術、地球への月面サンプル回収技術を含む。探査機による資源調査・掘削・採取技術については、LUPEX において、地中レーダによる地下浅部構造の観測や、深さ 1.5m までの掘削、水資源評価用のサンプル採取を行う予定である。

⑦ 月資源利用技術

i. 環境認識

国際宇宙探査に向けた宇宙機関間でのシナリオ検討等を行う国際宇宙探査協働グループ (ISECG) では、持続的な宇宙探査の実現を目的とした月資源のその場利用（水資源、鉱物資源等）に係る議論がなされている。2024 年 8 月 2022 年 10 月に ISECG より公表された「国際宇宙探査ロードマップ 追補版 -2024⁴²」において、月面の氷含有レゴリスを原料として、ゲートウェイと月面拠点間

の往復に使用する宇宙機の推薬を月面で生成する構想に基づき、資源利用技術が重要技術分野として等が掲げられている。

NASA は月資源のその場利用に関する研究開発に加え、将来の火星有人探査を見据えた資源利用の技術実証にも取り組んでおり、2021 年に実施された火星探査ミッションでの資源利用実験において大気中の二酸化炭素から酸素を製造することに世界で初めて成功した。

また、我が国では、宇宙開発利用加速化戦略プログラム(スターダストプログラム)の一環として、月の地質調査・地盤解析、無人建設(自動化・遠隔化・運搬)、建設機械(掘削・整地・運搬)、建材製造、長期滞在を可能とする簡易施設建設や、高効率な食料生産技術と資源(有機物等)再生技術等を組み合わせた高度資源循環型食料供給システムの実現に向けた技術開発に取り組んでいる。

ii. 技術開発の重要性と進め方

我が国が得意とする省エネルギー、再利用・再資源化技術、資源精製技術、植物生産技術等を応用し、限られた資源から必要な物資を効率的かつ無人で調達・生産できるシステムを構築する。持続的な月探査の実現を達成するため、月面における水資源利用技術のうち、原料となるレゴリスを月面環境(低重力環境、厳しい寒暖差)において安定的、かつ効率的に採取するための資源採取技術の確立が非常に重要である。また、月面で推薬生成を行うための推薬生成技術(水抽出、凝縮、精製、電気分解、液化、貯蔵技術)、推薬充填技術、それらを統合するシステムインテグレーション技術の確立も重要である。月面の氷含有レゴリスを原料として、呼吸用酸素や宇宙機の推薬を月面で生成することで、地上からの物資補給に係る輸送コストを低減する。特に、高信頼性確保、輸送コスト低減及び運用性向上の観点から、水資源利用に係る構成要素(資源採取技術、推薬生成技術等)に加えて、月面推薬生成プラントの開発・運用に必要なエネルギー技術や月通信・測位技術等も考慮した上で全体最適化を図る必要がある。我が国には世界最大級のプラントエンジニアリング企業が存在し、大規模プラントシステムのインテグレーション技術に優位性を持つことから、この分野は、今後の月面開発において我が国が国際的なプレゼンスを発揮できる分野の一つである。月面推薬生成プラントの概念検討や地上実証、月面実証等により実現可能性を見極め、将来的な国際共同ミッションにおいて、我が国が主導的な立場で参画することを目指す。

月面土壤に含まれるシリコンや、鉄・アルミを始めとする金属資源を分離・回収し、活用する観点では、鉱物資源利用技術の検討が必要である。鉱物資源利用技術には、分離回収技術、精製技術、成形技術、[地球への月面サンプル回収技術](#)などを含む。

また、月面拠点や月面推薬生成プラント等の月面インフラの構築・建設に向けて、既存の建設技術を最大限活用し、宇宙無人建設技術の開発に取り組むことが重要である。宇宙無人建設技術には、月の地質調査・地盤解析技術、無人建設技術(自動化・遠隔化・運搬)、建設機械技術(掘削・整地・運搬)、建材製造技術、簡易施設建設技術を含む。この分野も、我が国が得意とするロボット・自動化技術が応用でき、他国に対し優位性を確保できる分野である。[また、研究開発を通じて得られた技術は地上の建設技術にも反映することで、相乗効果による技術の発展を目指す。](#)

さらに、月面での持続的活動に必要な安定的な食料供給や物資補給量削減、極限環境でのQOL 確保等の観点から、月面等での食料生産技術として、高等植物や微細藻類、培養肉等の高効率食料生産技術と、高効率な有機物等の資源再生技術(食品残渣の発酵等による養分の回収)、QOL マネージメントシステム(QOL 観察システム、食の支援ソリューション)を組み合わせた、高度資源循環型食料供給システム技術の開発が重要である。また、共創型実証基盤(月面基地模擬

施設、宇宙実験モジュール)の構築に向けた取組も重要である。

(3) 今後の課題

国際協力や国際競争の環境下で推進される今後の月面探査・開発において、我が国が主導的な立場で参画するためには、月面活動でのユースケースを念頭に、その実現に必要な鍵となる技術についてその技術成熟度の向上に先んじて取り組むことが非常に重要であるとともに、定期的な月面への輸送機会を確保し科学研究・技術実証を行うことも必要である。特に、有人と圧ローバ等を活用した月面広域探査を早期に実現し、科学的意義や商業的価値が高い領域を我が国が先行して明らかにするとともに、SLIM で実証した高精度着陸技術を高度化させ、極域を含む自立性・自在性の高い全月球へのアクセス能力を獲得することで、月面活動における我が国の国際的プレゼンスを高めることが可能となる。

また、月面への輸送コストは地球低軌道に比べて極めて高額となるため、非宇宙産業が有する技術も活用し、高機能かつ小型軽量のシステムを実現する技術開発を進め、輸送コストの低減を目指すことにより、我が国企業が国際的な技術優位性を獲得し、産業振興にもつながることが期待される。

IV. 地球低軌道・国際宇宙探査共通

(1) 将来像

アクセスや物資補給・回収が比較的容易な地球低軌道は、我が国の宇宙活動の自立性を確保し、宇宙環境を利用するための貴重な場であり、アルテミス計画を始めとする、月周辺や、月面での活動等に必要な技術(実験の遠隔化・自動化・自律化技術、高効率の環境制御・生命維持技術等)の獲得・実証や、宇宙飛行士の訓練・養成など、国として行うべき、技術の開発・実証や利用を行っていく。また、国として、我が国の地球低軌道活動を推進するために必要な技術を蓄積し、その成果を、ポスト ISS における国内の活動主体が活用していく。さらに、アカデミアや国の機関による、地上では行うことができない社会的課題解決・知の創造、研究者・技術者・学生等の人材育成のためにも地球低軌道を利用していく。加えて、非宇宙業界も含めた民間事業者の多様な利用や、商業的な技術開発が進展するとともに、宇宙旅行や宇宙空間でのエンターテインメント等のサービスの展開が期待される。また、国際宇宙ステーション(ISS)で培った我が国が強みを有する技術等を最大限活用し、国際宇宙探査における有人宇宙活動へと展開していく。

(2) 環境認識と技術戦略

① 物資補給技術

i. 環境認識

我が国は、ISS への物資補給を担う宇宙ステーション補給機(HTV)や新型宇宙ステーション補給機(HTV-X)の開発・運用等により、物資補給技術を獲得・蓄積してきた。HTV は、ISS への全9機の物資補給に成功し、HTV-X は補給能力の向上等を目指して開発を進めており、HTV-X1 号機は無事 ISS への物資補給に成功した。いる。地球低軌道への物資補給技術は、我が国の他に米露欧中が保有している(欧州の ATV は運用終了)が、HTV-X では、輸送可能質量や輸送コスト効率において高い優位性を実現することが計画されている。さらに、我が国は、HTV-X の技術を活用・発展させ、アルテミス計画に対する貢献の一つとして、ゲートウェイへの物資補給も担う予定である。これらの技術は、2030 年頃に想定されている ISS 運用終了後(ポスト ISS)の地球低軌道商業宇宙ステーションへの商業物資補給機にも発展し得るものである。

今後、より高度な物資補給技術を獲得するためには、HTV や HTV-X の開発により獲得・発展させてきた優位性の高い技術を活用し、更に発展させることが効率的かつ効果的である。地球低軌道の商業宇宙ステーションやゲートウェイ等への物資補給を実現し、国際競争力を維持、強化するためには、その鍵となる自動ドッキング技術、航法誘導制御技術、補給能力向上技術、推薬補給技術等の開発・獲得を進める必要がある。

ii. 技術開発の重要性和進め方

自動ドッキング技術は、ISS や国際宇宙探査における有人拠点への物資や搭乗員(宇宙飛行士等)の輸送に不可欠な技術である。補給機と拠点のドッキング(結合)時に補給機と拠点の間に生じる誤差や相対速度の差異を打ち消し、衝撃を吸収できる、高い自律性と安全性、信頼性を備えながらも、より軽量の自動ドッキングシステムが求められる。地球低軌道や月周回軌道の有人拠点への自在性の高い輸送には、国際標準に準拠した自動ドッキング技術を獲得する必要がある。国際標準ターゲットマーカ(目印)を用いた相対航法(2体間の相対位置及び速度を推定する技術)、相対6自由度制御(2体間の相対位置・速度に加え、相対姿勢を同時に制御する技術)、国際標準を満たす低衝撃ドッキング機構システム等の鍵となる技術の獲得が非常に重要である。ポスト ISS においては、米国企業などにより、複数の商業宇宙ステーションが構築されることが想定されており、物資補給機は、それらの軌道上拠点に対して自在にアクセスできることが期待され

る。日本発の商業物資補給機の実現に向けては、国際競争力強化の観点からも、HTV-X において実施する計画の、自動ドッキング技術の実証を確実に行うとともに、ドッキング機構の安定供給を可能とするドッキング検証システムの整備を行うことが非常に重要である。

航法誘導制御技術については、ISS や国際宇宙探査における有人拠点へのランデブー（補給機と拠点が宇宙空間で接近し、相対速度ゼロの状態ですれ違い飛行すること）において、位置・速度を取得するセンサ情報を複合的に組み合わせた航法センサシステムが必要である。地球低軌道拠点へのランデブーでは、主に全地球測位システム（GPS）を利用した航法と電波航法等の情報を併用するが、月周回拠点周辺では GPS 航法が使えないため、それに代わる航法を用いた複合的なオンボード（宇宙機搭載）航法システムの構築が必要である。獲得済みの地球低軌道拠点へのランデブー技術を月周回拠点へのランデブー技術へと発展させ、月周回拠点への補給を可能とするには、GPS を使わない相対航法技術（画像航法と電波航法の複合）及び地球の重力影響下外での相対6自由度制御による誘導制御技術を開発・獲得することが非常に重要である。また、ポスト ISS において複数の建造・運営が想定される、商業宇宙ステーションを含む地球低軌道拠点への物資補給の実現には、各拠点に対して自在に接近・結合できることが不可欠であり、商業物資補給の実現と事業性の向上の観点からも、接近対象である各拠点に柔軟性高く対応し自在な接近を可能とする、自由度の高い近傍通信システム技術を獲得することも非常に重要である。

補給能力向上技術は、物資補給機に対するニーズに応え、高い競争力を保持し続ける上で重要である。特に、月周辺や火星等、遠方への物資補給においては、より多くの推薬を必要とすることから、機体軽量化による、補給量の向上及び補給単価の低減が求められる。そのため、既存システムで使用されているアルミ素材よりも軽い炭素繊維強化プラスチック（CFRP）等を活用し補給機の構造効率（全機質量のうち構造質量の割合）の低下を図ることが、HTV-X の高い補給効率を更に向上する機体構造の軽量化につながる。これは、地球低軌道向けの補給において展開されると見込まれる商業物資補給機サービスにおいても、国際競争力向上を図る上で不可欠である。このように、機体軽量化などの補給能力向上技術の開発は重要である。

推薬補給技術については、宇宙機の運用寿命が搭載可能な推薬の量に依存することから、その寿命延長を実現するために期待されている。宇宙ステーションや将来の推薬補給ステーション等の軌道上拠点等に対して繰り返し推薬補給ができれば、それらの拠点が姿勢制御や軌道上昇等の軌道制御のために必要とする推薬の枯渇を回避でき、また、それらの拠点にアクセスする宇宙機に対して推薬を補給することも可能となる。推薬を補給するためには、宇宙機と拠点がドッキングするなど、補給が可能な位置まで接近し、配管を接続する等して推薬を移送する方式が想定されるため、安全かつ確実な接続・切り離し等に関する技術を獲得することについて、検討が必要である。

② 回収・往還技術

i. 環境認識

軌道上拠点から地上への物資回収について、我が国では、大型の回収機は実現していないが、HTV7 号機に搭載した小型回収カプセル（HSRC）により、ISS からの宇宙実験サンプルの保冷回収に成功するとともに、将来の有人宇宙船の実現に必要な大気圏再突入飛行時の揚力誘導制御技術、軽量熱防護技術の飛行実証に成功するなど、重要技術の獲得を進めてきている。米国では、スペースシャトルでの豊富な実績に加えて、SpaceX 社が Cargo Dragon（ISS 向け物資補給・回収機）や Crew Dragon（ISS 向け有人往還機）を運用中であり、ボーイング社は、Starliner（ISS 向け有人往還機）、Sierra Space 社は Dream Chaser（有翼型の物資補給・回収機及び有人宇宙船）を開発中である。また、ロシアと中国も、物資回収・有人帰還技術を有しており、インドも

有人往還機を開発中である。欧州では将来の有人往還技術獲得を見据えた商業カーゴ輸送イニシアチブが立ち上げられ、ポスト ISS 拠点への物資補給・回収技術の獲得を目指している。我が国では、文部科学省において、革新的将来宇宙輸送システムの実現に向けた議論が行われ、有人帰還技術を含む往還技術の必要性についての議論が取りまとめられている。

今後、地球低軌道活動や月面を含む月周辺における宇宙活動の拡大が予想され、その利用拡大とあいまって、地球への物資の回収や搭乗員の帰還に関する需要も飛躍的に高まることが想定される。自律的かつ持続的な宇宙活動を実現するためには、これらの技術獲得の重要性がますます高まるものと考えられる。

ii. 技術開発の重要性と進め方

物資回収技術は、軌道上から安全・確実に必要な物資や貨物を地上に持ち帰るために不可欠なものであり、自律的で自在な物資回収を行えることは宇宙活動の優位性・自律性の観点から非常に重要である。ポスト ISS 拠点では、今後の宇宙環境利用技術の発展等により、地上では製造できない高付加価値品（新材料や医療用組織等）を回収するニーズが想定される。また、回収技術は自在な有人宇宙活動を行うために必須であり、自律性確保のためには独自の技術獲得が不可欠である。物資回収の単価を下げるためには、大型の回収機で一度に大量の物資を回収することが効果的であり、その実現に向けては、回収機の熱防護材の大型化や軽量熱防護材の技術が必要である。一方で、今後の低軌道利用の拡大を踏まえると、地上における輸送システムと同様に、利用者が回収したいタイミングでタイムリーに回収できるサービスへの期待が高まると考えられ、少量高頻度の物資回収システムの実用化も期待される。小型高頻度回収は、大型回収機に比べて輸送効率が低下し、輸送単価は高くなるため、再使用化技術も含めた低コスト化の取組も必要である。また、地上での効率的な機体回収に必要となる回収機の落下位置の精度向上に寄与する高精度再突入制御技術、宇宙実験成果等の回収物の温度維持などの回収物環境制御技術のほか、再突入時に回収物に加わる加速度を緩和する揚力誘導制御技術等の各要素技術の成熟も必要である。これらの技術は、民間も含めた低軌道利用の拡大・回収ニーズの拡大を背景とし、民間企業による技術開発・事業開発の活動と連携した取組として進めていくことが効果的である。

宇宙に人がアクセスするためには、有人仕様の基準を満たす、安全性と信頼性の高い輸送システムを構築する必要があり、有人ロケットの開発だけでなく、搭乗員が搭乗する有人宇宙船の開発が必要となる。有人往還技術は、有人宇宙船システムを構築するためのコア技術であり、将来的な我が国における自律的な有人宇宙活動を実現するためには、独自の有人往還技術の獲得・システム構築について検討が必要である。特に、将来想定される民間主体の地球低軌道活動においては、有人輸送事業が主要マーケットの一つになることが予想されており、有人輸送に付随する事業も含めた我が国の民間企業による国際的なシェアの獲得、日本の国富や民間資金の海外流出低減等の観点も考慮すべきである。また、有人宇宙船には、宇宙空間から搭乗員を安全に帰還させる機能やシステムの低コスト化などが不可欠であり、これらを実現するために、緊急脱出（アボート）システム技術、ヒューマンファクターエンジニアリング技術（人間工学を応用し問題を解決する技術）、帰還技術（高精度再突入制御技術、揚力誘導制御技術、大型熱防護材技術等）、再使用化技術等の要素技術の開発を進める必要がある。

③ 有人宇宙滞在・拠点システム技術

i. 環境認識

2040 年に3兆円規模の経済効果があるとされている地球低軌道サービスは、宇宙開発利用市

場の獲得や低軌道以遠の宇宙開発に向けた拠点における運用利用等に対しても、極めて重要な役割を担っている。米国では、ポストISSの地球低軌道活動に向け、複数の商業宇宙ステーションの構想検討・開発が進められており、欧州にはこれらと連携する動きがあり、また、中国、ロシア、インドには独自の低軌道拠点を構築・確保しようとする動きがある。また、我が国においても、複数の民間企業が、ポストISSにおける地球低軌道活動の拠点を構築し利用サービスを提供する構想を有している。一方、月探査においては、アルテミス計画の下、国際協力によりゲートウェイの開発が進められており、我が国は、有人と圧ローバ等による月面探査に向けた準備を進めている。

我が国は、ISS計画に参加し、日本実験棟「きぼう」を建設・運用し、有人宇宙滞在技術・拠点システム技術を獲得・成熟させてきている。地球低軌道や月近傍・月面等における拠点の構築や有人宇宙滞在に必要な、優位性の高い技術が蓄積されている。今後、日本が培ってきた各種技術を活用・発展させ、技術的優位性や活動の自在性を向上させるとともに、商業宇宙活動における国際競争力の強化と国際プレゼンスの更なる向上を図っていくことが期待される。

ii. 技術開発の重要性と進め方

有人宇宙拠点構築技術については、ポストISSにおいて、日本の産官学が自在な有人宇宙活動を継続的に実施しその成果を享受するために、その活動の場を確保する上で不可欠な技術である。宇宙空間や月面等において、搭乗員が長期的に安全に活動をするためには、宇宙服なしで自由に活動できる与圧モジュールの構築が必要である。また、船外（商業宇宙ステーション外部の宇宙空間）での宇宙実験や観測等を実現するためには、船外プラットフォームの技術、そして船内と船外での機材の搬入・搬出を可能とするエアロック技術も必要である。ISS退役後の地球低軌道活動が民間主体の活動に移行していくことを想定すると、効率的に活動の場を確保すべく、「きぼう」やHTV、HTV-Xで獲得した技術を活用し、低コストで運用性や安全性に優れたシステムへと発展させていくための技術やシステムの開発が非常に重要である。

有人宇宙活動のための拠点構築においては、活動を支える有人宇宙拠点基盤インフラ技術も必要である。ISS計画においては、日本は「きぼう」を開発・運用しているが、大型太陽電池技術、大容量排熱技術、拠点の姿勢制御・軌道制御技術、推進充填・管理技術などの有人宇宙基盤インフラ技術は他国に依存している。拠点の軌道制御技術は、拠点到係留中の物資補給機により対応することも補給機の国際競争力向上の観点で有望である。これらは、独自の有人宇宙拠点システムを構築するためのコア技術であり、自在な宇宙活動の実現には、これら技術の開発について検討が必要は非常に重要である。

環境制御・生命維持システム(ECLSS)は、人が宇宙に滞在するために必要不可欠であり、自律性や優位性を確保する観点からも独自の技術開発を行うことが非常に重要である。ECLSSに要求される要件は、ミッション期間を通じて搭乗員の生命維持に適した環境を提供することである。ECLSS技術は、有人宇宙活動に必要な不可欠な二酸化炭素除去、有害ガス除去、圧力制御、温湿度制御などの「コアECLSS」技術と、酸素製造、二酸化炭素還元、尿や凝縮水の再生、廃棄物処理などの「再生ECLSS」技術に大別され、また、関連技術として、宇宙におけるトイレ、シャワー、臭気・菌・細菌の除去、衛生管理等の衛生技術がある。月あるいは火星など深宇宙探査では、地球から供給する消耗品、補用品及び飛行士によるメンテナンスを最小限に抑えながら、深宇宙で長期間にわたり生命維持に必要な機能を高い信頼性で実現する必要がある。また、地球から一度輸送した水、酸素、食料などのリソースを効率的に使用する高度な再生技術により、地上からの補給量の低減を図る必要がある。これらについては、日本の民生分野の優れた要素技術をベースに、世界で未だ実現されていない高い信頼性と効率を有する「完全再生型ECLSS技術」(運用初期に投入した空気と水のみで、地球からの補給を極力必要とせず運用可能な技術)を確立する

ことで、国際宇宙探査における我が国の存在感を示し、人類の活動領域拡大へ大きな貢献をすることが可能となる。更に将来的には、月面等で採取する水等の資源の利用技術を組み合わせ、地球からの補給に依存しないシステムへと発展させることも期待される。また、将来的な有人宇宙船の開発においても、搭乗員の生命維持のために、ミッション期間等に対応したコア ECLSS 技術が必要となる。さらに、宇宙の滞在拠点等において人が生活するためには、衛生状態を維持・管理するための技術も必要となる。

遠隔化・自動化・自律化を含む有人宇宙活動支援技術については、月面等の探査活動や商業宇宙ステーションを含む地球低軌道活動において、搭乗員を人にしかできない活動に従事させ、人の活動の安全性やパフォーマンスを高める観点から、非常に重要である。具体的には、微小重力環境や低重力環境におけるロボットの移動、実験機材や物資などの搬送、実験装置の操作などの技術、船外の宇宙空間や月面における作業を行うロボットアーム技術等が挙げられる。また、有人活動を支援するという観点では、船外活動に不可欠な宇宙服技術等も必要となる。将来の探査活動は遠隔地で行われるため、厳しいリソースの制約と搭乗員の活動期間・人数の制限が予想される。滞在拠点が有人の期間に搭乗員とロボットが協働で作業を実施したり、滞在拠点が無人になる期間や搭乗員の休憩時間等に、繰返し作業や定型的な作業をロボット技術により自動・自律的に実施できるようにすれば、このような課題への対応が可能となり、運用の自在性向上による多様な利用拡大が期待されるとともに、将来の持続的な宇宙環境利用や有人宇宙活動の確立に貢献することが可能となる。また、我が国は、遠隔化・自動化・自律化技術に関しては、産業ロボット等で強みを有しており、国と民間企業が連携しシナジー（相乗効果）を創出する研究開発を進めていくことが期待される。

健康管理技術（QOL 向上を含む）については、搭乗員が宇宙に滞在し活動する上で不可欠な技術である。具体的には、搭乗員の健康状態に影響を及ぼし得る放射線やキャビン内の空気成分などの環境計測や宇宙放射線被ばく量管理・防護に関する技術、宇宙での生活に伴う生理的反応の検査や対応に関する技術、精神心理・パフォーマンスの管理技術、地球からの遠隔又は現地で自律的に行う医療技術、月面等の粉じんやその他衛生環境に関する管理技術、食と栄養の管理技術等が挙げられる。日本は、ISS 計画への参画を通じて、放射線計測・管理に関する研究開発・運用や、遠隔医療に関する研究・開発・軌道上実証等の技術獲得を進めてきている。ポスト ISS の民間主体の地球低軌道活動においては、民間搭乗員や旅行者向けの健康管理が必要となり、また、ゲートウェイや月面での活動においては、より強い放射線環境や月面の重力や粉じん等に対応した健康管理が必要となることから、これらの技術を維持・発展させていくことが重要である。

有人宇宙施設運用技術については、日本が独自に有人宇宙施設の運用を行う場合に必要となる技術である。ISS 計画では、日本は、「きぼう」の建設以降 10 年以上にわたる、24 時間 365 日の運用により技術を蓄積している。ポスト ISS において、民間企業が主体となり、軌道上拠点の運用を行う場合、日本が獲得した技術や蓄積された経験とノウハウは非常に有用なものであり、それらの技術の継承や発展が期待される。また、月や火星等での活動においては、地球からの距離が遠く通信の時間遅れが生じるため、通信遅れ・狭通信帯域に対応する運用技術等も必要となる。ポストISSや月面での活動は、今後拡大していくことが予想され、日本として必要な宇宙活動を自在に行うためには、拠点や設備等の運用を独自に実施できる必要があり、これらの有人宇宙施設運用技術を維持・発展させていくことが重要である。

有人宇宙活動搭乗員訓練技術については、日本が将来的に有人宇宙船や有人拠点を運用していく場合に不可欠な技術である。「きぼう」のシステム運用、利用ミッションの訓練に関しては、「きぼう」打上げ前の段階から今日に至るまで、長年にわたり技術を蓄積している。ポスト ISS にお

いて民間企業が主体となる軌道上拠点の運用を行う場合や、我が国の有人圧ローバを月面上の閉鎖空間の中で搭乗員が運用することを想定した場合、宇宙機システム及び利用ミッションに関する訓練のみならず、国際チームの中で安全・確実な有人宇宙活動を遂行していくためのリーダーシップや、危機管理能力を含むチーム・スキルが不可欠であり、これらの能力を開発し訓練するための有人宇宙活動搭乗員訓練技術を今後も維持・発展させていくことが重要である。

有人宇宙活動安全評価・管理技術については、日本は、ISS 計画への参画を通じ、有人宇宙拠点である ISS の安全を確保するための厳しい国際基準に準拠したシステムや装置の開発を行い、また、NASA の責任で実施される安全審査の一部は JAXA が実施することが NASA から認定されており、日本として安全を評価し管理するための技術が蓄積されている。これらの技術は、今後のポスト ISS や月面等での活動における安全な有人宇宙活動を担保するために不可欠な技術であり、日本として、技術を維持・発展させていくことが重要である。

④ 宇宙環境利用・宇宙実験技術

i. 環境認識

我が国は、ISS 計画への参加と、「きぼう」における宇宙環境利用の推進及び HTV-X による物資補給後の軌道上技術実証機会の提供等により、他国が保有しない独自性の高い宇宙環境利用・宇宙実験技術を獲得・発展させてきており、技術的な強みとなっている。ISS では、米国、欧州、ロシアもそれぞれ宇宙環境利用を行っており、中国も独自の宇宙ステーションにおける宇宙実験を加速させている。また、国際宇宙探査においても、ゲートウェイや月面の環境を利用した科学的実験や観測等の実施に関し期待されており、検討が進められている。

ポスト ISS においては、我が国の産学官が自在かつ高頻度に利用できる場を確保することが必要であり、「きぼう」で培ったライフサイエンス、創薬、材料分野等に関する独自性や国際競争力の高い宇宙環境利用・宇宙実験技術を継承・発展させた最先端の実験装置群を開発し、ポスト ISS の活動拠点に搭載することで世界をリードする成果を創出していくとともに、それらの成果の地上社会への還元が強く期待されている。そのためには、宇宙環境利用の更なる拡大が急務であり、これらの高度な技術や装置等が学术界や産業界に広く利用されることを促進する取組の推進も重要である。また、ゲートウェイでの宇宙環境利用は、国際協力により進められるが、アルテミス計画への参加による成果の獲得や国際プレゼンスの発揮の観点からも、「きぼう」で培った、日本が強みを有する宇宙環境利用・宇宙実験技術等により参画していくことが期待されている。また、月面に関しても、国際的な研究フォーラム等において、有人圧ローバを活用した「月面3科学」も含む科学研究、材料科学や宇宙飛行士の滞在を通じた生命医科学に関する研究などについて、様々な可能性が検討・議論されている。

ii. 技術開発の重要性と進め方

「きぼう」を通じて培ってきた優位性の高い宇宙実験コア技術としては、タンパク質結晶生成等創薬を支援する技術、小動物飼育実験などの健康長寿研究支援技術、細胞立体培養等の細胞医療研究支援技術、静電浮遊炉による無容器処理(るつぼ等の容器を使用せず物質を浮遊させて溶融・計測等を行うこと)や温度勾配炉による半導体材料の結晶生成などの革新的材料研究支援技術、固体材料可燃性・液体燃料燃焼実験技術、重力発生・可変技術などがある。宇宙空間では、微小重力や放射線環境など、地球とは環境が異なるため、これらを活かし、地上では実施することが不可能な特殊な実験を行うことが可能である。上記の各技術はそれらを可能とするため、ISS 計画への参加を通じて独自に開発・成熟させてきたものである。社会課題解決に関する研究

ニーズや事業化につながるシーズなどを見定めつつ、引き続き、世界をリードする成果を創出する実験環境を生み出す研究開発を不断に行うことが非常に重要である。

民間主体の活動に移行すると想定されるポスト ISS においては、日本が培ってきた宇宙実験技術や船内・船外プラットフォーム技術を軌道上拠点運営企業に対して継承させつつ、AI・IoT 技術を活用して実験のサンプル・データの処理等を自動化・高速化する宇宙実験装置/船内・船外利用効率化技術やそれらの実現の基盤となりうる軌道上高度データ処理技術、高速通信技術等も取り入れ、また、宇宙環境利用へ参入障壁を下げ利用を促進することに繋がる新たな技術・装置の研究開発や地上での事前検証システムの開発なども含め、事業性の高いシステムとして整備・発展させていくことが非常に重要である。

(3) 今後の課題

ISS の運用期間は 2030 年までとなっており、ポスト ISS においては、地球低軌道における商業宇宙ステーションや無人実験用衛星などによる活動が行われ、国による有人宇宙活動は低軌道での活動を基礎としつつ、月以遠へと活動領域を拡大させていくことが予想される。

我が国の産官学が自在な宇宙活動を持続的に行うためには、まず、その活動の場を確保することが大きな課題である。地球低軌道においては、ISS 計画への参加を通じて獲得してきた技術を発展させつつ、民間企業への技術移転や民間主体での技術獲得等に係る取組を着実に進めることが重要である。また、2030 年までの期間を、アルテミス計画等の探査活動に向けた新たな技術実証や、ポスト ISS に向けた民間企業による技術・事業の実証のために最大限活用するとともに、利用者の利便性向上、付加価値の高い利用サービスの提供、物資の補給や回収等の輸送コストの低減などを図り、潜在的な利用者の参画を促進し、持続的な宇宙環境利用を実現していくことも重要である。

これらの活動を通じて、地球低軌道においては、国際競争力を高め、民間企業による将来の低軌道活動でのシェア獲得を図るとともに、探査活動においては、優位性の高い技術等によりゲートウェイ等の国際協力ミッションにおいて主要な役割を担い、新たな技術獲得と国際プレゼンスの更なる向上を図る。