参考資料２－１

宇宙技術戦略（案）

目次（案）

1．基本的考え方 5

（1）策定の趣旨 5

（2）重要技術の評価軸 5

①衛星、分野共通技術 5

②宇宙科学・探査 6

③宇宙輸送 7

（3）技術開発支援の在り方 8

（4）策定プロセスとローリングの在り方 8

2．衛星 9

Ⅰ．通信 9

（1）将来像 9

（2）環境認識と技術戦略 9

①衛星間や軌道間及び宇宙と地上を結ぶ光通信ネットワークシステム 9

②大容量で柔軟な通信を提供するデジタル通信ペイロードシステム 11

③地上系とのシームレスな連接を実現する非地上系ネットワーク（NTN）技術 12

④秘匿性・抗たん性を確保する通信技術 13

Ⅱ．衛星測位システム 15

（1）将来像 15

（2）環境認識と技術戦略 15

①妨害・干渉に強い高精度な衛星測位システム 15

②利用領域及びユーザーの拡大に関する実証や技術の開発 17

Ⅲ．リモートセンシング 20

（1）将来像 20

（2）環境認識と技術戦略 20

①ニーズに即した情報を抽出するための複合的なトータルアナリシス技術 20

②時間情報を拡張するコンステレーション技術等 22
③空間情報を拡張する光学／レーダ等のセンサ開発技術 23
④波長・周波数情報を拡張するセンサ開発技術 25

Ⅳ．軌道上サービス 27
（１）将来像 27
（２）環境認識と技術戦略 27
①軌道上サービスの共通技術 27
②軌道環境・物体の状態監視・遠隔検査技術 28
③デブリ除去・低減技術 29
④燃料補給・修理・交換等の寿命延長技術、軌道上製造組立技術 30
⑤宇宙太陽光発電システム（SSPS） 31
⑥宇宙環境観測・予測技術 32

Ⅴ．衛星基盤技術 34
（１）将来像 34
（２）環境認識と技術戦略 34
①衛星の機能高度化と柔軟性を支える SDS 基盤技術 34
②衛星の小型軽量化とミッション高度化を支える電気系技術 35
③衛星の小型軽量化とミッション高度化を支える機械系技術 36
④衛星の運用及び地上局効率化を支える地上システム基盤技術 38
（３）横断的課題【ミッション融合】 39

３．宇宙科学・探査 40
Ⅰ．宇宙物理分野 40
（１）将来像 40
（２）環境認識と技術戦略 40
①宇宙用冷却技術 40
②観測技術 41
③軽量化・高精度制御技術 42

④精密協調編隊飛行技術 42
⑤データ解析技術 43
（３）今後の課題 44

Ⅱ．太陽系科学・探査分野 44
（１）将来像 44
（２）環境認識と技術戦略 44
①サンプルリターン技術 44
②超小型探査技術 45
③大気突入・空力減速・着陸技術 46
④深宇宙軌道間輸送技術 46
⑤表面等探査技術 47
（３）今後の課題 48

Ⅲ．月面探査・開発等 49
（１）将来像 49
（２）環境認識と技術戦略 49
①月面科学に係る技術 49
②月着陸技術 50
③エネルギー技術 51
④月通信・測位技術 52
⑤月表面探査技術 53
⑥月資源開発技術 54
⑦月資源利用技術 54
（３）今後の課題 55

Ⅳ．地球低軌道・国際宇宙探査共通 57
（１）将来像 57
（２）環境認識と技術戦略 57
①物資補給技術 57

②回収・往還技術 58
③有人宇宙滞在・拠点システム技術 59
④宇宙環境利用・宇宙実験技術 62
（３）今後の課題 63

４．宇宙輸送 64
（１）将来像 64
（２）環境認識と技術戦略 65
①システム技術 68
②構造系技術 69
③推進系技術 69
④その他の基盤技術 70
⑤輸送サービス技術 71
⑥射場・宇宙港技術 72
（３）今後の課題 73

５．分野共通技術 75
（１）将来像 75
（２）環境認識と技術戦略 75
①宇宙機の機能高度化と柔軟性を支えるハードウェア技術 75
②宇宙機の小型軽量化とミッション高度化を支える機械系技術 76
③ミッションの高度化や柔軟性を支えるソフトウェア基盤技術 77
④開発サイクルの高速化や量産化に資する開発・製造プロセス・サプライチェーンの変革 78
⑤次世代の宇宙システムに向けた複数宇宙機の高精度協調運用技術 79
（３）横断的課題【先端技術・人材基盤の強化】 80

技術ロードマップ 81

宇宙技術戦略（案）

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」を新たに策定した。

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」を含め、今後の予算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 [1]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] 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する。

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する。

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する。

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する。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、評価する。

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、緊要性を評価する。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、高い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、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、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、技術ロードマップを含め、技術開発や支援の在り方について提示した。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. 衛星

I. 通信

(1)将来像

現在、衛星通信においては、常に国土上空からリージョナルな通信を提供する静止衛星に加え、低軌道から低遅延かつグローバルカバレッジの通信を提供する低軌道メガコンステレーションの実利用が始まっており、今後更に進展していく見込みである。また、近い将来には、スマートフォンと低軌道衛星等とのダイレクト通信の実現、光通信やモバイル技術の衛星インフラへの適用、宇宙空間での通信需要増大に対応する新たなデータ処理アーキテクチャの導入が開始される見込みである。

Beyond5G(6G)が実現する 2030 年代においては、地上系ネットワークと非地上系ネットワーク(NTN:Non-Terrestrial Network、静止衛星、低軌道衛星コンステレーションや HAPS(High Altitude Platform Stations) など)が融合し、陸・海・空・宇宙が多層的・機能的かつ安全でシームレスにつながり(マルチオービット化)、高速・大容量・低遅延・多元接続[2]の通信サービスが、民生や安全保障分野において提供されていく。例えば、離島、海上、山間部等の通信インフラが整備されていない地域の効率的なカバーや、ドローンや空飛ぶクルマ等の飛行体への通信サービスの提供、衛星観測データの活用の高度化、災害時に地上通信網が被災した場合や有事における通信の確保への貢献が見込まれる。

(2)環境認識と技術戦略

衛星通信は、宇宙産業全体の中で最も大きな市場規模を占めている。我が国においては、衛星通信は地上通信とは独立した発展を遂げてきており、静止衛星を中心とした技術面・運用面の蓄積に加え、光通信や量子暗号通信等の先端技術開発において優れた実績を有することが強みである。他国による低軌道メガコンステレーション構築の取組の活発化や、通信サービスの高速・大容量化に伴い、今後 10 年でデータ通信分野は 2 倍以上に市場が拡大する見通し[3]もある。衛星通信が、災害時及び有事の際における通信の抗たん性確保や、Society 5.0 の実現に貢献する重要技術となることを踏まえれば、前述の地上系と非地上系ネットワークの連携による将来像の実現に向け、その自律性の確保と戦略的な技術開発に取り組み、市場獲得につなげていく必要がある。

① 衛星間や軌道間及び宇宙と地上を結ぶ光通信ネットワークシステム

i. 環境認識

衛星間や軌道間及び宇宙と地上を結ぶ光通信ネットワークシステムが、周波数資源を消費せずに大容量通信を可能とするため、低軌道通信衛星コンステレーションへの適用を含め、世界で急速に開発が進展している。

我が国は、2005 年に JAXA、欧州宇宙機関(ESA)等によって、衛星間光通信実験に世界で初めて成功したことを皮切りに、2020 年に JAXA が静止軌道に光データ中継衛星を打ち上げ、今後、光通信で静止軌道-低軌道間のデータ中継技術の実証を予定する等、光通信の基盤技術開発に

---

[2] 多元接続: 一つのノード(基地局、衛星など)から多くの端末に同時に通信接続すること(Multi-Access)

[3] 出典:NSR 社 https://www.nsr.com/satcom-data-traffic-in-geo/
Straits Research 社 https://straitsresearch.com/jp/report/satellite-communication-market

取り組んでいる。

他方、米国では SpaceX 社による Starlink[4]や Amazon 社による Kuiper[5]において、低軌道衛星コンステレーション構築の取組が進展すると同時に、衛星間光通信の適用も進む。また、ミサイル探知・追尾等を目的として、小型通信衛星を含め、最大 1,200 機もの衛星コンステレーションシステムを構築すべく、宇宙開発庁（SDA）が拡散型戦闘宇宙アーキテクチャ（PWSA）構想を立ち上げた。2023 年に実証フェーズ（Tranche 0）を始動させ、最初の衛星の打上げに成功した。2026 年までの次なるフェーズ（Tranche 1）においては、光通信衛星も含む、126 機の小型衛星から成る低軌道通信衛星コンステレーションの構築を目指す。

欧州では ESA が静止軌道に光データ中継衛星 EDRS-C を打ち上げ、2020 年より光データ中継の実運用を行っている。これに加え、米 PWSA 構想や米 SpaceX 社による Starlink、中国 Guo Wang[6]等、主要国のメガ通信コンステレーション計画を受け、2023 年より、欧州委員会において低軌道を含めた多軌道通信ネットワーク構築を目指したプログラム（IRIS²）を開始している。

ii. 技術開発の重要性と進め方

光通信の低軌道通信衛星コンステレーションや中軌道、静止軌道通信衛星等への適用を通じて、海上や極域などへの通信サービス提供領域の拡大を可能とするとともに、リモートセンシングの分野では大容量の観測データの地上へのリアルタイムに近い伝送を可能とし、地球観測衛星や静止通信衛星の通信需要の増加への対応も見込まれる。また、衛星間の光通信ネットワークにより、災害時や有事の際にも、地上システムの影響を受けずに通信が可能となる。

既存の低軌道通信衛星コンステレーションが世界で競争が過熱し、周波数獲得が困難となる中、光通信は周波数資源を消費しないため、将来的には我が国による低軌道通信衛星コンステレーション構築に向けた重要な要素となる。加えて、我が国のこれまでの光通信端末や光通信システムに関する基盤技術の蓄積を活かすことにもつながる。このため、標準化を含めた海外動向を踏まえた上で、相互接続等も視野に、本技術の開発にシステムとして迅速に取り組むことが非常に重要である。例えば、現在、我が国においては、衛星間光通信ネットワーク技術の確立に向け、実証に当たっての全体システム設計に着手するとともに、低軌道衛星間光通信ネットワークシステムや衛星間光通信端末等、国際競争力を持ち得る重要要素技術の研究開発を行っている。利用省庁のニーズも踏まえつつ、2Gbps 以上の通信速度を目指し、2023 年度までのシステム設計を踏まえ、2029 年度までにシステム実証を実施する。

また、加速する世界に遅滞することがないよう、光通信ネットワークの早期の社会実装を目指し、コンステレーションの構築を進めることが非常に重要である。さらに、衛星間で 100Gbps の通信速度を実現する光通信端末の実用化に向けたデジタルコヒーレント技術[7]の研究開発を着実に進めることも重要である。

これに加え、我が国の光通信技術の競争力を更に上げていくための基盤技術開発も重要である。具体的には、小型軽量化を実現する光増幅器の高出力化や、衛星−地上間の光通信による通信速度を現状の Gbps クラスから Tbps クラスへと高速化していく次世代補償光学デバイスに係る研究開発にも着実に取り組む。また、光データ中継衛星の運用を継続し、2024 年度に打上げを予定する SAR 観測衛星 ALOS-4 との間で行う光衛星通信実証実験に向けた準備を実施する。

---

[4] 23 年 11 月現在、5208 機以上（34396 機、通信速度 20Gbps/機目標）

[5] 23 年 11 月現在、2 機（3236 機、通信速度 50Gbps/機目標）

[6] 23 年 11 月現在、0 機（12992 機、通信速度目標等、詳細不明）

[7] デジタルコヒーレント技術：光の振幅、位相の情報を使って伝送できる情報を増やす技術

2025 年度に打上げ予定の技術試験衛星9号機（ETS-9）により、静止軌道－地上間で世界最高レベルとなる 10Gbps の宇宙光通信技術の実現に向けたフィールド実証も行うとともに、低軌道－地上間で 100Gbps の実現に向けた開発も着実に取り組む。

さらに、比較的少数の衛星で広域をカバーできる静止軌道通信衛星ネットワークへの光通信端末実装が可能な国産の静止衛星の開発について検討が必要である。

② 大容量で柔軟な通信を提供するデジタル通信ペイロードシステム

i. 環境認識

世界における新たな静止通信衛星の契約については、高速大容量通信サービスの提供や、航空機や船舶等における移動体への通信サービスの提供、また、軌道上でソフトウェアを書き換えることにより、目まぐるしく変わる通信ニーズの変化に対応可能なデジタル通信ペイロードが大半となってきており、安全保障・民生分野において今後もこの傾向は続く見込みである。

欧米企業は既に何世代にもわたり、安全保障用途でデジタル通信ペイロードを開発・実用化するとともに、民生分野にも転用してきている。例えば、2001 年の米 Boeing 社が率いるチームが開発した防衛通信衛星 WGS（Wideband Global SATCOM）によるデジタル通信衛星の開発を皮切りに 仏 Airbus 社が ESA の ARTES プログラムの下で開発した通信衛星 SES-12 にて 2019 年に軌道上実証に成功した。2020 年に米ロッキード・マーチン社が米宇宙軍向けにフルデジタルの防衛静止通信衛星 AEHF-6 を打ち上げ、通信コンステレーションを完成させている。2021 年には仏 Thales Alenia Space 社が、航空機内の衛星インターネットの商業提供等を念頭に、フルデジタルの商業静止通信衛星 SES-17 を打ち上げ、世界市場において受注を積み上げている。こうした実績を基に米 Boeing 社の 702X、仏 Airbus 社の OneSat、仏 Thales Alenia Space 社の Space Inspire など欧米各社がフルデジタルペイロードを搭載した商用通信衛星プラットフォームとして販売しており、OneSat、Space Inspire については 2024 年に打上げが予定されている。

また、世界商用市場において使用されている広帯域通信は現在 Ka 帯（26.5GHz～40GHz）が主であるが、徐々にひっ迫しつつあり、より多くの通信需要を満たす、更に広い広帯域通信を持つ高周波数帯域、Q 帯（33GHz～50GHz）、V 帯（40GHz～75GHz）などの研究開発が日米欧等を中心に活発に行われている。

ii. 技術開発の重要性と進め方

Beyond5G（6G）を見据えた世界の潮流を踏まえ、我が国においても、大容量で柔軟な通信を提供するデジタル通信ペイロードシステムにより、より多くのデータを通信し、通信地域や周波数などを時々刻々と変化する通信ニーズへ柔軟に対応していくことや、有限の周波数資源をより効率的に活用するために、高周波（Ka/Q/V/W[8]/E[9]）・高効率 RF 機器 [10]の開発が重要になる。

我が国は、フルデジタル通信ペイロード、固定・可変ビームを開発してきており、2025 年度にこれらを搭載した ETS-9 の打上げを目指し、プロトフライトモデルの製作・試験、通信ミッションの搭載試験等を進めている。また、高発熱を伴うフルデジタル通信システムを衛星に搭載するため、機械式二相流体ポンプループによる能動的高効率排熱システムの研究開発を実施している段階にある。他方、本技術がシステムとして将来通信衛星市場の中核を成すことが想定され、災害時や

[8] W 帯：75GHz から 110GHz の周波数帯を指す

[9] E 帯：71GHz から 76GHz、81GHz から 86GHz の周波数帯を指す

[10] RF 機器：電波(RF：Radio Frequency)に関わる機器

有事の際の通信の抗たん性強化に資することに鑑みれば、安全保障・民生分野における国内外の静止通信衛星市場の獲得も念頭に、これら既存事業を含め着実に進めることが非常に重要である。

また、柔軟な通信ビーム制御を実現するデジタルビームフォーミング（DBF）、より広い通信覆域を実現する広角・低利得アンテナ（DRA：Direct Radiation Antenna)等のフェーズドアレイアンテナ、周波数可変コンバータ[11]や低雑音増幅器[12]（LNA：Low Noise Amplifier）、固体化電力増幅器[13]（SSPA：Solid State Power Amplifier)、デジタル通信ネットワークシステム等の更なる要素技術の開発についても、民間事業者の世界市場における技術的優位性、自律性のバランスを見極めながら着実に実施していくことが、非常に重要である。

③ 地上系とのシームレスな連接を実現する非地上系ネットワーク（NTN）技術

i. 環境認識

Beyond5G（6G）における高速・多元接続・低遅延かつ低消費電力の次世代通信を見据えると、地上無線局のみでは十分な通信面積カバレッジを実現することは困難であるため、地上系とのシームレスな連接を実現する非地上系ネットワーク（NTN）技術の重要性が国際的にも認識されている。無線局やルーティングの機能を衛星や HAPS 側に搭載し、低軌道/中軌道通信衛星コンステレーションや静止通信衛星、HAPS 等を多層的かつシームレスにつないでいくことが可能となる。また、前述のとおり、大容量で柔軟な通信を提供するデジタル通信ペイロードシステムの実用化が進展し、更なる技術発展が期待されるところ、衛星や HAPS にデジタル通信ペイロードも搭載することで、エッジコンピューティング機能も組み合わせ、衛星や HAPS 内での高度な信号処理や必要なデータのみ伝送することも可能となる。

これらを実現する上で、移動体通信の技術仕様の国際的標準化プロジェクトである 3GPP（Third Generation Partnership Project)において、衛星に対する通信規格の標準化が進められている。現時点で衛星による 5G サポートに必要な基本的機能の定義まで制定(リリース 17)されており、既に S バンド[14]や L バンド[15]を使った商業化が進んでいるだけでなく、NTN-TN（地上系ネットワーク）間のモビリティ拡張や、シームレスな衛星の切り替え、Ka バンドサポートなどの商用化を見据えた機能の標準化が間もなく完了する見込みである（リリース 18）。さらに、2025 年半ばにはダウンリンクカバレッジ拡張やアップリンク容量拡張（ハイパワーUE[16]含む）、衛星や HAPS のペイロードがデジタル化されることを前提にした再生中継方式、Ku バンドサポート(リリース 19)などの要求について順次検討、仕様が策定されていく予定である。将来的には、これら 3GPP 準拠技術の導入によって、静止軌道/中軌道/低軌道/HAPS の各通信衛星／ノード[17]に地上の携帯電話基地局と同様の機能を持たせることで地上の基地局を介さない端末間通信という耐災害性の高い新サービスの実現も期待される。

世界においては、米 SpaceX 社による Starlink や Amazon 社による Kuiper、英 OneWeb[18]等、全

[11] 周波数可変コンバータ：対応する周波数を軌道上で変更可能な周波数変換器

[12] 低雑音増幅器（LNA）：微弱な入力信号を選択的に増幅する装置

[13] 固体化電力増幅器：半導体を使用した電波の電力増幅器

[14] S バンド：2GHz から 4GHz の周波数帯を指す

[15] L バンド：0.5GHz から 2GHz の周波数帯を指す

[16] ハイパワーUE: User Equipment（利用者端末）の送信電力を増加させた通信機器。送信電力を増やすことで通信サービスを受けられる範囲を増やす効果が期待される

[17] ノード：通信網を構成する基地局などの連接点

[18] 23 年 11 月現在、634 機（23 年末 648 機、通信速度 7.5Gbps/機目標）

世界へのインターネットアクセス提供を目指す民間企業による低軌道コンステレーション構築が急速に進むとともに、従来型静止軌道通信オペレータが低軌道・中軌道衛星コンステレーションの構築に乗り出しており、欧州委員会の IRIS[2] 構想 [19]においても、危機対応時等に加盟国に衛星通信サービスを提供すべく、低軌道衛星だけでなく、中軌道、静止軌道にも衛星を配置し、広範な通信覆域を有する通信インフラ構築を計画している。また、次世代通信衛星の開発に向けて、シームレスな通信を可能とする再生中継技術について、米 Lockheed Martin 社が 2024 年に実証機器を搭載した衛星の打上げを表明している。OneWeb は既存の第 1 世代では通信信号の変復調を行わない透過中継型衛星を採用していたが、第 2 世代では変復調を行う再生中継型衛星への移行を目指した実証実験を行っている。

さらに、スマートフォンなどのデバイスから衛星への直接通信（ダイレクトアクセス）の商用化競争が激化している。ダイレクトアクセスの商用化に向けて、地上モバイル周波数 [20]を利用する米 SpaceX 社の Starlink “Direct to Cell”や米 AST SpaceMobile 社が先行する中、衛星専用バンドを用いる 3GPP 仕様準拠の NTN においては、メッセージングサービス等に代表される IoT-NTN は 2023 年より商用化段階に入り、音声通話等を実現する NR-NTN も 2026 年頃から商用化が進展すると思われる。

国内の通信事業者においても、Beyond5G（6G）を見据え、米 SpaceX 社や Amazon 社等の国外企業が提供する低軌道通信衛星コンステレーションのバックホール回線としての利用や、衛星-携帯電話間の通信サービスの提供、国内外の光通信、HAPS 等の技術を活用した、新たな衛星通信サービス提供等を目指す動きが顕在化している。[21]

ii. 技術開発の重要性と進め方

NTN 構築に向けては、周波数獲得を含め世界で競争が過熱する中、低軌道通信衛星コンステレーション構築に向け既に巨額な投資を行う海外プレイヤー等との提携を通じ、海外市場の獲得も目指した取組を推進することが重要である。

中長期を見通した技術開発としては、NTN と TN との融合に欠かせない gNodeB[22]などの Beyond5G（6G）無線局(RAN)機能の衛星や HAPS への搭載化技術や、周波数の効率的な利用に資する技術、多層的な NTN と地上間でシームレスな通信を可能とするソフトウェア定義ルータ [23]、NFV[24]、ネットワークスライシング [25]・再生中継技術などの Beyond5G（6G）通信ソフトウェア技術の実装技術の開発について検討が必要である。

④ 秘匿性・抗たん性を確保する通信技術

i. 環境認識

---

[19] 2027 年までに低軌道に 170 機配置、中軌道衛星、静止軌道衛星の配置、通信速度等は現在検討中

[20] 地上モバイル周波数：携帯電話の通話に使用している周波数帯。米 Starlink 社は 1.9GHz 帯、米 AST Space Mobile 社は 840MHz 帯で軌道上実証中

[21] KDDI 社：https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2021/09/13/5392.html
Softbank 社：https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2023/20230912_01/

[22]gNodeB：移動体通信事業者が街頭などに設置している、5G 方式の無線通信に対応した移動体通信基地局

[23] ソフトウェア定義ルータ：機能をソフトウェアによって定義されたルータ。ソフトウェアの変更によって対応するプロトコルなどの機能変更が可能

[24] NFV：Network Function Virtualization の略。ルータ、スイッチなどのネットワーク機能を計算機上に仮想化する機能

[25] ネットワークスライシング：ネットワークの性質毎に仮想的に分割し、それぞれのニーズに合った通信環境を提供する。

衛星通信を含む無線通信は、有線よりも傍受や妨害に対するリスクが高いことに加え、量子コンピュータの現実化に伴い、従来の暗号アルゴリズムの安全性が 2030 年頃には危殆に瀕することが予想される。

また、暗号通信技術については、各国において量子暗号技術の研究開発が進められている。例えば欧州では、2024 年から 3 年間の実験ミッション EuroQCI や 2023 年打上げ予定の QKDSat を始め、量子暗号鍵配送（QKD）ネットワークの構築が進められている。中国は、墨子号を活用した実証システムによって衛星 QKD の実現に必要な技術課題に取り組んでおり、地上−衛星で世界最大規模（4,600km）の量子暗号通信網を構築している。

加えて、米国では NIST が解読耐性を高めた耐量子計算機暗号（PQC）の標準化作業を推進しており、2024 年には標準となる方式を決定する予定である。

ii. 技術開発の重要性と進め方

我が国においては、自衛隊の任務拡大や海上保安庁の能力強化等に伴う需要増や周辺国による衛星への妨害能力の向上に対応する必要があり、ユーザー要求に応じた安全な通信を提供するための秘匿性・バックアップ性を向上させるセキュリティ通信技術の開発を進めることが重要である。このため、民生通信技術の採用に伴うセキュリティ強化や、衛星搭載系の抗たん性強化、サイバー探知・対処に資する技術開発について継続的に検討・取組が必要である。

前述の低軌道通信衛星コンステレーションや静止通信衛星等と地上間の光通信は、従来の電波通信よりも指向性が高く、特定の狭い範囲にビームを照射するため、外部からの盗聴や傍受が困難なことから秘匿性が高いという特徴も有しており、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）が開発を進める光地上局の社会実装も重要である。

また、衛星量子暗号通信技術については、我が国においては 2010 年より NICT が構築した都市間レベルの実証ネットワークが長期稼働している。こうした技術的強みを活かし、量子暗号装置等の開発を進めるとともに、実運用も含めた宇宙実証を行うことにより、距離によらない堅牢な量子暗号通信網の早期の実現を図っていくことが重要である。

Ⅱ. 衛星測位システム

(1)将来像

我が国が測位能力を自立的に確保するために整備が進められている準天頂衛星システムは、我が国の安全保障の確保、社会課題の解決や産業・経済の活性化、防災・減災、国土強靭化において必要な位置・時刻情報を提供する社会インフラとして、さらに、アジア太平洋地域における社会インフラとして、その役割を果たしていくことが期待されている。今後、7機体制の確立により、我が国の衛星のみで測位が可能となる持続測位を実現することで、必要不可欠な社会インフラとして、一層の活用が期待される。さらに、測位サービスの安定供給を目的としたバックアップ機能の強化や利用可能領域の拡大のため、7機体制から11機体制に向け、コスト縮減等を図りつつ、検討・開発に着手することとしている。

準天頂衛星システムが提供する先進的な高精度測位サービスの活用により、将来的には、除雪や点検といったインフラの維持管理作業の効率化や、自動車やドローン、農機等の自動化・無人化によるスマートシティ、スマート農業の実現が期待され、人口減少に直面している我が国における労働力不足や高齢化等の社会課題の解決や、イノベーションによる日本経済の更なる活性化に大きく貢献すると見込まれる。このような将来を見据え、より使いやすい高精度測位サービスの提供を行うことで、高精度な地図等の地上側の情報と組み合わせたソリューションが社会実装され、更にそれが様々な分野に広がっていくことが期待される。

(2)環境認識と技術戦略

上記に向け、我が国が測位能力を自立的に確保するため、準天頂衛星システムの整備を進めていく必要がある。その際、システムとしての成立性を担保し、万一の事態が発生した際の供給不安を払拭するため、自律性の観点から、妨害・干渉に強い高精度な衛星測位システムとする技術開発及び開発整備が非常に重要である。(妨害回避機能の強化(ソフトウェア無線等)、時刻・位置決定の高精度化(光衛星間リンク、クロック技術、細密軌道制御技術、補正情報の精度向上・収束時間の短縮)、維持・運用の効率化(デュアルロンチ、運用自律・自動化)、小型・軽量・省電力化等)

さらには、ユーザーの利用端末の高度化や抗たん性やセキュリティ耐性の強化を通じた、利用領域及びユーザーの拡大に関する実証や技術の開発も重要となる。(受信機の信頼性・抗たん性・セキュリティ強化、受信機の高精度化、宇宙用受信機の適用領域拡大等)

① 妨害・干渉に強い高精度な衛星測位システム

i. 環境認識

衛星測位システムの一つである米国の GPS は、当初は安全保障用途として構築されたが、民間航空機が空路を誤ったことにより撃墜される事件が発生したことを機会に、安全な航行の確保を目的として民間にも一部のサービスが開放された。このため、基本的に測位システムは国家が主導して構築・維持・運用し、民間事業者が無料で提供サービスを使用するという構造になっている。現在は、スマートフォンのアプリケーションから金融取引まで、社会活動に関連する多様なユースケースに利用されており、チップ等を含む利用分野の市場規模は 2021 年時点で$168B (Euroconsult Space Economy 2021)である。

民生産業においては、各国で様々なサービスに利用されており、衛星測位サービスは社会に根付いたものとなっている。その中でも、我が国は、世界に先駆けてセンチメートル級の高精度測位サービスを提供しており、自動走行や自動農機等への導入が進んでいる状況であり、今後モバイルヘルスや自動運転等の人命に関わるクリティカルなユースケースを実現するために、更なる測

位精度やサービス品質の向上、停止期間の短縮が求められている。

安全保障においても衛星測位システムは利用されており、軍事演習等で妨害・干渉事例が顕在化していることに伴い、世界的に、妨害耐性・抗たん性の強化が急務となっている。具体的には、米国において約 50 年ぶりとなる測位分野の技術実証衛星(Navigation Technology Satellite-3：NTS-3)を 2024 年に打ち上げ、電子走査アンテナやソフトウェア無線機等を組み合わせて活用することにより、配信信号エリアを限定することによる信号強度強化や周波数を変更することで妨害を回避すること等の抗たん性向上技術の実証が予定されている。同様の技術は、欧州においても次世代測位衛星に搭載予定であり、2025 年までに打上げ予定である。

一方、民生分野において、米国の Globalstar、Iridium 等の低軌道通信衛星に測位ペイロードを相乗りさせ、測位信号を配信している事例や、米国の Xona 社や中国の Geespace 社等のように、低軌道通信衛星との相乗りではなく、低軌道測位コンステレーションを民間主導で構築する事例も見受けられる。しかしながら、新たにこのような低軌道測位コンステレーションを構築するには、十分な数の低軌道衛星や周波数を確保する必要があることから、容易ではないと考えられる。なお、周波数については他国にて既存周波数帯との干渉を踏まえて別の（例えば C 帯）周波数利用を検討する動きも見られる。

ii. 技術開発の重要性と進め方

現在、世界には、GPS（米国）、GLONASS（ロシア）、Galileo（欧州）、北斗（中国）、NavIC（インド）、準天頂衛星システム（日本）の6つの衛星測位システムが存在しており、これらは、継続的に測位精度やサービス品質の向上や停止期間の短縮が進んでいる。例えば、測位衛星の精度の指標の一つである SIS-URE[26]は、GPS や準天頂衛星では約 0.8m（95%)程度だが、Galileo は約 0.2m（95%）程度と現段階で先行している。測位衛星も国際競争の時代に入っており、精度や安定性等の観点から他国の衛星測位システムに劣後してしまうと準天頂衛星システムが将来的に使われなくなってしまう懸念があるため、我が国も継続的な技術開発を実施していく必要がある。

例えば、測位精度の更なる向上のためには、衛星が送信する位置・時刻情報を更に正確なものとすることが戦略的に必要である。そのために、光時計やアンサンブルクロック等の超高精度クロックシステム技術や、光衛星間リンク等を用いた高精度軌道時刻推定技術に取り組む必要がある。さらに、高精度測位サービスにおいては、補正情報の精度向上やリアルタイム化が求められる。また、測位サービス品質を高め、停止期間を短くするためには、ΔV 制御高度化等の細密軌道制御技術が必須となる。加えて、衛星測位システムを継続的に運用していくためには、衛星打上げコストを継続的に削減する必要があり、衛星バス、測位ペイロードの小型・軽量・省電力技術や、デュアルロンチ化技術、運用自律・自動化が不可欠である。

また近年、スプーフィングやジャミングの事例が増加している。例えば、ロシアによるウクライナ侵略後、カリーニングラードや黒海、東地中海、フィンランド東部においても、スプーフィングやジャミングが報告されており、安全保障分野を中心に、これらへの対応として、拡散コード認証等による信頼性向上とソフトウェア無線等による抗たん性強化に取り組むことが必須となる。

さらに、主要部品の国産化にも並行して力を入れて取り組むことも戦略的に必要である。例えば、測位衛星の心臓部となる原子時計については、我が国以外の5つのシステムは自国製のものを搭載している一方で、現状では、我が国の準天頂衛星には他国製の原子時計を搭載せざるを得ない状況がある。自律性、コスト、調達期間等の観点から、このような状況を解消していく必要があり、段階的な国産化を進めるなど、適切なサプライチェーンを構築・維持し、最終的に国産

[26] SIS-URE: Signal-In-Space User Range Error の略。衛星に起因する、衛星とユーザーを結んだ線の方向の誤差。

化を可能とする実現可能性が十分にある道筋を作ることが重要である。

これらのことから、準天頂衛星システムについて、7機体制に向けた開発・整備・運用やバックアップ機能等を強化した11機体制に向けて検討・開発に着手することが非常に重要であることに加え、民生・安全保障共通して、測位精度やサービス品質を向上させる時刻・位置決定の高精度化(光衛星間リンク 、クロック技術、細密軌道制御技術、補正情報の精度向上・収束時間の短縮)、これに加え衛星開発・打上げコストを継続的に削減する維持・運用の効率化(デュアルロンチ、運用自律・自動化)、小型・軽量・省電力化の開発、安全保障分野を中心に必要となる、妨害・干渉への耐性を強化する妨害回避機能の強化(ソフトウェア無線[27]等)について、上述のとおり自律性等の観点から主要部品の国産化を図りつつ1つのシステムとして推進することで、高精度で妨害・干渉に強い測位システムを実現していくことが、非常に重要である。

② 利用領域及びユーザーの拡大に関する実証や技術の開発

i. 環境認識

民生分野における受信機のうち、位置・時刻情報に関するものは、マスマーケットでの利用が既に広まっており、スマートフォン等の一部として民生市場の中で利用が進んでいる。この分野は生産数が多いことから、小型・軽量化、低コスト化が進んでいる。一方、準天頂衛星システムが提供する、世界的にも先進的な高精度測位サービスに対応した受信機については、マスマーケットのものより大型・高価であったが、近年は小型化・低廉化が進んでおり、継続的に産業用機器等での利活用が今後も進捗する見込みである。具体的には、準天頂衛星システムに係る国内市場規模は、2021 年の約 4 兆 4,039 億円から 2030 年に約 18 兆 8,843 億円へ成長することが見込まれるという試算が存在する。[28]また、海外に対しても、準天頂衛星システムという測位システム単体での展開ではなく、例えば農業、工業、測量といった個別のソリューションの提供と一体となって準天頂衛星システムを展開していくことによって、今後、関連市場がより広がっていくことが期待される。

特に、我が国の生活を支える基盤である重要なインフラにおいても、衛星測位システムは必要不可欠な存在となっている。例えば、証券取引所・金融情報サービス企業と証券会社・投資銀行のトレーディング基盤の間や証券会社・投資銀行の拠点間の時間遅延を検知するためには、協定世界時(UTC)との同期誤差が数十ナノ秒レベルであることが必須であり、これを満たすことができる測位衛星が利用されている[29]。航空分野においては、準天頂衛星システムと連携して衛星航法システム(SBAS)が運用され、航空機の航法性能向上が図られている。また、携帯電話においても、基地局間の電波発射のタイミングの同期を取るための手段として、衛星測位システムが提供する時刻情報が広く活用されている。仮に、我が国において 30 日間測位衛星が停止してしまった場合、その経済損失は、2021 年時点で 9,057 億円、2030 年時点で 18,950 億円に達するとの試算がある。[30]重要なインフラは民間企業等の各主体で運用されているが、GPS のみではなく準天頂衛星も活用するような対策を講ずることにより、万一、GPS が利用できなくなった場合のシステムの安定性を高めることができると考えられる。

---

[27] ソフトウェア無線（SDR, Software-defined radio）は、ハードウェアに変更を加えることなく、システムを制御するソフトウェアを変更して無線通信方式を切り替えることを可能とする無線通信技術である。一般的に広い周波数範囲において多くの変調方式が可能となるように、ソフトウェアが汎用性の高いプログラム可能なハードウェア(電子走査式アンテナ等)を制御するものである。

[28] 内閣府宇宙開発戦略推進事務局調べ。

[29] 宇宙政策委員会 宇宙安全保障部会 第２９回会合（平成 30 年 9 月 20 日）の三井物産セキュアディレクション株式会社資料

[30] 内閣府宇宙開発戦略推進事務局調べ。

これに加え、従来は測位システムの利用対象領域としていなかった静止軌道や月近傍においても、受信機の受信感度の向上や測位衛星の SSV[31]における情報が利用できるようになったことで、今後利用の拡大が見込まれており、静止衛星である ETS-9 では測位精度が求められる GPS 航法を基盤とした自律的な軌道制御を試みる予定である。

安全保障分野では、従来から測位システムが国家主導で開発が進められてきた背景から、例えば米国の NTS-3 においては、米国の AFRL[32]が主導する形で、ユーザーのソフトウェア受信機と衛星搭載のソフトウェア無線機を統合的に実証するための研究開発が取り組まれており、衛星の打上げと同じく2024 年ごろに全体システムとして実証される計画である。欧州においても、2016 年から初期サービスを提供している PRS サービス [33]対応の受信機について、小型化・製造コスト削減に向けて EUSPA[34]が「ULTRA（Ultra low-cost PRS Receiver）」プロジェクトを推進することで、厳しいセキュリティ制約が課される中でもユーザー利便性.の高い受信機となるよう取り組まれており、今後、小型化されたユーザー機器の開発が進む見込みである。

ii. 技術開発の重要性と進め方

衛星測位システムを利用するためには、測位衛星から配信される信号を受信し、位置・時刻を決定する受信機が必要であり、スマートフォンに内蔵されているチップを始め、衛星搭載品や防衛装備品等、様々な製品がユーザーの利用端末となっている。また、衛星測位システムの利用拡大に当たっては、RTK[35]の代替サービスとしての位置付けも含めた MADOCA-PPP の実用サービスの提供等により地上での利用を加速化させることや、7機体制における性能向上した SBAS 運用により航空機の航法性能向上を図ることが非常に重要であるが、それにとどまらず、宇宙での活用も有望視されている。例えば近年は、測位衛星より低い軌道の衛星だけでなく、静止衛星による利用や月近傍でも利用が想定されている。静止軌道を含む高高度衛星や月近傍等の新たな領域での利用には、地上での利用とは異なりサイドローブ [36]のような微弱信号を用いた測位技術を利用することになる。そのため、微弱信号を受信できる機器の開発や、測位信号を受信する衛星側で高精度測位信号を処理できるオンボード PPP(Precise Point Positioning)等に取り組むことが非常に重要である。

また、利用ユーザーの更なる拡大には、実証等を実施し利用者のニーズを把握しそれに対応していくことも含め、測位精度の向上に加え、衛星からの信号になりすまし正常な測位を妨害するスプーフィング等の脅威が増加していることを踏まえた抗たん性やセキュリティ耐性の強化も重要となる。

具体的には、利用ユーザー拡大に必要となる測位精度の向上、抗たん性やセキュリティ耐性の強化及び受信機の小型・低コスト化といった高付加価値化の観点から、高高度・月近傍対応マル

---

[31] Space Service Volume : 高高度（GNSS 衛星の近く又は、より高い高度）の軌道にいる GNSS のユーザー, 国連により Interoperable GNSS Space Service Volume (SSV)として、低軌道から静止軌道までの基準信号性能を文書化、定義している

[32] Air Force Research Laboratory

[33] Galileo Public Regulated Service : 政府公認のユーザーや高い継続性を必要とする機密アプリケーション向けの暗号化されたナビゲーションサービス

[34] European Union Agency for the Space Programme : 2021 年に設立された欧州連合宇宙計画庁(EUSPA)は、当初 2004 年に European Global Navigation Satellite Systems Agency (GSA)として創設された宇宙機関であり、欧州連合宇宙計画を管理する欧州連合の機関である

[35] RTK: Real Time Kinematic の略。携帯電話ネットワーク等を用いた高精度測位システム

[36] アンテナの電波を放射状に示した際に、主に使用する信号強度・感度強い部分のメインローブに比して、信号強度・感度がわずかに生じている部分を指す

チ GNSS 受信機や衛星オンボード PPP、受信機用チップスケール原子時計、アダプティブアレイアンテナ、マルチパス [37]対策に資する信号処理技術、次世代受信技術（アルゴリズム）等の受信機の高精度化と複数情報源に基づく偽情報対策、認証やソフトウェア受信機と電子アンテナを利用した妨害回避等による受信機の信頼性・抗たん性・セキュリティ強化に関する実証や技術開発を実施することが重要である。これに加えて、利用領域拡大に必要となる宇宙用受信機の適用領域拡大の開発を推進することで、利用領域及びユーザーの拡大を実現することが重要である。

[37] 電波が発信源から受信点まで直進するだけでなく、山やビルなどに反射して複数のルートを通って伝播すること

Ⅲ. リモートセンシング

（1）将来像

小型衛星コンステレーションの構築の進展や新たなセンサの開発等により、地球観測衛星の時間・空間・波長分解能が高まると同時に、ビッグデータ処理及び人工知能（AI）といったソリューション技術が発展する中、地球観測衛星データを短時間かつ自動で宇宙から地上に届けると同時に、ドローンのデータ、IoT データ、気象データ、海洋データ、その他の地上で得られるデータ等を組み合わせて必要な解析を行うことができるようになり、幅広いアプリケーション・サービスを実現することが可能となる。

これによって、安全保障に加え、地震・津波・集中豪雨等の大規模災害への対応を含む防災・減災、国土強靱化、2050 年カーボンニュートラルの実現を含めた地球規模課題への貢献、さらには自動運転やスマートシティ、スマート農林水産業等の民間市場分野におけるイノベーションの創出が期待される。

（2）環境認識と技術戦略

リモートセンシング分野は、これまでの大型観測衛星による広域・高精度観測に加え、小型観測衛星コンステレーションの登場によって高頻度の観測が可能となり、商業化と市場の拡大が進展している。ロシアによるウクライナ侵略においては、各国が状況把握のため、高分解能化や高頻度化された商用観測衛星を活用している。我が国においては、多様なセンサを搭載した観測衛星製造・運用・解析の経験の蓄積があり、小型衛星コンステレーションスタートアップ企業や非宇宙領域のプレイヤーも含めたエコシステムを形成している。こうした我が国の強みを活かしながら、新たな市場を形成していくことが必要である。

① ニーズに即した情報を抽出するための複合的なトータルアナリシス技術

i. 環境認識

ビッグデータ処理及び人工知能（AI）といったソリューション技術が発展する中、統合的な観測データセットの整備に加え、衛星リモートセンシングデータをドローンのデータ、IoT データ、気象データ、海洋データ、その他の地上で得られるデータ等と融合し、複合的な解析を実施することで、SDGs の達成や Society5.0 の実現に資する幅広いアプリケーション・サービスに適用するニーズが高まっている。

米国では、2022 年に国家偵察局（NRO）が 10 年で最大 5,000 億円以上の画像契約を米国企業と締結する等、潤沢な政府予算を背景に、衛星データを解析して主に安全保障用途の顧客のニーズに即した情報を提供する民間事業が更に進展する見込みである。欧州においては、ESA が AI を含めた最先端技術を衛星リモートセンシングに適用する研究開発プログラム・Φ-Lab 等を進めるとともに、EU の観測プログラム・Copernicus データのオープン＆フリー戦略により、ダウンストリーム事業者数を増やしてきている。

将来的には 3D 化技術により、国土管理にとどまらず、都市デジタルツインの構築によるスマートシティ等の実現が想定される。米 Maxar 社がステレオ画像の合成処理によって 3D 化のソリューション提供を実施するとともに、米 NASA は ASTER[38]等により 3 次元地形情報を整備、公開している。また、仏宇宙開発機関（CNES）は仏 Airbus 社と官民共創の衛星コンステレーションプログラ

[38] Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer の略。NASA と日本の経済産業省が共同で 3 次元地形情報を公開している。https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp

ム・CO3D によって、高分解能 3D マップの作成・技術実証を目指す。

我が国の産業界においても、ALOS による観測データを活用して全世界デジタル 3D 地図サービス「AW3D」の世界展開が進められており、航空測量会社においても衛星データを含めた多様な地理空間情報の活用が進む。2020 年代後半以降、商用観測衛星も含め多くの衛星が打ち上げられることが想定される中、2030 年代には地球全体から都市域までシームレスにデジタルツインでつなぐことで、膨大なデータから必要な情報を容易に抽出可能な衛星データ利用ソリューションが展開されることが予想される。

また、衛星以外のデータとの融合やモデルとの同化及び AI を活用したアルゴリズム開発等の分野においては、JAXA 等が気象に応じた地表面や河川等の状態を数値計算する、陸上の水循環シミュレーションシステム（Today's Earth）の実証を進めており、今後社会実装が一層求められる。欧米においても、欧州では地球デジタルツイン（Destination Earth）の開発が開始され、また、NASA と ESA が観測データ解析プラットフォーム（MAAP）の共同運営を開始するなど、衛星データを統合的に活用する機械学習やアルゴリズム、モデルや AI の技術発展が加速している。

ii. 技術開発の重要性と進め方

我が国が様々なデータを複合的に解析する技術を開発し、大規模災害や頻発する風水害への対応、老朽化するインフラの監視、広域海洋監視等、我が国が特に強いニーズを有する分野に適用することは、自律性の観点から重要であるとともに、新たな市場の構築につながる。更に、当該技術に係る我が国の経験の蓄積を活かすことは、我が国の国際競争力の獲得や産業規模の拡大につながることが期待される。

我が国においては、政府において複数の衛星データ提供プラットフォーム[39]が構築され、プラットフォーム間で API 連携を実施し、多種衛星をオンデマンドでタスキングする開発も進む。2020 年より日本全国の 3D 都市モデルの整備・活用・オープンデータ化プロジェクト「PLATEAU」が始まっている。さらに、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）の第３期プログラムにおいて、防災デジタルツインの構築に向けた開発を実施し、実装に向けた道筋を模索している。

加えて、インフラ管理や森林状況把握等の行政課題を念頭に複合的データの解析手法の開発とデータ利用実証も実施している。JAXA を始めとする研究機関においては気象や海洋を始めとする地球規模の環境データの高度化に向け、モデルデータ同化[40]等の解析技術に関する先行した研究開発を進めている。

また、地球全体から都市域までシームレスにデジタルツインでつなぐ将来も見据え、デジタルツインに向けたモデル同化・可視化技術、機械学習や AI による複合・解析技術、データフュージョン等のためのセンサ及びデータ校正・補正技術、ユーザーインターフェースも考慮した衛星データの数値情報化技術や API でのデータ提供基盤の構築、付加価値情報を創出するための画像判読・変化検出の複合解析技術、発展のスピードが速い生成 AI の活用も含めた AI 分析技術の高度化等の開発を進めることが非常に重要である。

加えて、こうしたリモートセンシングを活用したソリューション市場は黎明期であることを踏まえ、官需だけでなく民需、国内市場だけでなく国際市場への展開も見据えた衛星データ利用システムの開発・実証を進めることが非常に重要である。

---

[39] JAXA の G-Portal 、文部科学省の DIAS 、経済産業省の Tellus など。

[40] モデルデータ同化：地球大気等をシミュレーションするための数値モデルに衛星から得られた実測データを取り込む手法。連続的なデータの作成や衛星では観測できない情報の推定が可能となる。< https://earth.jaxa.jp/ja/research/fields/model/index.html>

② 時間情報を拡張するコンステレーション技術等

i. 環境認識

現在、世界において、小型観測衛星コンステレーションの登場によって高頻度の観測が可能となり、高頻度化が有効な安全保障分野の官需が、商業化と市場の拡大をけん引している。米 SDA の拡散型戦闘宇宙アーキテクチャ（PWSA）構想では、ミサイル早期警戒等の安全保障ニーズに対応するため、通信衛星コンステレーションにとどまらず、2029 年までの次なるフェーズ（Tranche 1）において、一部の衛星に赤外線センサを搭載した 35 機の低軌道観測衛星コンステレーション構築も行う計画となっている。また、2022 年に米 NRO が 10 年で最大 5,000 億円以上の画像契約を、光学衛星コンステレーションを展開する米 BlackSky 社[41]、Maxar Technologies 社[42]、Planet Labs 社[43]の3社と締結し、画像購入に加えて、衛星製造・打上げ・地上設備を含む費用も一定率で負担する等、政府予算で民間事業者による衛星コンステレーションの構築を支援している。フィンランドの小型合成開口レーダ（SAR）衛星コンステレーションスタートアップ企業 ICEYE[44]においては、フィンランド技術庁や政府投資機関による出資を受けている。また、こうした欧米民間事業者は、政府調達等による資金力・信用力をレバレッジに、民間資金調達や国際展開も実施している。

他方、これまでの大型観測衛星による広域・高精度観測に加え、コンステレーション技術による高頻度の観測に加えてソリューション技術との組合せで、防災・減災対策を含めた民生分野におけるリモートセンシングの重要性が今後ますます高まる見込みである。令和6年能登半島地震においても、政府の大型観測衛星データに加えて、国内外衛星事業者が政府機関に衛星データを提供する事例が相次いだ。その他、観測データをリアルタイムで活用することで、インフラ管理や災害リスクに係る保険、再生可能エネルギーの出力予測に活用する等、成長が期待される。また、将来的には地球全体から都市域までシームレスにデジタルツインでつなぎ、時間・空間方向に拡がる 4D 情報の強化により「見通せる社会」[45]の実現に貢献することが期待される。

こうしたコンステレーション構築の動きに加え、コンステレーションのより効果的な活用の観点で、欧州では ESA が主導して地上局を介して EU の Copernicus プログラムの衛星 Sentinel とフィンランド ICEYE 社の衛星を協調させて運用する技術の実証を 2021 年に実施した。また、米小型 SAR 衛星コンステレーションスタートアップ企業である Cappella Space 社でもオンボード画像処理技術の軌道上実証を 2022 年に実施したことを公表している。

ii. 技術開発の重要性と進め方

我が国においては光学や SAR 等の小型衛星コンステレーション事業を展開するスタートアップ企業が複数社存在[46]し、運用機数でこそ欧米企業に劣後するものの、地上技術として磨かれたイメージセンサ技術や SAR の高分解能技術等が強みである。また、多波長光学観測を始め、新たなセンサ技術の商業化に向けて取り組むスタートアップ企業も存在する。

---

[41] 2023 年 3 月現在、16 機運用< https://ir.blacksky.com/news-events/press-releases/detail/98/blackskys-new-satellites-complete-commissioning-enter>

[42] 2024 年 1 月現在、0 機運用（6 機目標）< ttps://www.maxar.com/splash/it-takes-a-legion>

[43] 2023 年 12 月現在、21 機運用< https://developers.planet.com/docs/data/skysat/>

[44] 2023 年 7 月現在、27 機運用<https://www.iceye.com/press/press-releases/iceyes-four-new-generation-3-satellites-launch>

[45]自然・社会経済などの将来や、突発的な災害・環境変化などを見通せる社会。

[46] Axelspace 社：2021 年 6 月現在、5 機運用（光学、2025 年までに 12 機目標）
Synspective 社：2023 年 10 月現在、2 機運用（SAR、2020 年代後半に 30 機目標）
QPS 社：2023 年 12 月現在、3 機運用（SAR、2027 年度までに 24 機目標）

利用省庁を含め政府は、こうした企業とともに、衛星コンステレーションの利用拡大に向けた実証や、小型軽量化・低価格化に資するコンポーネント・要素技術の開発等を実施している。加えて、JAXA においては、JAXA の大型観測衛星による広域・高精度観測と民間のコンステレーション技術による高頻度の観測を組み合わせた官民共創プログラムや、オンボードエッジコンピューティング環境を活用した軌道上での衛星間連携の実現に向けた研究開発等を実施している。観測衛星コンステレーションが安全保障や防災・減災、将来的には地球・都市デジタルツインの 4D 化による「見通せる社会」の実現に貢献することに鑑みれば、更に時間分解能と、ユーザーが地上で画像を確認するまでの時間短縮を実現すべく、こうした事業を着実に実施していくことは重要である。

他方、小型衛星コンステレーションは、高頻度（アジャイル）に開発・実証を繰り返す中で、高分解能化、観測幅拡張等、機能・性能を段階的に向上させ、かつ十分な数の衛星を打ち上げることで初めて高頻度・高精度観測という価値が生み出せるため、深い「死の谷」を越えるための大きな先行投資が必要となる。上記の国内スタートアップ企業は、主に上場を含めた民間市場における資金調達によって先行投資を進めているが、激化する国際競争環境を踏まえれば、このような民間エコシステムをうまく活用しつつも、政府としては可能な限り早期に利用省庁・関係機関によるアンカーテナンシーの可能性を追求するとともに、高頻度実証・量産化技術の確立・商業化加速に向けた更なる支援の強化が非常に重要である。

さらには、国内の小型衛星コンステレーションが世界の技術・ビジネスに後れを取らぬよう、多種衛星の協調観測技術や運用自律化技術を含むコンステレーション技術、光通信技術等による高速・高頻度ダウンリンク技術、IoT を活用した地上リファレンスデータ取得等によるスマートタスキング技術、データ取得と同時にデータ解析を行うオンボードエッジコンピューティングの高度化や省電力化、複数の観測衛星で撮像したデータと GEO や LEO のデータ中継衛星に配置されたエッジコンピューティング機能と連携して処理する技術、衛星システムの小型軽量化・低価格化について、ユースケースや産業界のニーズを踏まえつつ総合的に取り組むことが重要である。

また、安全保障や防災・減災において、即時性、常時・連続性、広域性の向上を実現する静止軌道からの観測技術についても取り組んでいく。海外計画の最新動向を注視しつつ、実現に必要な大型アンテナの開発（合成開口・補償技術）を含め取り組むことが重要である。

③ 空間情報を拡張する光学／レーダ等のセンサ開発技術

i. 環境認識

空間情報を拡張するセンサ開発技術については、光学や合成開口レーダ（SAR）センサ等の高分解能化、広域化等、イメージング画像の高度化に向けて各国がしのぎを削る。例えば、米 Maxar Technologies 社、仏 Airbus 社などは 30cm 級の超高分解能光学衛星画像を提供しており、今後も安全保障・民生利用の様々なニーズに対応するため、イメージング画像の高度化の流れは続く見通しである。

SAR については、民間事業者による X バンド[47]SAR 衛星のコンステレーション事業が進展[48]すると同時に、JAXA において、植生を透過し、地殻変動の観測に適した L バンド[49]SAR 衛星 ALOS-

[47] 8～12GHz の電波（マイクロ波）。X バンド SAR は、L バンドや C バンドと比較して小さい物体の観測に適しており、具体的には地上インフラ等人工物の観測に用いられる

[48] Synspective 社：2024 年 2 月現在、最高分解能 0.9m、観測幅 20km
QPS 社：2024 年 2 月現在、最高分解能 0.46m、観測幅 7km
フィンランド ICEYE 社：2024 年 2 月現在、最高分解能 0.5m、観測幅 30km

[49] 1～2GHz の比較的波長の長い電波（マイクロ波）。L バンド SAR は、比較的広い範囲の地殻変動などの観測に適している

2 の運用、ALOS-4[50]の開発が進められ、高分解能、広域撮像が可能である。令和6年能登半島地震においても、ALOS-2 の観測データを活用し、輪島市西部では最大約4ｍの隆起があったと解析されている。米 NASA、印 ISRO が共同開発する NISAR 衛星、欧 ESA 等が開発する ROSE-L 衛星がこれを追う。また、独 DLR が TanDEM-X により複数機の編隊飛行による同時観測にいち早く取り組んでおり、センサだけでなく高度な複数機運用技術の重要性も高まる見込みである。

加えて、デジタルトランスフォメーション（DX）化が進んだ将来においては、都市・地球デジタルツインが一つの産業基盤となる可能性がある。雲・降水レーダによる3次元観測データは、科学的価値も大きいことから、豪雨災害等をもたらす雲・降水システムの理解にも大きく貢献している。20 年以上にわたって世界の降水 3 次元情報を観測している TRMM 衛星や GPM 衛星に搭載された降水レーダ [51]や世界初のドップラー速度計測による EarthCARE 搭載雲レーダ [52]においては、我が国が高い技術的優位性を有しており、欧米と共同開発を進める衛星に我が国の雲・降水レーダが搭載される等、我が国の技術力を軸とした欧米との国際協力も進む。

また、高度計ライダーによって、都市や森林等を含めた地表面形状に係る3次元的な理解が可能となることが期待され、2030 年までに 1～2 兆円規模との予測もある航空機ライダーのニーズを部分的に衛星が担うことで、市場の獲得が期待される。さらに、高分解能イメージング等と融合して都市デジタルツインを実現することで都市管理・インフラ管理・災害対策など社会の DX 化が一気に加速される可能性がある。米 NASA においては、氷床観測の ICESat や森林観測の GEDI で開発・運用している。

加えて、ドップラー等多様なライダー技術の発展により、従来の計測手法では困難であった大気粒子や風況等の3次元プロファイルの解明により気象や台風の予測精度向上、黄砂・火山灰等の分布の把握に加え、4D の地球デジタルツインの実現にも貢献することが期待される。

ii. 技術開発の重要性と進め方

空間情報を拡張する光学、SAR、雲・降水レーダのセンサ開発技術については、安全保障や防災・減災、将来的には地球・都市デジタルツインの実現に貢献し、リモートセンシング技術をシステムとして高度化するコアの技術であり、調達自在性の確保が必要である。また、地上技術として磨かれたイメージセンサ技術や SAR の高分解能・広域撮像技術、雲・降水レーダの 3 次元計測等が強みである。このため、自律性、技術的優位性の観点から、情報収集衛星や、ALOS-4、EarthCARE、降水レーダ衛星（PMM）を含めた既存ミッションに着実に取り組むことが重要である。

センサの高度化に向けた取組も必要であり、光学センサについては、安全保障や防災等の被災状況把握や 3 次元地形情報に資する、40cm 級の高解像度化・高指向精度化が非常に重要である。都市デジタルツインの基盤となる 3 次元地形情報の高精度化においては、宇宙からレーザ光を用いて直接的な距離計測を行う高度計ライダーとステレオイメージングとの組合せで、鉛直方向の地上位置精度 1m 級の高精度な 3 次元データの獲得が見込まれる。世界最高水準の 3 次元情報の開発に向け、光学衛星コンステレーションとの協調観測等を見据えて 2020 年代後半での高度計ライダーの ISS での宇宙実証と衛星への搭載を目指し、必要な技術の獲得・実証に取り組むことが非常に重要である。さらに、高度計ライダーを活用した商業化の道筋を描きつつ、小型・

[50] 高分解能（3m）で広域撮像（200km）できる能力を有する（2024 年度打上げ予定）。

[51] 降水の立体構造を高い精度で観測することができるセンサ。我が国が開発した降水レーダが、日米共同ミッションである熱帯降雨観測衛星(TRMM、1997 年打上げ)や全球降水観測計画(GPM、2014 年打上げ)に搭載され、日々の気象予報や気候学の研究に活用

[52] 衛星搭載のレーダによる雲の垂直構造の観測や雲の内部の粒子運動を計測する技術。EarthCARE ミッションにおいて NICT と JAXA が CPR（Cloud Profiling Radar）を開発中。https://www.eorc.jaxa.jp/EARTHCARE/about/cpr_tech_j.html

高効率・高機能なレーザ技術といった、革新的な高度計ライダー技術の獲得に向けた要素技術の開発に挑戦することも非常に重要である。また、高度計ライダーのみならず、多様なライダーの実現についても検討が必要である。

加えて、SAR や雲・降水レーダ等のレーダ技術の高度化も重要である。SAR センサの高度化においては、ALOS-4 において開発している新たな観測技術（デジタルビームフォーミング）を活用した広域観測で世界をリードするとともに、更なる高度化において、広域観測や多偏波観測など強みを伸ばすことが重要であり、また、小型化の検討においては複数機運用技術に挑戦することによって、衛星データ利用の拡大が期待されることから、検討に着手する必要がある。さらに、民間事業者がコンステレーション構築を進める小型 SAR 衛星については、高分解能化、広域化や干渉技術等、ミッションの高度化を着実に実施することが重要である。また、雲・降水レーダの高度化においては、高感度化・高精度化に加え、大型アンテナ、デジタルビームフォーミング、多周波化・多偏波化等の発展的な観測技術の開発等、我が国の強みとなる技術を継続的に磨いていくための検討が必要である。とりわけ、光学と SAR については、安全保障分野においてもセンサの高性能化を着実に取り組むことが重要である。また、世界で民間事業者による衛星コンステレーション構築・商業化が加速しており、画像処理技術、超低高度技術、新たなセンサ技術等を含めた技術要素を考慮しながら、常に先の技術トレンドを見据えた検討が必要である。

④ 波長・周波数情報を拡張するセンサ開発技術

i. 環境認識

気候変動に係る科学研究に加え、近年活発化しているカーボンプライシングや ESG ファイナンス、自然資本等に対しては、波長/周波数情報を拡張するセンサによるデータが有用であり、米国科学アカデミーにより 10 年に一度勧告として発出される Decadal Survey を基に、NASA において先端的な地球観測が進められる。また、北米等のスタートアップ企業を中心に、多様な波長・周波数情報の活用による新たなデータサービスの事業開発が推進されている。加 GHGSat 社が産業排出源からの温室効果ガス観測に成功し、独自の小型衛星コンステレーションの構築[53]を進め、米 Spire Global 社が気象情報や船舶が発出する電波信号の観測と事業展開[54]を行っている。小型光学衛星コンステレーションを構築する米 Planet 社もメタンガス検出を目的とするハイパースペクトルイメージングセンサを搭載した衛星[55]を 2024 年に打ち上げる予定である。ESG ファイナンスの観点においても、企業や金融機関等による衛星データの活用が始まっており、欧州 ESA 等を中心に、国際ルールメイキングに向けた動きが顕在化してきている。

我が国においては、GOSAT/GOSAT-2 において世界に先駆けて近赤外から熱赤外に至る広帯域同時分光計測技術を確立し、温室効果ガス観測の高精度観測を継続して実現している。また、電波放射計の一種で、高分解能で高頻度、広域の観測が可能なマイクロ波放射計[56]AMSR シリーズは、気象やスマート水産業などの実利用分野で活用されている。特に気象分野では降水予測精度の向上等、気象庁に加え米国海洋大気庁（NOAA）、豪州やインドなどにおいて幅広く利用されている。また、船舶等からの人工電波も含むマイクロ波を超広帯域に計測が可能な、世界初の

---

[53] 現在、軌道上に 12 機の衛星を配置してグローバルな温室効果ガス排出の監視を行っている。2023 年 11 月に打ち上げられた商用初の CO2 監視衛星（GHGSat C10, Vanguard）を含む。

[54]なりすまし信号や GNSS 妨害スプーフィング等の電波信号の検出、船舶検知など、複数の波長帯域における衛星コンステレーションを用いた電波信号観測のサービスを展開中。https://spire.com/space-services/signals-intelligence-constellations/

[55] ハイパースペクトルセンサを搭載した 2 機の衛星（Tanager1, 2）の打上げを予定。Tanager1 は 2024 年に打上げ予定。
https://www.planet.com/pulse/nasa-jpl-imaging-spectrometer-ready-for-tanager-1-integration/

[56] 地表面や大気などの自然界から放射される微弱なマイクロ波を測定するセンサの総称

革新的なマイクロ波放射計として期待されている「超広帯域電波デジタル干渉計(SAMRAI)」について、実証衛星の打上げに向けた研究開発が進められている。

また、多波長で観測可能なセンサ SGLI やハイパースペクトルセンサの HISUI は、農林水産業、気候変動観測等を含む様々な分野での実証・利用が広がっている。

ii. 技術開発の重要性と進め方

我が国が技術的優位性を有するマイクロ波放射計については、世界第6位の広さを誇る排他的経済水域(EEZ)を有する海洋立国として、国内外の気象やスマート水産業等の利用ニーズに応えるとともに、自律性やこれまで構築してきた技術的優位性を失うことがないよう、国内企業と連携した継続的な高度化が重要である。

我が国が世界に先駆けて開発した分光計測技術については、カーボンプライシングや ESG ファイナンス、自然資本等にデータを活用することで、新たな市場創出の可能性も期待できる。現在、パリ協定の下、途上国を含めた各国に温室効果ガスの排出量の報告が求められているところ、衛星を用いた排出量推計技術の活用を促し、国際標準化を目指していくことが重要である。分光計測技術とマイクロ波放射計計測技術の両方を備える GOSAT-GW の 2024 年度打上げに向け、着実に開発に取り組むとともに、排出量推計技術の中央アジア、インド等への普及の取組を推進することが重要である。

また、世界に先駆けて高感度の多波長データの取得を進めているハイパースペクトルセンサ「HISUI」を活用した多波長データの利用実証を各分野で進めて知見を蓄積するとともに、HISUI のデータ取得頻度を補完できる小型・高感度の多波長センサの開発・実証の 2027 年度までの実施を着実に進めることは非常に重要である。さらに、国際ルールメイキングに向けて各国の動きが活発化する中、こうした我が国の経験の蓄積を活かし、小型・高感度の多波長センサを搭載したコンステレーションの構築に取り組むことで得られる広域かつ高頻度な多波長データを活用し、上記のカーボンプライシング、ESG ファイナンス、自然資本等の国際市場を金融機関等と連携しつつ早期に獲得するための取組を進めることが重要である。

さらに、船舶情報収集のための AIS/VDES 観測技術及び電波情報収集技術については、自律的に海洋状況を把握する上で重要な技術であり、AIS については ALOS-4 搭載における高度化を着実に実施し、VDES については 2029 年までに他国衛星との連接及び宇宙実証を実施するとともに、小型衛星コンステレーションの社会実装に向けた取組を進めることが非常に重要である。また、SAR と船舶識別信号 AIS[57]/VDES[58]等の複数種類のデータの同時利用による広域な海域の定期的な観測技術の開発についても重要であり、船舶の詳細情報の把握につなげていく。

[57] 船舶自動識別装置（AIS)が船舶運航や海上交通管理に利用されており、衛星でこの AIS 信号を受信することで、世界中の AIS 搭載船舶の位置情報等を取得できる。

[58] 衛星 VDES（VHF Data Exchange System;次世代 AIS）は、AIS システムを拡張し、船舶・海洋を対象として双方向デジタル通信により海洋情報交換（IoT）ネットワークを構築することを目的としたシステムである。

Ⅳ. 軌道上サービス

（1）将来像

宇宙領域把握体制の整備、国内における官民相互の宇宙状況把握に関する情報共有の枠組みの構築、同盟国・同志国等との協力により、衛星運用状況等の情報共有を進めるとともに、より精度の高い衝突警報システムを実現していく。

また、技術開発・実証の進展により、衛星の運用終了後の適切な廃棄処理が行われるとともに、能動的スペースデブリ除去[59]やデブリ低減、衛星の寿命延長に資する燃料補給、修理などの軌道上サービスが実用化されることで、スペースデブリの数が一定程度まで管理された状態を実現することが期待される。

このような技術の進展とともに、衛星同士の衝突や、衛星とスペースデブリとの衝突の防止、更にデブリ低減等の軌道上サービスを安全かつ円滑に実行していくための軌道利用に関する国際的な規範・ルール等の整備が進み、各国間で実行されることが期待される。

また、軌道上での製造組立技術の進展等により、ロジスティクスを含む宇宙輸送や衛星利用、探査活動まで、軌道利用の可能性が抜本的に拡張されることや、これに伴う幅広いサービスの実現、市場の創出が期待される。加えて、宇宙太陽光発電、宇宙システムや社会インフラに影響を与える宇宙天気の正確な把握や予測等も、軌道上で展開されるサービスとして期待される。

（2）環境認識と技術戦略

宇宙空間の利用は、安全保障や経済・社会活動において不可欠なものとなっているが、小型衛星コンステレーションなどによる宇宙機やスペースデブリなどの宇宙物体の増加による軌道上の混雑化により、衛星同士の衝突や衛星とスペースデブリとの衝突などのリスクが増大している[60]。また、破壊的な直接上昇型ミサイルによる衛星破壊実験、衛星同士の付きまといなどの脅威となる行為も懸念事項となっている。

軌道上サービスは、デブリ除去を含め、宇宙における安全保障において重要であることに加え、混雑化する軌道環境の維持と宇宙経済の更なる発展のバランスを図り、両立を可能とする技術として期待される。また、例えば静止衛星の寿命延長に大きな需要が見込まれる[61]など、燃料補給や軌道上修理、交換、製造組立への活用といった、新たなアプリケーション・サービス、宇宙天気情報の利用による障害等の回避・軽減について、市場の創出が期待される。加えて、宇宙太陽光発電システム（SSPS）は、将来的なエネルギー源として期待されている。

① 軌道上サービスの共通技術

i. 環境認識

デブリ除去や燃料補給による衛星の寿命延長を始めとした、軌道上サービスを実施するために

---

[59] 軌道上に存在するデブリを専用衛星等を用いて軌道から取り除く技術。

[60] 低軌道における人工衛星と他物体の 1km 以内のニアミス回数が 2021 年以降加速度的に増えている
Evaluation of LEO conjunction rates using historical flight safety systems and analytical algorithms　Dan Oltroggea*, Salvatore Alfanob, Jim Wilsonc, Pascal Wauthier
出典
https://comspoc.com/Resources/Papers/20211029_Eval_of_LEO_Conj_Rates_IAC_Dubai_PREPRINT.pdf

[61] 出典　https://www.nsr.com/street-insider-nsrs-in-orbit-services-report-projects-14-3-billion-in-revenues-as-non-geo-constellations-grow-demand/

は、RPO[62]技術やマニピュレータ技術等の軌道上サービスの共通技術によって、サービスが実施できる距離までサービス衛星が対象物体まで接近し、接触型のサービスにおいては、物理的に接近・捕獲・接続することが必要となる。

米国においては、2020 年、米 Space Logistics 社がサービス衛星 MEV-1 で静止軌道上の大型衛星へ接近し、世界で初めてドッキングによる寿命延長サービスの実証を行っている。また、NASA の OSAM-1 プログラムにおいて、米 Maxar Technologies 社のマニピュレータ技術等を活用しながら、燃料補給や軌道上製造・組立の実証を 2026 年に実施の予定である。また、2021 年、米 Maxar Technologies 社は米国国防総省向けにマニピュレータ技術開発をすべく、契約を締結しており、民生利用だけでなく、安全保障利用への関心も高まっている。

我が国においても、1998 年に打ち上げた2つの衛星（ETS-VII）のランデブー・ドッキング実験に成功したことを皮切りに、宇宙ステーション輸送機 HTV 等を通じて RPO 技術を向上させてきた。JAXA が民間事業者と実施する CRD2 プログラム において、フェーズⅠとして 2023 年度に重要技術を実証する実証機を打ち上げ、その後、実際に大型デブリ（ロケット上段）を除去実証するフェーズⅡを予定している。

ii. 技術開発の重要性と進め方

RPO 技術やマニピュレータ技術等の軌道上サービスの共通技術は、デブリ除去・低減や、衛星の軌道上修理・交換、燃料補給等を行うことによる衛星の寿命延長、軌道上製造組立といった、多様な軌道上アプリケーションを実現するために中核となる基盤技術である。RPO 技術については、ETS-VII や HTV の蓄積、スタートアップ企業の ELSA-d、CRD2 プログラム等を通じて、我が国が世界に先行する強みを有するほか、マニピュレータ技術については産業用ロボット等地上民生品において、我が国が強みを有する。これらの我が国の強みを活かして新たな市場を切り拓いていくとともに、宇宙からの安全保障を確保していくため、軌道上サービスの共通技術の開発に着実に取り組んでいく。

例えば、2023 年度に打上げを予定している CRD2 フェーズⅠにおいて、制御されていない非協力的ターゲットへの接近等の重要技術の実証に取り組むことが重要である。また、軌道上等で複数種類の複雑な作業を自律的に遂行できる汎用作業ロボットアーム・ハンド技術を開発することが重要である。

さらに、将来の軌道上サービスの対象拡大を見据えて、鏡面的な光学特性を有する衛星やタンブリング衛星など、非協力衛星の中でもより対応が困難な衛星へ対応可能な RPO 技術やエンドエフェクタ技術等を開発することが重要である。

加えて、RPO 技術の高度化に向けて、次世代航法センサ開発、AI や機械学習により多様な対象への相対航法・制御を汎用化・ロバスト化する技術、宇宙空間における燃料補給・製造組立サービスに係るロジスティクスの最適化等に向けた開発の検討が必要である。

② 軌道環境・物体の状態監視・遠隔検査技術

i. 環境認識

軌道上サービスの個別のアプリケーション提供に当たっては、軌道環境・物体について、光学、レーダ等のセンサ技術やデータ処理技術等を活用して地上から把握したり、スタートラッカー等の衛星搭載センサや赤外・可視光カメラ、3D ライダー等の複数センサを組み合わせて、軌道上での

[62] Rendezvous and Proximity Operations の略称　ランデブー・近傍運用

観測・点検を行ったりする技術が必要である。

現在、軌道情報の利用については、米国の連合宇宙運用センター（CSpOC）から提供される情報の運用が主流であるが、米 LeoLab 社や米 Slingshot 社が、民間事業としてより精密な軌道決定や衝突回避運用を支援するサービスの提供を開始しており、米国政府も利用している。

我が国においては、2023 年 3 月より、防衛省が米国や JAXA と連携し、宇宙状況把握（SSA: Space Situational Awareness）情報の集約、処理、民間事業者を含め共有等を行っている。JAXA では、スペースデブリ衝突回避制御計画立案を支援するツール RABBIT を開発し、2021 年から防衛省、米 CSpOC から提供されるスペースデブリ接近情報とともに、国内外の公的機関、企業、大学等の人工衛星運用機関に無償で提供している。

また、防衛省では宇宙物体の運用・利用状況及びその意図や能力を把握する宇宙領域把握（SDA：Space Domain Awareness）体制を構築するため、2026 年度までの打上げを目標に、我が国独自の SDA 衛星を保有するとともに、他国の動向等を踏まえつつ、更なる複数機での運用に関する検討や GNSS 信号を用いた宇宙空間での測位を含めた各種取組を推進している。

ii. 技術開発の重要性と進め方

防衛省が米国や JAXA と連携し、SSA/SDA 体制の構築を着実に進めることは、宇宙からの安全保障を確保することに加え、軌道上サービスの様々な民生アプリケーションの創出につながることから、重要である。米国では民間独自の SSA サービスの展開が始まっており、国内においても、将来的には SSA サービスを提供する事業者が育成されることも期待される。

我が国の SSA/SDA 能力の向上や軌道上サービスの展開に向けては、軌道上物体の検知・識別に必要なセンサ等の技術開発について検討が必要である。また、大型衛星デブリを対象とした近傍撮像・診断の実証に引き続き取り組むことが重要である。

③ デブリ除去・低減技術

i. 環境認識

近年、各国におけるメガコンステレーション計画などにより、宇宙機やスペースデブリなどの宇宙物体の増加による軌道上の混雑化が急速に進行しており、適切な対策を取らない場合には、今後のコンステレーションの世代交代、新規参加国・企業の増加、民間宇宙ステーションの出現で安全航行が困難になるとの指摘がある [63]。こうしたリスクに対応すべく、米国連邦通信委員会（FCC）は、地球低軌道の商用衛星の運用終了後の大気圏再突入等による廃棄措置の期限を、運用終了後 25 年から 5 年に短縮した。欧州 ESA は、2030 年までに全ての欧州の衛星を、運用停止後速やかに軌道上から撤去する目標を示した。また、スペースデブリ低減に取り組む事業者等を評価する民間の認証制度（レーティングスキーム）について欧州の認証機関による運用が開始されるなど、各国が独自に宇宙空間の安全で持続的な利用のために取り組んでいる。

このような流れの中、スペースデブリ除去・低減に取り組むべく、2026 年度以降にデブリ除去実証（フェーズⅡ）を計画する我が国の CRD2 プロジェクトに加え、欧米の各国において様々なデブリ除去実証プロジェクトが計画されている。欧州では ESA の下、スイス ClearSpace 社が制御再突入 [64]による 100kg クラスの小型デブリの除去を予定し、2026 年に打上げが予定される。英宇宙庁のミ

[63] 出典　民間企業調べ

[64] 制御再突入　人工衛星等を制御して、あらかじめ安全確保を図った、着地又は着水の地点や区域内へ落下させる再突入

ッションにおいては、ClearSpace 社、英アストロスケール社が、2026 年中のデブリ除去実証を行うべく、選出されている。安全保障分野においては、米宇宙軍の Orbital Prime プロジェクトの下、2026 年頃のデブリ除去実証を目指し、2022 年に 100 社超のスタートアップ企業等との契約を開始している。

デブリ低減の取組としては、テザーや帆等を使用した低減技術等の開発も進んでおり、米 Tethers Unlimited 社は 2021 年にテザーによる短時間での大気圏再突入に成功する一方、我が国でも複数の民間事業者が軌道上での実証を予定している。

ii. 技術開発の重要性と進め方

デブリ除去技術について、我が国では CRD2 プロジェクトを通じて、JAXA と民間事業者が、世界に先駆けて 3t クラスの相対的に衝突リスクの高いロケット上段などの大型デブリを、商業的に捕獲・軌道変更し、これにより除去の道筋を示すことを目指している。我が国が世界に先行する強みを有する技術であり、宇宙における安全保障に加え、混雑化する軌道環境の維持と宇宙経済の更なる発展の両立に貢献し、新たな市場を切り拓く技術として非常に重要である。2023 年度に開始予定の軌道上でのデブリへの接近、近傍制御、画像の取得等の関連技術実証や、2026 年度以降のデブリ除去技術実証に向けた開発を着実に進めるとともに、2021 年に制定した軌道上サービスを実施する人工衛星の管理に係る許可に関するガイドラインに基づき同実証を実施していく。今後、本技術の更なる高度化に向けて、非協力物体の回転レート低減技術、デブリ除去の対象を複数物体へ拡大するコンピュータ・ビジョン [65]等の技術、制御再突入技術等についても、検討が必要である。

また、デブリ除去技術については、ターゲットとするデブリのサイズや特性に応じた適切なアプローチが重要であり、レーザーアブレーション等による非接触型のデブリ除去技術や、微小デブリに対応した受動的除去技術の開発・実証についても、検討が必要である。

加えて、デブリ低減技術として、水を推進剤とする低コスト推進機やデブリの大気圏突入を加速するエレクトロダイナミックテザー[66]を始め、衛星等の軌道離脱のための技術開発・実証も重要であり、2027 年度をターゲットに進める。

④ 燃料補給・修理・交換等の寿命延長技術、軌道上製造組立技術

i. 環境認識

ミッション機器がまだ機能しているにもかかわらず、燃料が枯渇する等により寿命を迎える衛星は、静止衛星の半数程度ある [67]とされている。寿命延長技術は、そのような衛星にサービス衛星をドッキングさせることで、軌道の維持や姿勢制御を実施して衛星の運用を継続させたり、燃料補

人工衛星等の打上げに係る許可に関するガイドライン
https://www8.cao.go.jp/space/application/space_activity/documents/guideline1.pdf

[65] 画像、動画、点群から情報を抽出する一連の手法。画像検知センサなどの機器や、取り入れた視覚情報を認識するための人工知能（AI）など、幅広い分野で研究されている

[66] 進行方向と逆向きにローレンツ力を発生させ、速度を落として軌道を低下させて高度を下げる
出典　https://www.aero.jaxa.jp/topics/magazine/pdf/sorasora_no02.pdf

[67] 出典　Benjamin A. Corbin, Amana Abdurrezak, Luke P. Newell, Gordon M. Roesler, Bhavya Lal (2020) Global Trends in On Orbit Servicing, Assembly and Manufacturing (OSAM), SCIENC E & TECHNOLOGY POLICY INSTITUTE　pp.11
https://www.ida.org/-/media/feature/publications/g/gl/global-trends-in-on-orbit-servicing-assembly-and-manufacturing-osam/d-13161.ashx)

給によって寿命を伸ばし、ミッションの継続を可能としたりする。また、軌道上修理・交換・製造組立技術によって、ミッションの継続を可能とすることに加え、軌道上でのミッションの追加や変更、搭載機器のアップグレード、ポスト ISS、月・惑星探査活動への利用などを始めとする様々な軌道上物体の製造等の可能性が広がる。これらの技術によって、宇宙機の使い捨て文化からの脱却や、軌道上サービス・ロジスティクスの概念拡張等による新たな市場の開拓が可能となる。

米国においては、前述のとおり、2021 年、米 Space Logistics 社が MEV-1 でドッキングにより静止軌道上の大型衛星へ寿命延長サービスの実証を行ったことに加え、米 Orbit Fab 社は、2025 年から静止軌道の衛星にヒドラジン燃料の供給を計画する。NASA においても、OSAM-1 プログラムにおいて、米 Maxar Technologies 社のマニピュレータ技術による燃料補給や、将来的には次世代の望遠鏡、ソーラーセイル、通信機器等の軌道上製造・組立を想定した実証を 2026 年に実施する予定である。欧州においても、EU と仏 Thales Alenia 社が、燃料補給や衛星ペイロードの交換能力の実証等をすべく、EROSS ミッション[68]を 2026 年に打上げの予定である。

ii. 技術開発の重要性と進め方

我が国においては、協力衛星を対象とした燃料補給技術の確立を目標とする最長 5 年間のプロジェクトを開始予定である。寿命延長技術の確立等を通じて、衛星運用者が負担するコスト減が期待され、黎明期にある軌道上サービス市場の拡大をけん引する可能性があり、これに着実に取り組むことは重要である。さらに、現在開発が進められている方式の化学推進対応の燃料補給技術だけではなく、多様な方式の化学推進系への補給等の技術開発、電気推進や複数機、多様な軌道に対応した補給のためのドッキング機構及び補給口精密接続技術等、多様な推薬・軌道に対応できる燃料補給の汎用性の向上等の技術についても検討が必要である。

大型の各種静止衛星や高機動な推進技術を必要とする SDA 衛星においては、搭載される推薬量の制約が、衛星寿命に大きな影響を与えるため、燃料補給技術などの軌道上サービス技術を活用し、衛星のライフサイクルを適切に管理し、限られた数の衛星を有効に活用していくことが重要である。

軌道上修理・交換・製造組立技術については、欧米が先行している状況であるが、我が国においても本技術の適用先候補として軌道上でのミッションの追加・変更、搭載機器のアップグレード、ポスト ISS、月・惑星探査活動への研究開発なども進めており、汎用エンドエフェクタ、ツールチェンジャ、多用途インターフェイスモジュール等を含め、将来を見据えて検討する必要がある。併せて、3D プリンティングやロボティクスを始めとした、宇宙に転用し得る地上系の要素技術のキャッチアップ・収集に関しても宇宙業界全体として取り組み、ニーズの検証・取り込みとシーズの実証を並行して進めることで、諸外国に先駆けた開発を可能とすることも必要である。

⑤ 宇宙太陽光発電システム（SSPS）

ⅰ.環境認識

宇宙太陽光発電システム（Space Solar Power System: SSPS）は、軌道上において太陽エネルギーで発電した電力をマイクロ波やレーザに変換して地上や月面、宇宙機等へ伝送し、電力変換して利用することが期待されるエネルギーシステムであり、各国で研究開発が進められてきている。

米国では、マイクロ波やレーザの発送電の性能を検証する要素試作試験等の関連実験、SSPS

[68] EROSS: European Robotic Orbital Support Services の略称。軌道上サービスのサービス衛星と対象物体に必要な技術を実証し、効率的で安全な軌道上サービスの提供を目指している

のプロトタイプに必要な要素技術を開発する SSPIDR（Space Solar Power Incremental Demonstrations and Research）プロジェクト等を始動しており、特に、2025 年にはサンドイッチタイル [69]を用いた電力変換と地上電送の軌道上実証計画を進めている。他方、NASA は宇宙太陽光発電システムが他のエネルギー源に対してコストや CO2 排出量において優位となるためには、輸送コストや太陽光電池セルの発電効率等について飛躍的な技術革新が必要という評価をしている [70]。

欧州では、カーボンニュートラルとエネルギー自給を達成することを目的に、2022 年 12 月に SOLARIS と呼ばれる SSPS の準備プログラムを開始し、3 年間かけて、技術的妥当性、メリット、導入オプション、商用利用の可能性、新興技術としてのリスク評価を行うこととしている。

SSPS については様々なシステムアーキテクチャや給電方式の可能性が議論されており、我が国においても、テザー方式、ミラー方式、風呂敷方式といったシステムアーキテクチャや、マイクロ波給電方式やレーザ給電方式といった給電方式が検討され、関連する技術開発を実施してきているところである。

ⅱ. 技術開発の重要性と進め方

宇宙太陽光発電は多数の技術の組み合わせで実現されるシステムであり、無線電力伝送技術、大規模構造物の展開技術、高効率太陽光電池セル技術、低コストの宇宙輸送技術など、必要となる要素技術も多岐にわたる。例えば、無線電力伝送技術については、発送電一体型パネルの開発及び航空機による送電実証や、地球低軌道実証からの送電実証を予定しており、これを着実に実施していくことが重要である。また、展開構造機構技術の軌道上実証の実施を予定しており、着実に進めていくことが重要である。

また、宇宙太陽光発電システムの経済性・社会実装可能性や最適なアーキテクチャの在り方は、宇宙輸送価格の低減や太陽電池セルの能力向上等、他の技術革新に大きな影響を受けることから、技術革新を踏まえてシステムアーキテクチャを柔軟に見直していくことについて、検討が必要である。また、システムアーキテクチャにとらわれない要素技術の開発・実証・高度化を着実に進めていくことも重要である。

⑥ 宇宙環境観測・予測技術

i. 環境認識

太陽活動を主な源として発生する宇宙環境の変動、すなわち宇宙天気は、軌道上の衛星運用等に支障を及ぼすおそれがあり、安全保障や経済・社会においてますます重要な役割を担うようになっている宇宙通信・観測・測位や地上インフラ機能等の宇宙システム安定利用のため、宇宙環境観測・予測技術が必要となる。特に、約 11 年の周期を持つ太陽活動は、2025 年頃に次の極大を迎えると予想され、徐々に太陽フレアの規模や頻度が増えており、低軌道衛星の障害など社会的影響も出始めている。

米国では、2019 年、危機管理対応を行う 連邦危機管理庁（FEMA）が、宇宙天気をハリケーン、パンデミック等と並ぶ「壊滅的な国家リスク」の一つであると特定し、ホワイトハウスより「国家宇宙

---

[69] 片面に太陽電池、中央に太陽電池からの直流電力をマイクロ波に変換する機器、太陽電池の反対側の片面にマイクロ波を送電するアンテナが搭載されたパネル。

[70] Space-Based Solar Power (NASA) (2024 年 1 月 11 日)
https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/01/otps-sbsp-report-final-tagged-approved-1-8-24-tagged-v2.pdf

天気戦略」等が発表された。米国海洋大気庁（NOAA）は、太陽風を常時監視する衛星 SWFO-L1 の打上げを 2025 年に予定しており、国際協力の下に 24 時間 365 日データを取得する地上受信局網の整備を進めている。民間企業による宇宙天気関連サービスの提供も活発化しており、2010 年には民間団体・米国商業宇宙天気協会（ACSWA）が設立された。

欧州 ESA は、太陽から地球方向へ放出される太陽コロナ質量放出（CME）を衛星から観測するプロジェクト「Vigil ミッション」を計画しており、2029 年以降の打上げを目指している。

我が国においては、NICT が太陽活動や電離圏・磁気圏を観測・分析し、24 時間 365 日「宇宙天気予報」を関係機関に提供している。また、宇宙天気現象の観測・分析・予測・警報の強化等、予報の高度化に向けた取組を進めている。一方、我が国は科学衛星による宇宙環境計測に関する多くの知見はあるものの、定常的に宇宙環境を監視する衛星はなく、西太平洋上空は観測の空白域であった。この解消のため、気象庁・総務省・NICT が連携し、2029 年運用開始予定のひまわり10号搭載を目指した宇宙環境センサの開発が進められている。

ii. 技術開発の重要性と進め方

宇宙通信・観測・測位や地上インフラ機能等の安定的利用の確保や安全保障分野での活用のため、我が国上空の宇宙環境を観測するセンサの開発やひまわり10号への搭載、国際協力による観測網の構築等を通じた観測・分析能力の充実・強化を図るとともに、警報の対象やユーザーへの影響を分かりやすく示した新たな警報基準を策定する等、宇宙天気予報の高度化・利用拡大を一層進めていくことは重要である。

Ⅴ. 衛星基盤技術

(1)将来像

諸外国や民間による宇宙活動が活発化し、競争環境が厳しくなる中、我が国の宇宙活動の自立性を将来にわたって維持・強化し、先に記したⅠ～Ⅳの衛星ミッションを軌道上で実現させるため、共通となる基盤技術について継続的に開発に取り組み、海外と同等以上の QCD(Quality, Cost, Delivery)能力を維持・向上していく。加えて、技術成熟度が低い先端技術の開発にも継続的に取り組み、技術・産業・人材基盤の強化を図ることで、衛星サプライチェーン構造の改革やバリューチェーン構造の構築を行い、我が国の宇宙産業エコシステムを再構築し、更に発展させていく。

(2)環境認識と技術戦略

衛星基盤技術は、衛星システム技術とサブシステム技術より構成され、サブシステム技術は大きくデータ処理系、電源系、姿勢系、推進系、熱制御系、構造系、計装系、地上系から構成される。また、DX 等による非宇宙分野の開発・製造プロセスの変革を踏まえながら、衛星開発・製造プロセス自体の変革にも取り組む必要がある。

衛星のシステムとしての性能は、ボトルネックとなる技術によって決まるという性質を有していることに留意しながら、衛星の共通となる基盤技術開発に取り組んでいく必要があるが、基盤技術は技術分野が多岐にわたり、コモディティ化している技術も存在する。限りある開発リソースの投入に当たっては、開発項目の選択と集中を行い、効率的に衛星基盤の強化と利用拡大の好循環を創出していく。

このため、1.(2)で示した重要技術の評価軸に基づき、衛星基盤技術の開発の重要性を総合的に評価してスクリーニングを行った。衛星の基盤技術としては、衛星の機能高度化と柔軟性を支える SDS[71]基盤技術、小型衛星コンステレーション等の衛星の小型軽量化とミッション高度化を支える電気系技術と機械系技術、衛星の運用及び地上局効率化を支える地上システム基盤技術を特定した。

なお、5. に衛星、宇宙科学・探査、宇宙輸送の分野に共通する基盤技術として、宇宙機の機能高度化と柔軟性を支える宇宙用高性能デジタルデバイス等のハードウェア技術、宇宙機の小型軽量化とミッション高度化を支える 3D プリンティング技術等の機械系技術、ミッションの高度化や柔軟性を支える機械学習・AI 等のソフトウェア基盤技術、開発サイクルの高速化や量産化に資するデジタル技術(MBSE/MBD、デジタルツイン等)の活用や COTS[72]品の宇宙転用拡大等の開発・製造プロセス・サプライチェーンの変革、編隊飛行等の次世代宇宙システムに向けた複数宇宙機の高精度協調運用技術を整理している。

① 衛星の機能高度化と柔軟性を支える SDS 基盤技術

i. 環境認識

今後の衛星に対する多様で複雑に変化する機能要求に柔軟に対応し、衛星ミッションを軌道上で実現させるためには、従来専用ハードウェアにて実現してきた機能を極力ソフトウェアに移行し、

---

[71] SDS: Software Defined Satellite(ソフトウェア定義衛星):衛星が従来ハードウェアで実現してきた機能を極力ソフトウェアへ移行させ、軌道上でプログラム変更によりアプリケーションレベルの更新を行うことで、変容する需要に柔軟に対応することを意図した衛星。

[72] 非宇宙分野で既に製品化されているコンポーネントや機材のこと。

軌道上でプログラム変更によるアプリケーションレベルの変更を行うこと、すなわちソフトウェア定義衛星（SDS）技術をより進めていくことが必要である。SDS による軌道上での大規模なデータ処理や AI の適用等により、通信はデータを中継するだけにとどまらずネットワーク化を実現し、リモートセンシングは観測データを取得するだけでなく、情報抽出を実施することが可能となる。

現在、欧米においては、大容量の静止通信衛星において SDS が実用化されており、近年世界で発注された静止通信衛星の大半が SDS である。SDS による機能のソフトウェア化に伴う多量の演算能力の要請に応える衛星搭載高性能計算機については、従来のように宇宙用高信頼性デバイスを活用した製品もあれば、スウェーデンの Unibap 社のように、急速に進化する先端産業用デバイス等を COTS 品として活用し、従来の宇宙用計算機と比較して 100 倍以上の演算性能実現する事例もある。

諸外国では、SSA における対象の自動抽出・追尾・軌跡推定や、自律的 RPO、サイバー探知と隔離システム、干渉やジャミングを低減するための通信方式の軌道上変更など、高性能な SDS を前提として多くの機能が実現されようとしており、その適用範囲は安全保障分野を含め、今後更に拡大していくと見込まれる。

ii. 技術開発の重要性と進め方

衛星の機能高度化と柔軟性を支える SDS 基盤技術は衛星の世界的なトレンドであり、今後、民生・安全保障の両方の分野において、システム構築のコア技術として必須の技術となることを想定すると、自律性確保の観点から着実に開発を進めていくことが非常に重要である。我が国においては、2025 年度に打上げ予定の ETS-9 による軌道上実証に向けて、打上げ後に通信周波数や通信領域をフレキシブルに変更できるフルデジタルペイロードを開発している。加えて、JAXA・民間事業者において軌道上での高度な AI 処理やフレームワーク研究を含め、オンボードエッジコンピューティング環境の構築とその活用を目指した研究開発を実施している。

また、衛星搭載高性能計算機技術については、調達性の観点から、産業界から国産化の要請は大きい。加えて、ユーザーがアプリケーション開発に集中できるように、計算機と併せて SDS ソフトウェアフレームワークの提供も必要である。また、計算機の高性能化に伴い、消費電力の増大と排熱が大きな課題になる中、低消費電力化や低コスト化が可能な衛星搭載用光電融合技術の活用が今後求められていくと考えられる。これらについて、民間事業者等の技術提案を募りながら、更なる研究開発の検討が必要である。

② 衛星の小型軽量化とミッション高度化を支える電気系技術

i. 環境認識

今後、通信・観測などのミッションの伝送容量の増大や観測時間の拡大等を踏まえ、電源システムや太陽電池パドルを含め、電源系に対する小型化、大電力化、高効率化及び制御の柔軟性のニーズが、ますます高まっていくと見られる。世界では、SDS 化や電気推進の増加、ミッションの高度化による電力増加等の要請もあり、デジタル電源や電気推進用高圧大電力電源といった技術トレンドも存在する。さらには、衛星の打上げコスト低減のため、複数機同時打上げが普及してきたことで、電源にも収納性が求められ、高収納性の太陽電池パドルや薄膜太陽電池セルの開発もなされている。

また、姿勢軌道制御系については、小型衛星コンステレーションの普及等を背景とした衛星事業環境の競争の激化により、姿勢軌道制御系のセンサやアクチュエータの小型化と低価格化、短納期化が進む。同時に、新規参入者にも使用可能な、センサ・アクチュエータ・制御装置が一体化

された統合制御ユニットも開発されている。軌道上サービスという新たな事業分野の成長を背景に、多様な対象物に対応する視覚センサ、距離センサの開発や、これらセンサを融合した近接誘導制御アルゴリズムの開発が進められている。これらの姿勢軌道制御系のセンサやアクチュエータ、距離センサ等に係る技術は、編隊飛行等の高度な複数機運用を実現する上でも欠かせない技術であり、単一衛星や従来のコンステレーションでは成し得なかったシステムが実現可能となることが期待されている。

ii. 技術開発の重要性と進め方

電源システムについては、我が国においては高信頼性を重視し、一度開発した製品を繰り返し使ったことで、新規技術の開発や実証が遅れ、海外製品との性能差異が拡大している状況である。通信・観測などのミッションの伝送容量の増大や観測時間の拡大等を踏まえ、ミッションのコア技術として自律性の観点から電源システムの開発は重要である。現在進められている ETS-9 における電気推進系の開発を含む全電化衛星技術の宇宙実証や、小型衛星向けのデジタル電源の開発の取組に加え、電気推進電源の更なる小型・高性能化や小型～大型衛星に活用できるフレキシブルなデジタル電源の国産化についても開発の検討が必要である。

また、同じく電源システムの太陽電池パドルについては、従来我が国の事業者が強みを持ち、輸出してきたが、技術のコモディティ化に伴い、国際競争が激化している。特に太陽電池セルについては、コストパフォーマンスに優れている独・米製の海外製セルによる寡占状態である。高収納なフラットパックの太陽電池パドル、小型衛星向け太陽電池パドルの開発等に加え、産業界のニーズも強い価格・性能において競争力のある国産太陽電池セルの開発に取り組むことが非常に重要である。

誘導姿勢制御系システムのうち、小型から大型衛星向けのジャイロ [73]や CMG[74]についてはデュアルユースであることから、厳格な輸出管理が求められる。また、小型衛星向けの統合姿勢制御ユニットについては内部設計がブラックボックス化されることから、ミッション要求に対する柔軟な開発のために国産化の要請がある。民生・安全保障分野における自律性の観点から、これらを開発することは重要である。現在開発が進められている小型衛星向けの統合姿勢制御ユニット、国産スタートラッカー、小型 CMG の取組に加えて、小型衛星向けのリアクションホイールの開発のニーズも小型衛星事業者が持っており、今後検討が必要である。

③ 衛星の小型軽量化とミッション高度化を支える機械系技術

i. 環境認識

小型衛星コンステレーションにおける多数機によるミッション遂行や、経済性向上のための複数機打上げの実現には、衛星の軽量化・コスト削減が必要である。また、小型軽量化と併せてミッションによるスペック要求の多様化・高度化を同時に果たさなければならず、その実現のためには推進系、熱制御系、構造系から成る機械系基盤技術の開発が必要である。

推進系については、従来の運用軌道への移動や軌道維持に加え、コンステレーション軌道面の変更や、軌道離脱、軌道上サービスにおける機動性等の機能要求の多様化が見られる。電気推

[73] ジャイロ：人工衛星の姿勢の回転(角速度)を検出するセンサー。

[74] CMG：Control Moment Gyro。回転しているホイールの回転の向きを変更することによってトルクを得る姿勢を制御するアクチュエータ。

進は化学推進の 5 倍の比推力[75]により、静止衛星においてオール電化衛星が主流となる中で普及してきており、搭載推薬の少量化により一層の衛星の小型化やペイロード比率の向上に貢献すると考えられる。他方、電気推進のホールスラスタ[76]についてはこれまでロシア製のシェアが高かったため、ロシアのウクライナ侵略により世界で調達性が悪化している。また、電気推進の主要推進剤であるキセノンの高価格化により、代替のクリプトン等の推進剤が開発されている。さらに今後、軌道上サービスにおいては化学推進の高い推力と電気推進の高い比推力を両立させるデュアルモード推進系が、小型衛星・ライドシェアミッション向けには、安全管理の観点から低毒性の化学推進系やクリーン推進剤の開発が注目されている。中でも、無毒・低毒で扱いやすい推進剤による小型の推進機などが実現すれば、多くの小型衛星等の機動性を高め、衛星の軌道離脱や衝突回避の促進も期待できる。その他、米 NASA においては火星圏用原子力推進の開発が進められると同時に、米 Aerospace Corp.が、地球超低軌道（VLEO）[77]にディスク状で電気推進の小型衛星 Disksat を打ち上げる予定である等、世界では新たな挑戦が計画されている。VLEO については、我が国においても技術試験機 SLATS により、世界で初めてイオンエンジンを用いて超低高度で長期間軌道を維持する技術を実証し、光学画像観測運用を成功させるとともにギネス世界記録に認定される等、他国に先行した実績を有している。

熱制御系については、大型の静止通信衛星においては、通信の大容量化・SDS 化に伴う発熱量の増加に対応するため、排熱の技術が必要とされ、機械式二相流体ポンプループによる大規模熱輸送等、能動的な熱制御手法が世界で開発されている。仏 Thales Alenia Space 社製造の SES-17 に搭載された能動的熱制御系は既に軌道上で実用化されている。また、小型衛星においては、マイクロヒートパイプ等の受動的熱制御による局所排熱技術へのニーズが高まると予想される。

構造系については、多機能構造などにより、衛星構造の最適化や新規方式、新材料による軽量化が進んでいくことが見込まれる。衛星の多機能構造については、現状は論文レベルでの発表にとどまっているが、Boeing 社の通信用フェーズドアレイアンテナのように、従来は部品を組み立てることで実現していたアンテナを一体成型で構成することで、小型軽量化に成功している例も存在する。

ii. 技術開発の重要性と進め方

推進系について、高比推力の電気推進については、静止衛星市場を念頭に、調達性を改善し自律性を確保する観点から、現在 ETS-9 で取り組む大型ホールスラスタの開発を着実に進め、更にその競争力を高める活動が重要である。また、小型衛星への適用を念頭に、高効率長寿命な小型ホールスラスタや、究極のクリーン推進剤となる水や低電力大推力を実現可能な希ガス等を利用したレジストジェットスラスタ[78]、低電力・低価格が期待されるパルスプラズマ等のマイクロ電気推進スラスタ等の開発を進めることは重要である。さらに、電気推進の低価格化・推薬変更の可能性を追求し、将来的には VLEO や小型衛星向けのホールスラスタや軌道上サービス等向けのデュアルモードスラスタ等の開発も、検討が必要である。また、推進系不具合の多さを踏まえ、

---

[75] 比推力：推進剤の消費率当たりの推力を表し，値が大きいほど効率が高く、燃費がよいことを示す。

[76] ホールスラスタ：推進剤を電離し、磁場による加速を行い排出することで推力を得る電気推進の一つ。同じ電気推進であるイオンエンジンと比較すると、比推力はイオンエンジンには劣るものの、大きな推力を得やすい推進系となる。

[77] VLEO:Very Low Earth Orbit。正確な定義はないが近地点高度が 350km 程度以下と通常の低軌道衛星よりも更に低い軌道を示す。残留大気により減速してしまうため、定常的に推進系で加速する必要がある等のデメリットがある軌道ではあるが、光学衛星はより近くで観測することになるため分解能等性能を上げやすい、通信においてもより少ない電力で通信できる等のメリットもある軌道となる。

[78] 水レジストジェットスラスタ：水を水蒸気にして吹き出すことにより推力を得るスラスタ

実証機会やアンカーテナンシーの拡充による技術の成熟・安定化に向けた取組が重要である。

熱制御系と構造系については、衛星システムとして各機能を熱的・機械的にインテグレーションする技術であり、システムのコア技術として自律性の観点から重要である。将来のフルデジタル静止通信衛星市場を念頭に、機械式二相流体ポンプループによる能動的高効率排熱システムに取り組むことは重要である。小型衛星市場を念頭に置いた受動的熱制御システムは、従来から輸出用機器としてシェアを維持してきており、ヒートパイプパネル技術の更なる国際競争力強化や発熱源から効率的な排熱を可能とする液浸冷却技術[79]等の検討が必要である。

構造系技術の多機能構造は小型軽量化だけでなく、製造コスト削減も期待できる。CFRP[80]を始めとする高比剛性、低熱膨張性を有する高機能材料の活用や CubeSat 以外の小型衛星向け新規構造アーキテクチャの検討、システムのスケーラビリティの確保を容易とするモジュール構造とともに、今後検討が必要である。

④ 衛星の運用及び地上局効率化を支える地上システム基盤技術

i. 環境認識

衛星コンステレーションの構築や衛星サービスの多様化により、従来のように衛星1機ごとに多くの人手を介した運用や専用の地上局の構築を行うことは非現実的である。民生・安全保障の両分野において、衛星の運用自動化や地上局仮想化といった、地上システム基盤技術の開発が必要である。

運用自動化技術については、欧米の大規模通信衛星コンステレーションや、小規模測位衛星コンステレーションにおいて、多数機管制システムが運用されていると考えられる。また、仏 CNES と伊 AIKO 社が、運用自動化や運用モード変更等の開発を開始している。

地上局仮想化技術については、運用管制や観測データ処理、エンドユーザーへのサービス提供まで、最小限のハードウェアを除いた地上局の機能を束ね、米 Amazon 社の AWS Ground Station や米 Microsoft 社の Azure Orbital 等の既存のクラウドサービスと連携して地上局の機能を実現する動き（GaaS: Ground Station as a Service）がある。我が国の衛星コンステレーション構築を目指すスタートアップ企業もこうしたサービスを活用している。

また、衛星システムの高度化に応じ、今後地上局受信データの大容量化が進むことが見込まれ、地上局システムに係る高度化も求められる。

ii. 技術開発の重要性と進め方

我が国においてもコンステレーション構築に向けた計画が進み、衛星側で自動化自立化機能が実装されていく中で、地上における運用省力化は今後重要性が増してくることが見込まれる。運用自動化技術については、衛星システムと機能配分を含めた一体開発が効率的であり、民生・安全保障の両分野において、自律性の観点から開発を着実に実施することが重要である。

また、地上局仮想化技術を活用することによって、地上局設備のコスト低減に加え、地上局の共通的機能以外の個別機能の開発に事業者が注力できる。災害時・有事において地上アンテナ局が損傷した場合においても、別のアンテナ局を割り当てることによって復旧可能であるなど、抗たん性や安全保障を含め自律性の観点からも将来を見据えた検討が必要な技術である。

---

[79] 液浸冷却技術：発熱源を冷媒となる液体に直接浸すことで、排熱効率を向上させる技術。

[80] CFRP：Carbon Fiber Reinforced Plastics。炭素繊維複合材料とも呼ばれ、炭素繊維を樹脂で固めた軽量で高強度な複合材料。

さらに、次世代の多様な衛星システムに対応できる先進的な地上局の実現に向けた、アンテナやデータ送受信装置等に関わる技術開発も検討が必要である。

（3）横断的課題【ミッション融合】

世界では、衛星においてハードウェアで実現していた機能をソフトウェアで実現することで、衛星機能の柔軟性が向上し、複数のミッションに対応した機能を一つの衛星に実装する試みが進む。例えば、技術的類似性が高い通信と測位については、中国 GeeSpace 社が自動運転用の通信と測位のサービスを一つのコンステレーションで提供することを目指している。

現時点では、ミッション融合技術については、世界においても検討・構想段階であり、新たな価値を提供するに至っていない。一方で、今後、より幅広いユーザーニーズへの対応を可能とするため、ハイブリッド・コンステレーションの検討等、従来のミッション毎の縦割りではなく、ミッションを融合し、新たな価値を生み出していく発想が必要である。

3. 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、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、初期宇宙の進化、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、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、宇宙望遠鏡が、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。

我が国において、系外惑星観測に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、プログラム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て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「きく 7 号」（ETS-VII）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、宇宙空間等の微弱な変化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データを設備環境に反映することで、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、ビジビリティー（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・衛星の観測も進む。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、超小型衛星による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、深宇宙は超小型衛星にとって依然として挑戦的な領域である一方、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。

ii. 技術開発の重要性と進め方

超小型衛星は、地球周回軌道を超えて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、人材育成や産業振興に寄与する観点からも、超小型衛星での探査技術は非常に重要である。要素技術として超軽量発電、深宇宙通信、超小型推進系等、バスの能力の拡大とともに、自律運用や複数機のネットワーク運用（探査機間通信、地上局運用の効率化含む）、太陽系のより遠方領域への到達を目指した技術開発を多様な実証機会を活用

しながら進める。また、信頼性を確保しつつ効率的な 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。その中において、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ており、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。火星については、現状、米国の独壇場で、1970 年代の Viking 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遅れている日本において、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を基に更なる着陸天体・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、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、月以遠を目指す民間企業も現れる中、低コストかつ信頼性が高い深宇宙への輸送ニーズや、NASA の SLS ロケットや、SpaceX 社の Starship のような大量輸送では届かない月や火星への個別輸送ニーズも潜在していると考えられる。本技術を獲得・向上することで、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先駆けて、先行者利益を確保しつつ日本の国際影響力を強化することが期待される。

ii. 技術開発の重要性と進め方

米欧中が大型かつ個別の探査機にリソースを割く中、火星往還の本格化も見据えて、多様な行き先に対応し、物資輸送を効率的に行うための深宇宙軌道間輸送技術の確立が非常に重要である。GPS がない宇宙空間で、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、汎用性の高い輸送システム技術を獲得し、低コスト化を図ることで、月や火星を始めとする深宇宙輸送ビジネスや国際分担の獲得を視野に入れる。多様な目的天体へ輸送するシステムの共用化・共通化を図るとともに、将来的には、我が国の基幹ロケットで様々な太陽系天体に低コストで物資輸送する宇宙輸送ビジネスへつなげることも視野に入れる。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、日本は独自技術を持ち、国際的な競争力がある。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日本にあり、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・ランデブー観測で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、我が国の強みである、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、火山大国である日本が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・地形観測技術等を活用することで、未踏な場所で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、我が国が宇宙条約及びそのガイドラインである COSPAR 惑星保護方針といった国際的なコンプライアンスを果たした上で、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 Viking 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、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という観点から、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 CubeSat 等について信頼性や寿命を高め、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となる環境制御・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与圧ローバの開発、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、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。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、月面宇宙旅行なども期待される。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、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。我が国では月面の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っており、月面での科学観測を速やかに実施することで、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示しつつ、主導権を握ることが可能な状況である。

ii. 技術開発の重要性と進め方

月面科学に係る技術は、我が国の強みを生かした月面科学に取り組み、アルテミス計画の実施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、観測機器を月面に輸送（民間サービスの活用可能性も含む）し、プリカーサーミッションによる早期実証を目指す。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、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、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で、日照の場所と日陰の場所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を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、月面拠点に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、研究開発を行い、技術を確立、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、脚幅制約等の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薬(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、これは極低温推薬に限らずストアラブル推薬(ヒドラジン系の推薬で、極低温推薬よりも比推力では劣るものの蒸発しにくいタイプの推薬種)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薬エンジンは国際的にも開発例が少なく、本技術を確立することで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薬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、推薬管理技術として、推薬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薬を有効活用して推薬タンクを冷却する推薬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、有人与圧ローバ、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混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となる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方向で調整が進められている。今後各国が整備した通信中継インフラ等を相互運用して我が国もその枠組みに参画し、優位にインフラの開発・利用に関わるためには、光通信技術、惑星間インターネット技術、月測位システム技術等のインフラに必要となる技術を早期に獲得し、独自性のある貢献を果たすことが必要である。また、電波が地形に反射して複数ルートを通って伝播する現象(マルチパス)等を始めとした、月面の物性や地形の特徴に伴う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。

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(遠距離補足追尾技術、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、超遠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形態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。また、天候等の地上の状況によらない月と地球圏でのフィーダ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が、現状、地球側においても地上局が世界的に不足している等の事情があることから、現状把握を含む詳細な調査を行い、月と地球圏という長距離にも対応可能な電波通信に係る要素技術(自動補足追尾機能等)の開発を実施し、地球地上局を含む通信設備の整備を進めることが非常に重要

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。

月面に拠点を建設し持続可能な活動を実現するに当たり、月面拠点域内での通信技術の開発が重要である。Wifi 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、マルチパスや大地反射等といった月面特有の環境条件に対応した月面基地局によるモバイル通信技術等の研究開発を実施し、月面ネットワークの構築を図る。

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、安全に走行する観点からは、航法誘導制御技術は非常に重要である。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、有人与圧ローバでの 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与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、将来の有人与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

水資源探査を効果的・効率的に進めるため、地下浅部の広域探査を可能と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の開発に取り組むことが重要である。月周回資源探査技術には、軽量な多チャンネルテラヘルツセンサ技術、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及びそれらの統合開発を含む。

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。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 2022」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、月面での長期滞在を可能とする無人建設（自動化・遠隔化）、建材製造、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１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。

月面土壌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、無人建設技術（自動化・遠隔化）、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。

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重要である。特に、有人与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な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・回収が比較的に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. 技術開発の重要性と進め方

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、より軽量な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り、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並走飛行すること）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、機体の軽量化による、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となる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。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、有人与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、推薬充填・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。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り、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。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で実施できるようになれば、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、我が国の有人与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。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。

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）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を、軌道上拠点を運営する企業に対して継承しつつ、民間企業のアイデアや自動化技術の採用などにより実験の実施や実験前後のサンプルやデータの処理等を自動化する宇宙実験効率化技術等も取り入れ、高い頻度での成果創出を可能とする事業性の高いシステムとして整備し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、商業宇宙ステーションなどにおいて活動が行われ、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。

4. 宇宙輸送

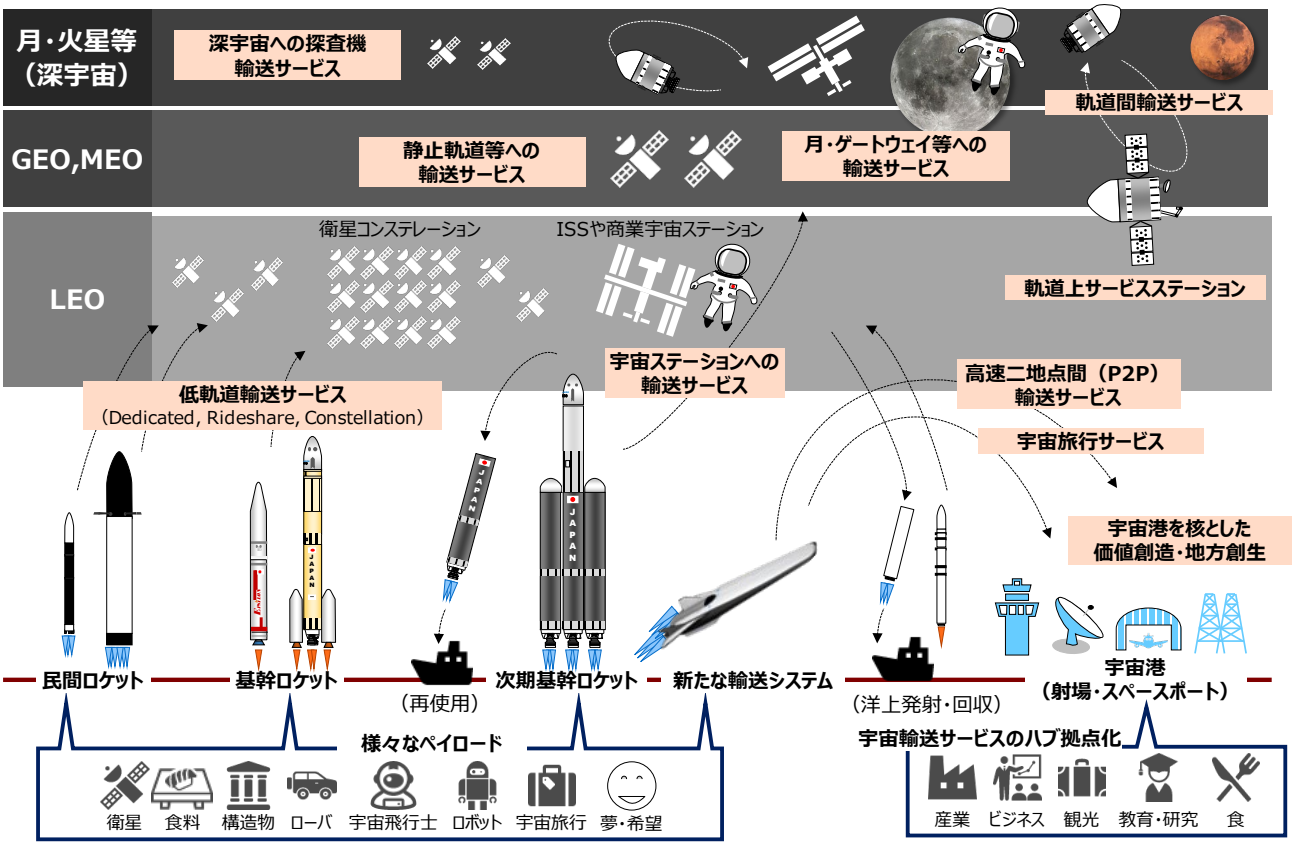
(1)将来像

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、2023 年に打ち上げられた人工衛星等[81]の機数は過去最大の 2,901 機であり、その数は 10 年前と比較して約 14 倍に増加した[82]。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[83]、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 2025 年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[84]。

（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[85]及び中国[86]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[87]でも顕

---

[81] 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。

[82] 内閣府宇宙開発戦略推進事務局の調べに基づく。

[83] 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。

[84] 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、カナダにおいても宇宙港整備が進んでいる。

[85] 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。

[86] 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。

[87] 欧州 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。

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る[88]。

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 6 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、2023 年のロケットの打上げ回数は過去最大の 212 回[89]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[90]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ワン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、2023 年末までに 246 回[91]の一段目の帰還に成功している。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。我が国でも、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、2025 年度に実証試験を予定している。

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、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。その他にも、エアブリージングエンジン[92]、熱核推進[93]、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、

---

[88] 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。

[89] 内閣府宇宙開発戦略推進事務局の調べに基づく。

[90] 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。

[91] 内閣府宇宙開発戦略推進事務局による調べに基づく。

[92] 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）や欧州 ESA（SABRE エンジン）が開発を進める。

[93] 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。

3D 積層技術[94]や複合素材成型技術[95]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[96]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[97]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[98]。

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[99]、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。

---

[94] 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。欧州 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。

[95] 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。

[96] 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。

[97] 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。

[98] 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）

[99] 一例として、 米国の Astra Space, Inc.や ABL Space Systems は地球上の複数個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。

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[100]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 MBSE[101]（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ールの整備を進める。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。

---

[100] 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使用化等により、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。

[101] 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。

② 構造系技術

3D プリンタ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 [102]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いる。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

[102] 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。

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ー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。

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制については、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制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、アビオニクス機器の小型化技術は、これまで我が国が基幹ロケットで培ったアビオニクス機器に関わる技術を、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靭化が重要である。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など、打上げ運用の効率化技術が重要である。

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使用を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モニタ技術、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、洋上の専用船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機体の状態を点検し、補修等の整備を行う回収した機体の点検・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溶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、多様な輸送ニーズに対応できる輸送サービス技術を獲得していく。

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モジュール方式複数衛星搭載技術、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が期待される。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。有人輸送技術としては、適切な宇宙船内環境に維持するための環境制御・生命維持技術（ECLSS: Environmental Control and Life Support System）、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、打

上げ異常時に搭乗員を安全に脱出させるためのアボートシステム技術、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。

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、液化メタンを推進薬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、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―ドタイム短縮等）で国際競争力を強化できる内容の技術の実現を目指すべきである。

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。そのためには、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、地方創生へとつなげ、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共同研究等を通じて、非宇宙分野からの人材の参画拡大を含め、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知識・スキル（能力・技能）をスキル標準として試行的に定義し、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。

5. 分野共通技術

(1)将来像

諸外国や民間による宇宙活動が活発化し、競争環境が厳しくなる中、我が国の宇宙活動の自立性を将来にわたって維持・強化し、衛星、宇宙科学・探査、宇宙輸送の宇宙ミッションを実現させるため、共通となる基盤技術について継続的に開発に取り組み、海外と同等以上の QCD(Quality, Cost, Delivery)能力を維持・向上していく。加えて、技術成熟度が低い先端技術の開発にも継続的に取り組み、技術・産業・人材基盤の強化を図ることで、サプライチェーン構造の改革やバリューチェーン構造の構築を行い、我が国の宇宙産業エコシステムを再構築し、更に発展させていく。

(2)環境認識と技術戦略

宇宙機のシステムとしての性能は、ボトルネックとなる技術によって決まるという性質を有していることに留意しながら、衛星、宇宙科学・探査、宇宙輸送の分野に共通する基盤技術開発に取り組むことで、分野・組織の縦割りを排し、リソースの有効活用を図ることが必要である。一方、分野共通の基盤技術は多岐にわたり、コモディティ化している技術も存在する。限りある開発リソースの投入に当たっては、開発項目の選択と集中を行い、効率的に分野共通の基盤の強化と利用拡大の好循環を創出していく。

このため、衛星、宇宙科学・探査、宇宙輸送の分野に共通する基盤技術として、宇宙機の機能高度化と柔軟性を支える宇宙用高性能デジタルデバイス等のハードウェア技術、宇宙機の小型軽量化とミッション高度化を支える 3D プリンティング技術等の機械系技術、ミッションの高度化や柔軟性を支える機械学習・AI 等のソフトウェア基盤技術、開発サイクルの高速化や量産化に資するデジタル技術(MBSE/MBD、デジタルツイン等)の活用等の開発・製造プロセス・サプライチェーンの変革、編隊飛行等の次世代宇宙システムに向けた複数宇宙機の高精度協調運用技術を特定した。

① 宇宙機の機能高度化と柔軟性を支えるハードウェア技術

i. 環境認識

通信、観測、測位、軌道上サービス、宇宙科学・探査において、軌道上での画像処理や AI 処理、柔軟な機能変更等の高度なデジタル機能を持つ人工衛星の研究開発が進んでおり、また、宇宙輸送分野においても、オンボード自律安全飛行技術の開発が進む。それらに不可欠な高性能計算機実現には、デジタルデバイスの主要部品である CPU[103]や MPSoC[104]、FPGA[105]等を、宇宙用高信頼性部品として継続的に開発を行う必要がある。EU においては、宇宙用の計算機・部品開発について、将来的に現在の先端産業用デバイスに匹敵するデバイスを開発するロードマップ [106]を有し、域内企業の開発を戦略的に支援している。

また、小型衛星コンステレーションの普及等を背景に、電源系に対する小型化・大容量化・低コ

---

[103] CPU：Central Processing Unit 中央演算処理装置

[104] MPSoC：MultiProcessor System on a Chip 一つのチップに複数の CPU/アクセラレータ/FPGA/周辺 IO などの機能を集積した SoC(System On Chip)

[105] FPGA: Field Programable Gate Array チップ製造後に購入者・設計者が内部論理回路の構成をプログラムできる集積回路

[106] ESA では European Space Technology Master Plan（ESTMP）として、デジタルデバイス開発を含む、10 分野、47 技術の技術ロードマップを作成し、それに沿った開発を進めている。

スト化の市場からの要請を受け、次世代リチウムイオンバッテリや全固体電池等の開発が世界で進む。小型化・大容量化・高効率化を実現する耐放射線性高効率電力用デバイスの実現のためには、現行の Si[107]半導体と比較して高効率な GaN[108]半導体や、将来的には Ga_2O_3[109]やダイヤモンド半導体等の開発・宇宙適用が鍵となる。海外では、耐放射線性高効率電力用デバイスなど、継続的な新規技術の開発を行っており、我が国との性能差異が拡大している。また、市場シェアの高いリチウムイオンバッテリの改良や、将来的な技術として全固体電池等の開発によって、バッテリの小型化・大電力化・高効率化につながる。

ii. 技術開発の重要性と進め方

宇宙機が高度なデジタル機能を追求する中、高性能計算機を構成するデジタルデバイスの主要部品（CPU、MPSoC や FPGA 等）については、現在、我が国は海外製品に依存している。他方、宇宙機システムの機能・信頼性を決めるコア技術であり、調達性等に問題が発生した場合、宇宙機の開発・製造自体ができなくなるため、自律性を確保するために宇宙耐性のある国産デバイスの開発を引き続き進めることは非常に重要であり、量産化についても検討が必要である。また、これらデジタルデバイスを組み合わせるとともに既存のコンポーネントの統合化を進めた低消費電力、低価格、高信頼性、高性能なコンピューティングデバイスの開発も検討が必要である。なお、宇宙産業だけでは規模の経済を確保できないため、非宇宙産業のユーザーも巻き込み、市場化を目指すべきである。

電源系に関しては、大電力を必要とする各種の高性能ミッションを実現するためには、大電力で柔軟な電源を可能とする耐放射線性高効率電力デバイスが重要である。またバッテリについては、リチウムイオンバッテリの高性能・低コストを実現する技術や非宇宙領域で我が国が強みとする技術を宇宙転用することで、宇宙業界におけるリーディングポジションを獲得する潜在性を秘めており、開発に取り組むことは重要である。全固体電池については我が国が技術的優位性を持ち得る分野であり、開発の検討が必要である。

② 宇宙機の小型軽量化とミッション高度化を支える機械系技術

i. 環境認識

宇宙開発が世界で加速化し、アジャイルな開発が求められる中、多様なニーズにタイムリーに対応していくために、3D プリンティングによる衛星、ロケットを含めた宇宙機製造技術の高度化が有効である。また、宇宙ミッションの経済性向上のためには、宇宙機の軽量化が鍵となるが、3D プリンティング技術によって宇宙機構造の最適化や複雑な形状の実現も可能となり、複合材・合金等の新規材料の選定による宇宙機筐体改良とともに、軽量化につながる。

既に、米 Relativity Space 社や Firefly Aerospace 社は、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。米ボーイングにおいては、米宇宙軍の通信衛星 WGS-11+プロジェクトにおいて、1000 を超える部品を 3D プリンティングにより製造し、工期を通常の 10 年から 5 年と半減を図る計画もある。

科学を含む宇宙観測の高度化、月惑星等の表面探査がより一段と活発化する中で、ハードウェア機械系技術の高度化が進んでいる。各国との協力や競争を有利に進めるためには、優位性の

---

[107] Si:シリコン

[108] GaN:窒化ガリウム

[109] Ga_2O_3:酸化ガリウム

高い要素技術の研究開発を進めることが必要である。

ii. 技術開発の重要性と進め方

我が国においては、JAXA において 3D プリンティング技術の活用に関する民間事業者との研究会を立ち上げ、衛星開発における市場化の時間の半減を掲げ、開発プロセスの研究を行っており、これを着実に進めることが重要である。なお、3D プリンティング技術については、その宇宙機製造への適用範囲と、材料の種類を含め開発範囲が広い技術であることから、各要素技術の開発と併せて、品質評価基準の確立やそれら開発成果を業界全体で共有していく仕組みの検討が必要である。また、3D プリンティングをベースとした構造の自動設計やシミュレーション技術、従来は熱、電気、構造機能のそれぞれを製造後にインテグレーションしていたアンテナを一体成型する等の製造技術の刷新についても検討が必要である。

また、ハードウェア機械系要素技術については、冷却システムに必須の極低温冷凍機等の熱系技術や、様々な使用環境・機能要求に適合するモータ・減速機・センサ等の技術をベースとした高機能なアクチュエータを始めとした機構系技術は、日本が世界に対して優位性があり、研究開発に取り組むことは重要である。

③ ミッションの高度化や柔軟性を支えるソフトウェア基盤技術

i. 環境認識

機械学習・AI 活用技術は、民生・安全保障の両分野において、多数機運用やミッションの自動化を行うに当たり、運用の省人化と高度化、自律化の実現に活用できる技術である。今後、宇宙を活用したデータのトラフィック量は、2030 年までに現在の 14 倍に増加するとの予測[110]もあり、こうしたデータを顧客のニーズに合わせ、軌道上で機械学習、AI を活用して処理し、地上に提供することで、データ通信量の削減を行うことが期待されている。宇宙科学・探査においても、取得した地形データに基づいて AI 等による着陸地点、探査地点の判別等への活用が検討されている。

また、デジタルツインを可能とする仮想化技術や開発環境のクラウド化等についても、世界で進展しており、ミッションの高度化や柔軟性を支えることが期待されている。

ii. 技術開発の重要性と進め方

軌道上で機械学習、AI を活用して処理し、地上に提供する技術は、データ通信量を削減するとともに、データの迅速なユーザーへの展開が可能となり、有事や災害時を想定して自律性の観点からも重要な技術開発である。現在、海洋状況把握のため、衛星 AIS や SAR、電波情報収集衛星等を活用した AI システムを開発しているところ、これを着実に開発し、発展させることが重要である。また、衛星画像の機械学習・AI 解析技術の開発や、AI/ML による異常検出技術、オンボードエッジ処理への活用等、機械学習・AI 技術を適用する開発についても、検討が必要である。

加えて、ミッションの高度化や柔軟性を支える、デジタルツイン等を可能とするための HW 仮想化技術や開発環境のクラウド化等についても、検討が必要である。

[110] Analysys mason 社レポート：
https://www.analysysmason.com/contentassets/fc7abfdc628446bcae96198fde6cff2d/analysys_mason_traffic_revenue_cagr_jul2022_nsr.pdf

④ 開発サイクルの高速化や量産化に資する開発・製造プロセス・サプライチェーンの変革

i. 環境認識

米 SpaceX 社は、メガコンステレーションの構築やロケットの高頻度打上げにおいて、デジタル開発のノウハウを活用した開発サイクルの高速化や宇宙機の量産化を実現しており、これを受けて世界における宇宙機の開発・製造プロセスに大きな変革が見られる。

米 SDA においては、PWSA 構築に向けて、従来の 10 年程度かけて一つの衛星を開発・運用するスタイルではなく、ニーズの変化へ対応し、新規技術の早期導入を図るため、約 2 年程度の短いサイクルで最新の衛星を開発するアジャイル・スパイラル開発手法を採用している。また、米 Boeing 社は、限定された実証機会を最大限活用するとともに、増加する実証コストを抑制するため、デジタルツイン技術を利用した仮想的な実証機会の確保を行っている。

開発サイクルの高速化や量産化に向けては、COTS 品の宇宙転用拡大により、より進展の早い非宇宙分野の技術を宇宙分野に適用していくことも必要である。また、COTS 品の宇宙転用に向けて、耐放射線評価・信頼性評価試験の限られた機会を確保し、各種の宇宙環境における COTS 品の性能評価試験技術を確立して、得られた知見を宇宙業界全体として共有していくことが求められる。海外では、例えば米 NASA の GSFC Radiation Data Base や欧 RADNEXT 等、宇宙業界全体としてとして耐放射線評価の試験データや照射手法等を共有していく取組を行っている。加えて、欧米においては、COTS 品に関してコンサルティングサービスを専門的に提供する事業者も存在する。

ii. 技術開発の重要性と進め方

世界における宇宙開発のサイクルが高速化するとともに大規模化している。我が国が宇宙活動の自立性を今後も維持・強化するためにも、こうした世界の開発の潮流を踏まえ、世界に伍していかなければならず、開発・製造プロセスの変革に取り組むのは喫緊の課題である。

開発サイクルの高速化に向けては、我が国においては JAXA を中心に MBSE[111]/MBD[112]、デジタルツイン等のデジタル技術を活用した開発プロセスの検討が進められている状況であり、これを着実に進めるとともにアーキテクチャの標準化を進めるなどにより下流設計・実装により踏み込む形で、今後、実設計への適用を進めていくことが非常に重要である。また、衛星シミュレータなど開発におけるデジタルツインの実現に向け、モデリング技術の統合化が必要である。特に、静止軌道上での光学アンテナ技術の開発・実証を進める中で、高精度デジタルモデルを構築する研究開発を行う取組等が重要である。今後、宇宙利用の拡大に迅速に対応するため、目的に応じ、アジャイル・スパイラル開発手法が適用できるようにすることも必要である。

宇宙機の量産化に向けては、前述のとおり、小型衛星コンステレーション構築に向けて激化する国際競争環境を踏まえれば、民間市場における資金調達をうまく活用しつつも、政府としては可能な限り早期にアンカーテナンシーの可能性を追求するとともに、高頻度実証・量産化技術の確立・商業化加速に向けた更なる支援の強化が非常に重要である。

---

111 MBSE: Model Based Systems Engineering。システムズエンジニアリングモデルを用いて進めるアプローチであり、概念設計段階から始まり、開発全体を通じて継続される、システム要件、設計、分析、検証、検証活動をサポートするためのモデリングアプリケーション。

112 MBD: Model Based Design。 制御及び開発対象をモデル化し、シミュレーションを実施することで、効率的に検証を行いながら設計開発を行う手法

また、衛星やロケット等のサプライチェーンを継続的に支え、増加する需要に応えていく上で、要求されるQCDを満たすコンポーネントや部品、材料の量産化技術の開発に取り組むことが非常に重要である。

さらに、複数の宇宙機で汎用的に利用できるコンポーネントやソフトウェア等を実現する COTS 品の宇宙機への適用拡大に向けては、耐放射線性、耐真空性、耐熱性、及び耐衝撃性等の環境試験、信頼性評価、対策等に取り組む必要がある。また、宇宙機製造機数の増加も見込まれる中、国内の各種環境試験設備が不足しており、これを解消することも喫緊の課題である。したがって、試験手法の最適化や効率化、試験結果や各種ノウハウを業界内で共有する仕組みの構築等を進めるとともに、新たな試験装置の導入も非常に重要である。

また、宇宙転用可能な COTS 品のカタログやデータベース、試験評価結果、宇宙環境における性能の評価技術等の各種ノウハウを業界横断的に確立・集約する体制強化や、各種ノウハウを業界横断的に集約する体制強化、さらに海外の先行事例を踏まえれば、COTS 品に関するコンサルティングサービスを専門的に提供する民間事業者の育成・支援が求められる。

なお、技術開発を実施する事業者においては、長年の使用実績のある宇宙機部品等（部品・コンポーネント・材料）を含め、宇宙機部品の信頼性を継続的に維持・強化するための信頼性評価や検査・試験・検証に関する技術の強化が不可欠である。こうした信頼性強化に係る技術のほか、部品サプライヤーを含め、信頼性強化に責任を持つ組織体制や専門人材の育成・配置、製品の受入検査の強化、定期的な製造・検査工程の監査、データベース構築等が求められる。

⑤ 次世代の宇宙システムに向けた複数宇宙機の高精度協調運用技術

i. 環境認識

複数の宇宙機が互いの相対位置・姿勢を制御しながら高精度に協調する編隊飛行（フォーメーションフライト）技術は、単一の宇宙機では成し得なかった高度な宇宙システムを実現可能な技術であり、自律衝突回避を含む衛星コンステレーションの運用高度化やランデブー・ドッキング等においても共通的に重要となる基盤技術である。このため、その高度化によって、通信・地球観測・探査等の多分野においてブレイクスルーを生み出すことが期待される。

編隊飛行する宇宙機の機数、宇宙機間の距離、要求精度は様々で、多様なミッションに応じて適切なシステムが定義される。例えば米 NASA では、2023 年から 2024 年にかけて、約 64km 間隔のキューブサット4機による4つのアルゴリズムに関するミッションを実施し、地上からの指示信号なしで衛星同士が自律して互いの相対位置を把握、編隊の維持を行う能力等を実証した。欧 ESA では2機の衛星が約 150m の相対距離を mm 精度で制御しつつ編隊飛行するオカルター観測ミッションが進行中である。これらの他にも、複数の国においてバイスタテイック SAR 観測や宇宙重力波望遠鏡といった編隊飛行による多様なミッションが進行しており、技術獲得競争の最中にある。

ii. 技術開発の重要性と進め方

複数宇宙機による高度な編隊飛行の実現に当たっては、宇宙機間の相対位置を把握し編隊するための姿勢制御技術やセンサ技術、データ処理、時刻同期技術、複数宇宙機の自律的運用のための衛星間通信や衝突回避等の運用技術、これらの地上試験技術やシミュレーション技術等の様々な要素技術の開発と結合が非常に重要である。

その際、編隊飛行により実現を目指すミッションや事業構想は多岐にわたり、要求精度も様々であるが、これらの実現のために必要な技術は共通する部分が多く、技術やノウハウ等に関する

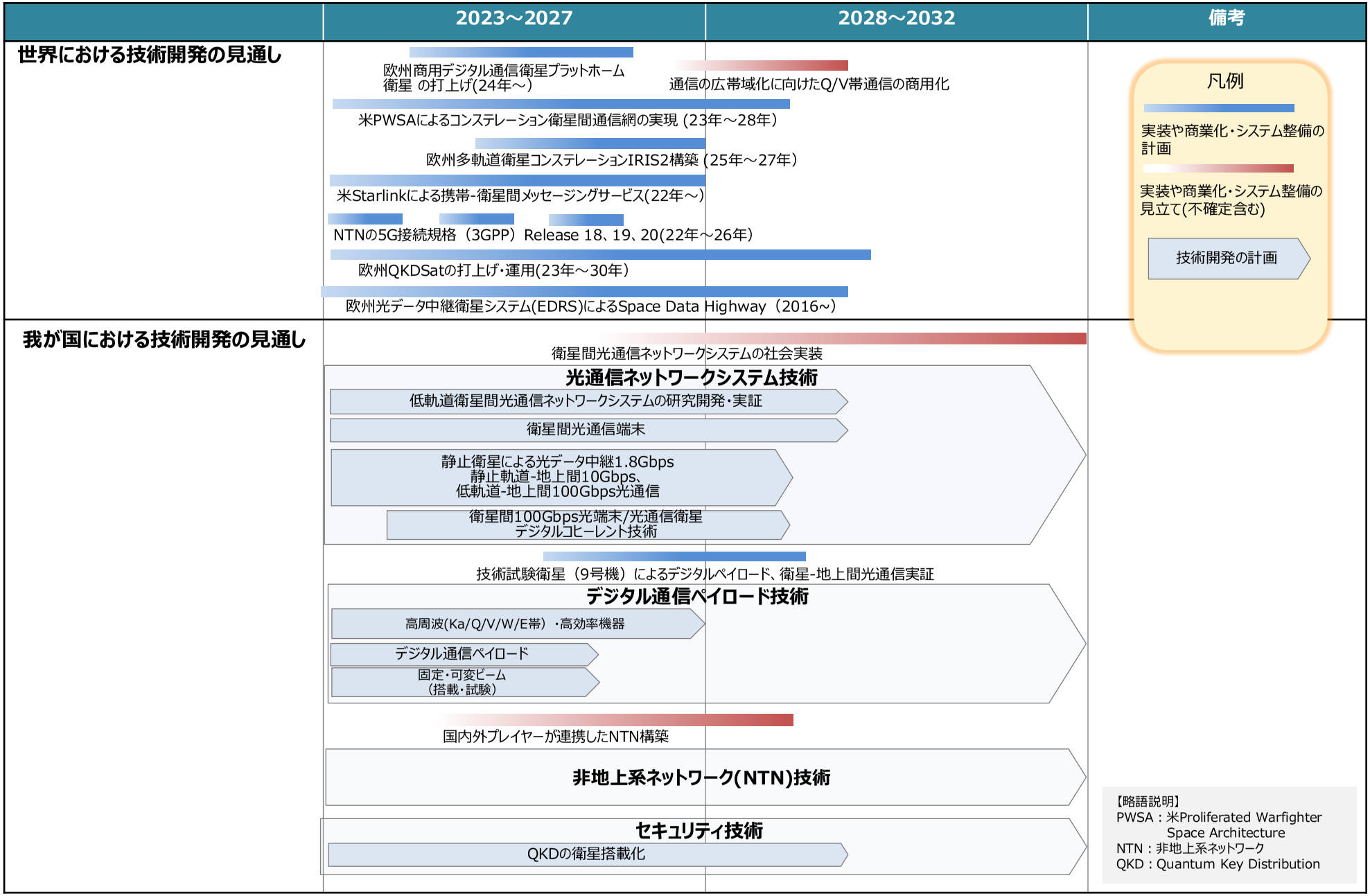
相互の連携及び発展をしていくことが必要となる。したがって、編隊飛行技術の高度化に際しては、実現を目指すミッション内容に応じた衛星等の機数や相対距離、制御精度等の要求水準をあらかじめ設定する、ミッションオリエンテッド型の技術開発が有効であり、加えて、それらのミッションが、異なるコミュニティ間で相互に連携し、各ミッション実現に当たって技術力を高め合える有機的な枠組みを構築することが必要である。

（3）横断的課題【先端技術・人材基盤の強化】

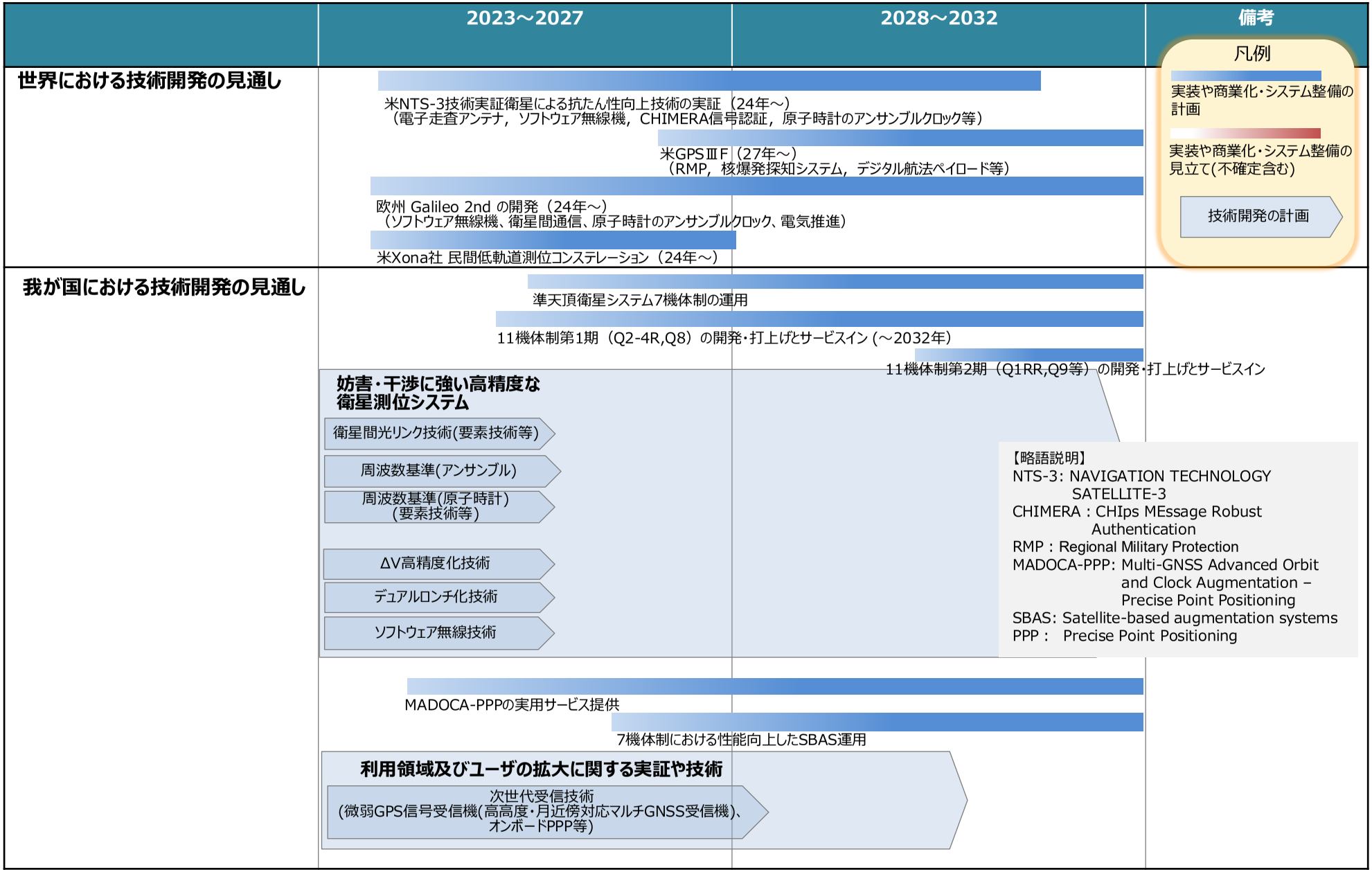
宇宙機の基盤技術における競争力の源泉は、コンポーネント・部品・材料・アプリケーション・システム開発技術である。しかし、技術成熟度がまだ低く、上記に分類できない先端技術を、いち早く宇宙分野に応用することも重要である。そのため、開発支援を行う政府・関連機関は、宇宙関連の先端分野に加え、宇宙以外の先端分野の関連学会や大学に関しても関連を密にし、宇宙・非宇宙先端技術の宇宙への適用を促すための連携の機会を探ることも重要である。

また、こうした技術の研究開発や実装の担い手として需要が拡大する宇宙人材を確保することは、衛星、宇宙科学・探査、宇宙輸送の分野に共通する課題である。そのため、宇宙機器の製造分野に加え、リモートセンシング等のデータ利用側を含めた民間事業者のニーズ等を継続的に把握しつつ、産学官における技術開発や教育・研修等を通じた高度な技術者の育成や、宇宙人材の流動化促進、他産業の人材の宇宙分野への流入促進を図ることが重要である。

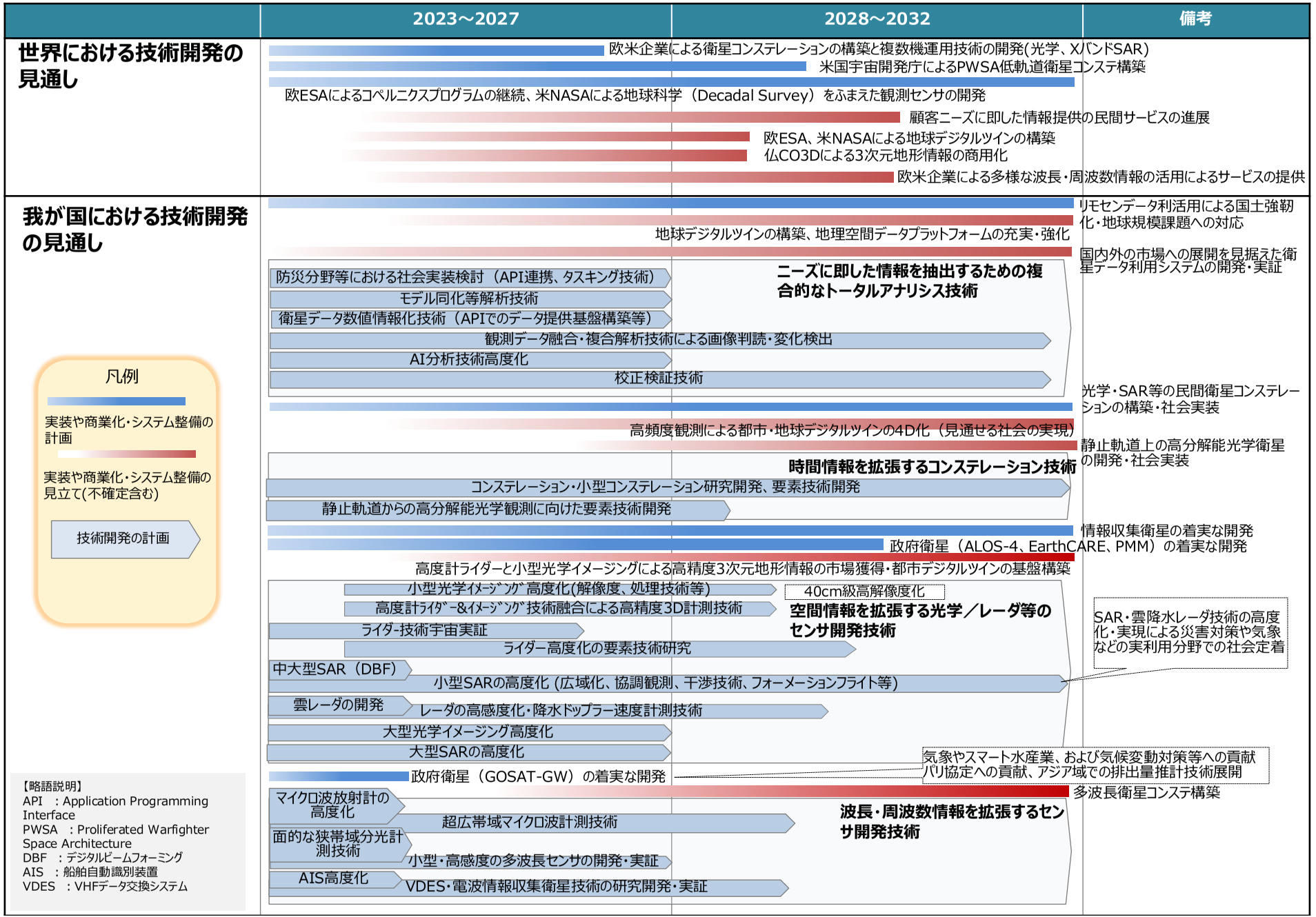
通信の技術ロードマップ（案）



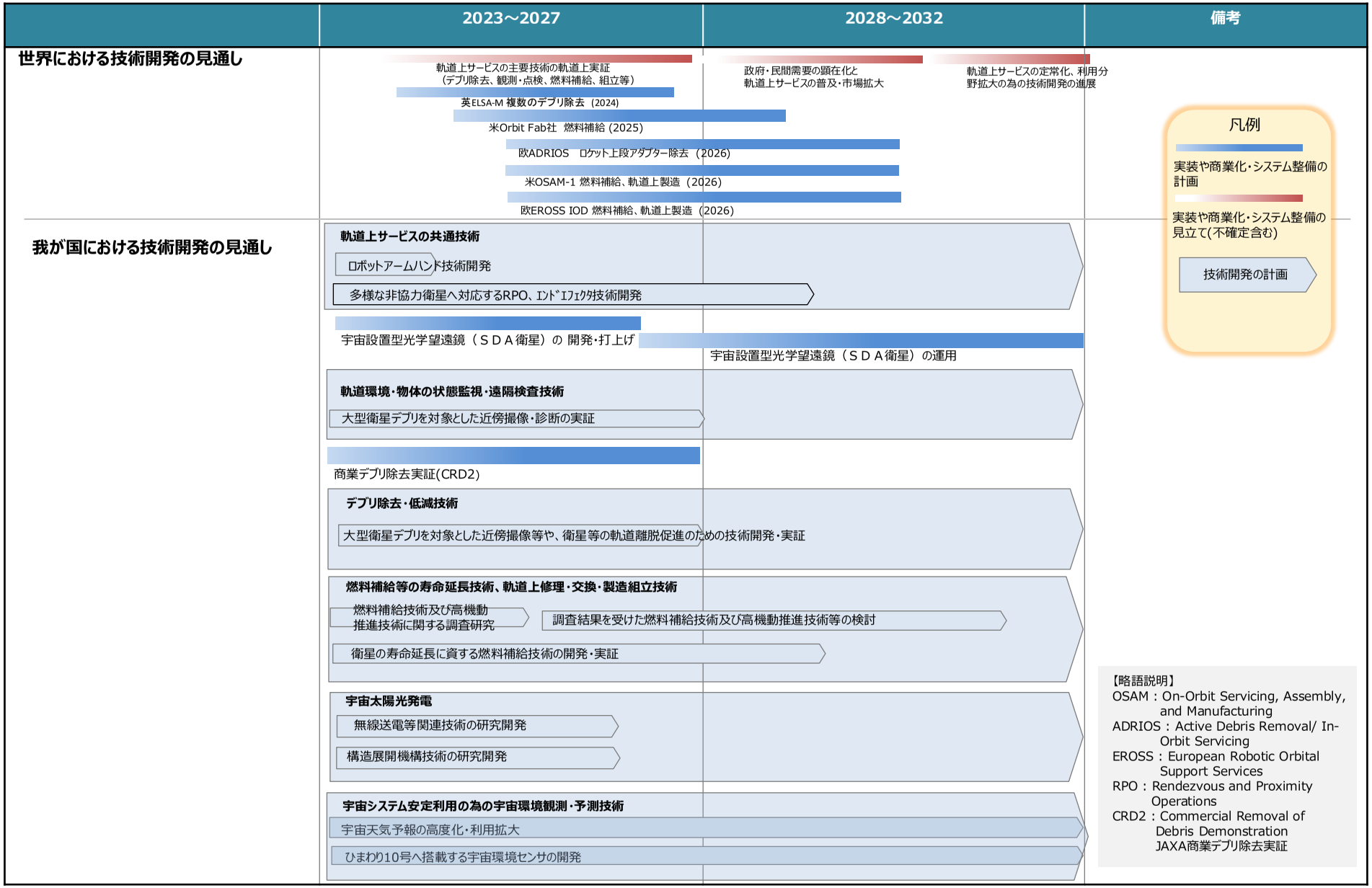
衛星測位システムの技術ロードマップ（案）



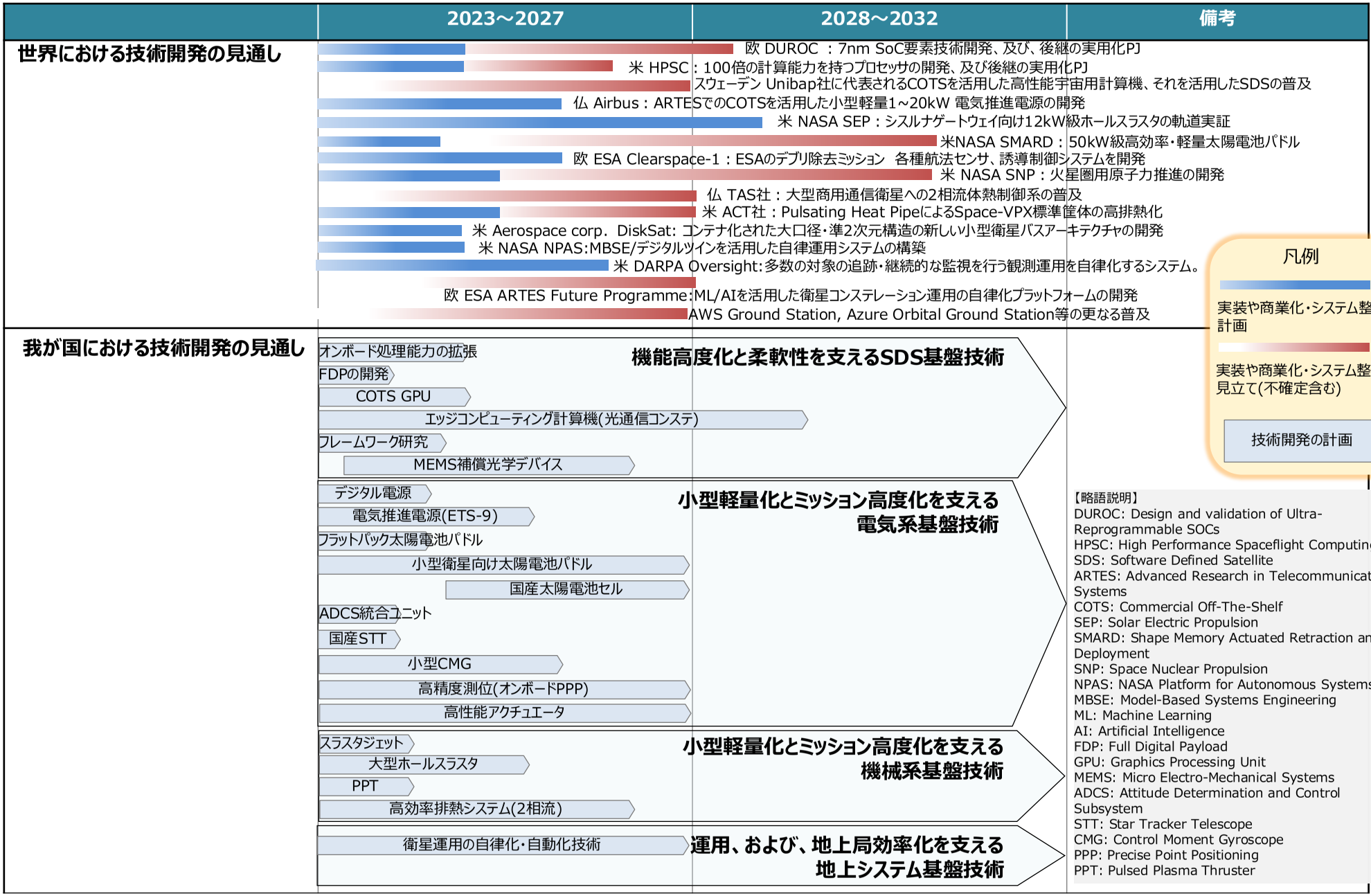
リモートセンシングの技術ロードマップ（案）



軌道上サービスの技術ロードマップ（案）



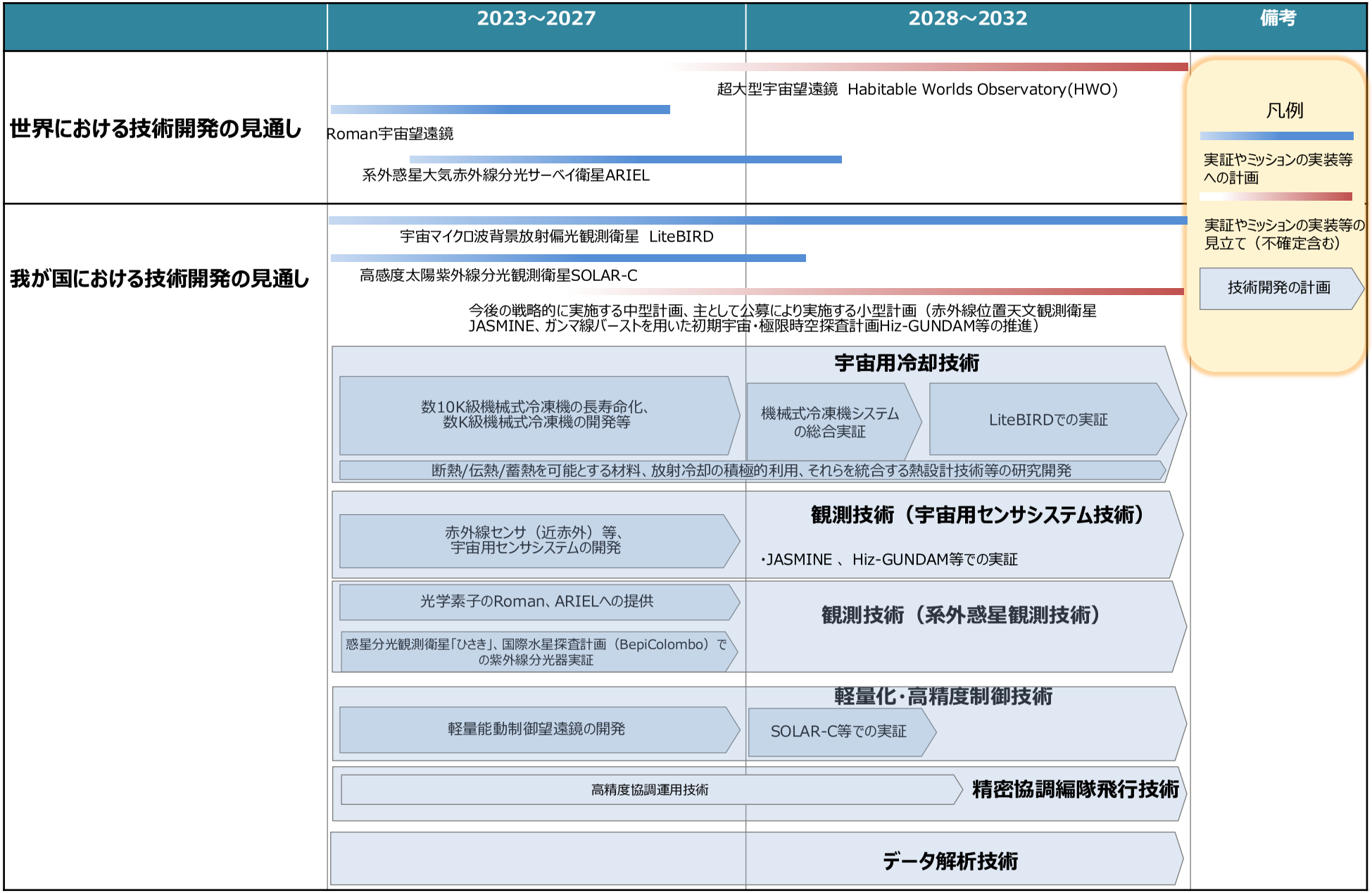
衛星基盤技術の技術ロードマップ（案）



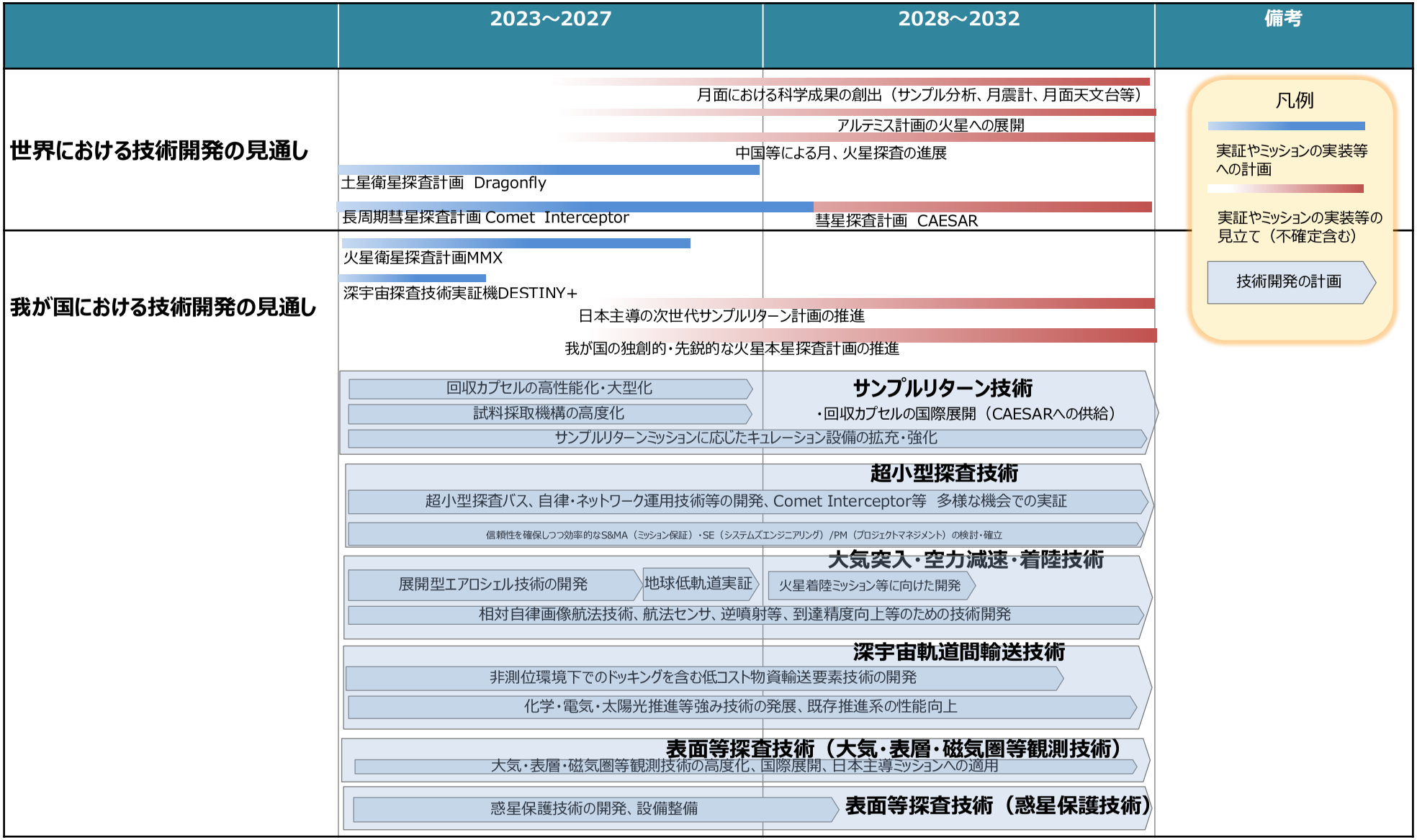
【略語説明】
DUROC: Design and validation of Ultra-Reprogrammable SOCs
HPSC: High Performance Spaceflight Computing
SDS: Software Defined Satellite
ARTES: Advanced Research in Telecommunications Systems
COTS: Commercial Off-The-Shelf
SEP: Solar Electric Propulsion
SMARD: Shape Memory Actuated Retraction and Deployment
SNP: Space Nuclear Propulsion
NPAS: NASA Platform for Autonomous Systems
MBSE: Model-Based Systems Engineering
ML: Machine Learning
AI: Artificial Intelligence
FDP: Full Digital Payload
GPU: Graphics Processing Unit
MEMS: Micro Electro-Mechanical Systems
ADCS: Attitude Determination and Control Subsystem
STT: Star Tracker Telescope
CMG: Control Moment Gyroscope
PPP: Precise Point Positioning
PPT: Pulsed Plasma Thruster

宇宙物理分野の技術ロードマップ（案）

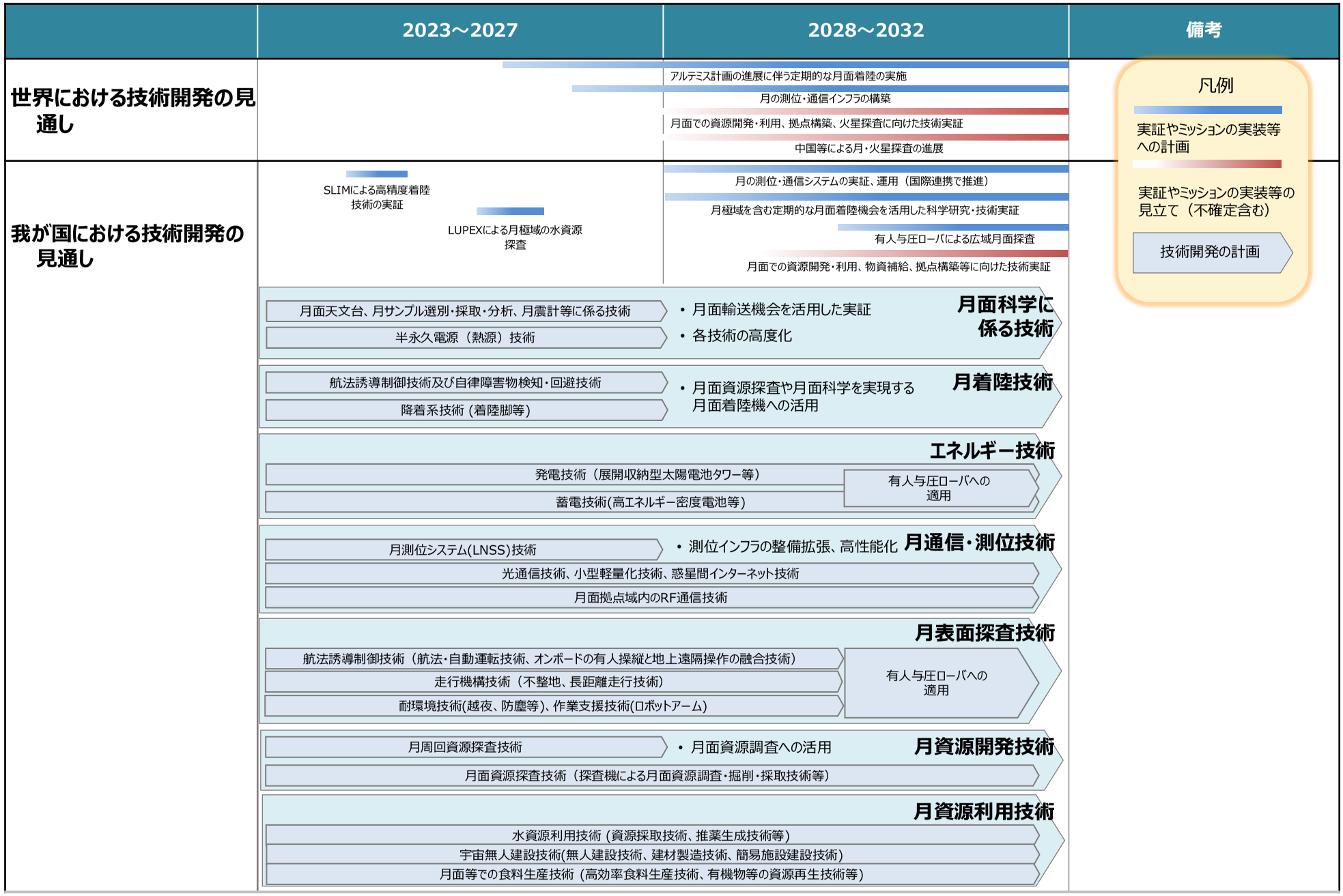
※太陽系科学・探査分野との連携により技術開発を推進



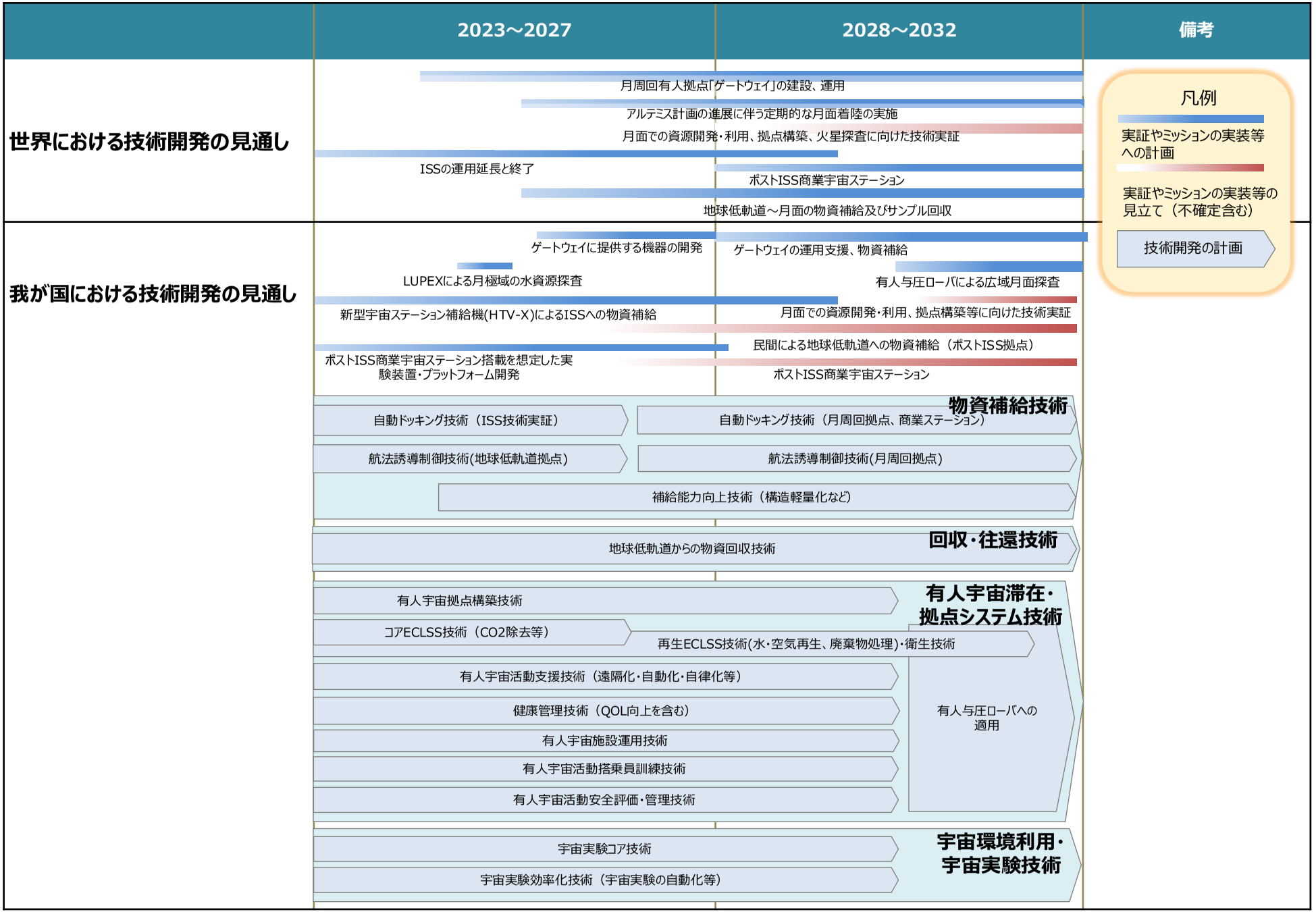
太陽系科学・探査分野の技術ロードマップ（案）



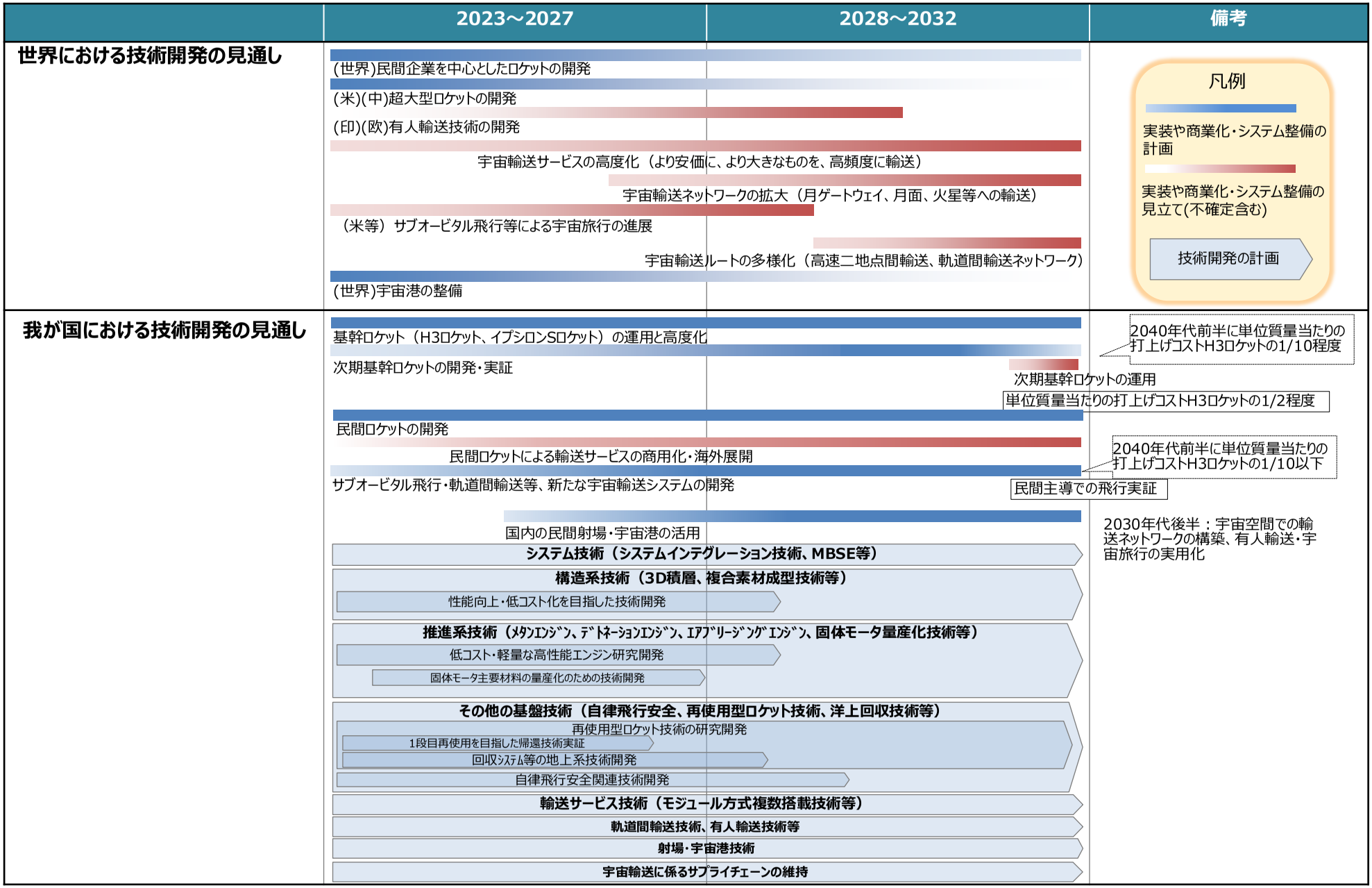
月面探査・開発等の技術ロードマップ（案）



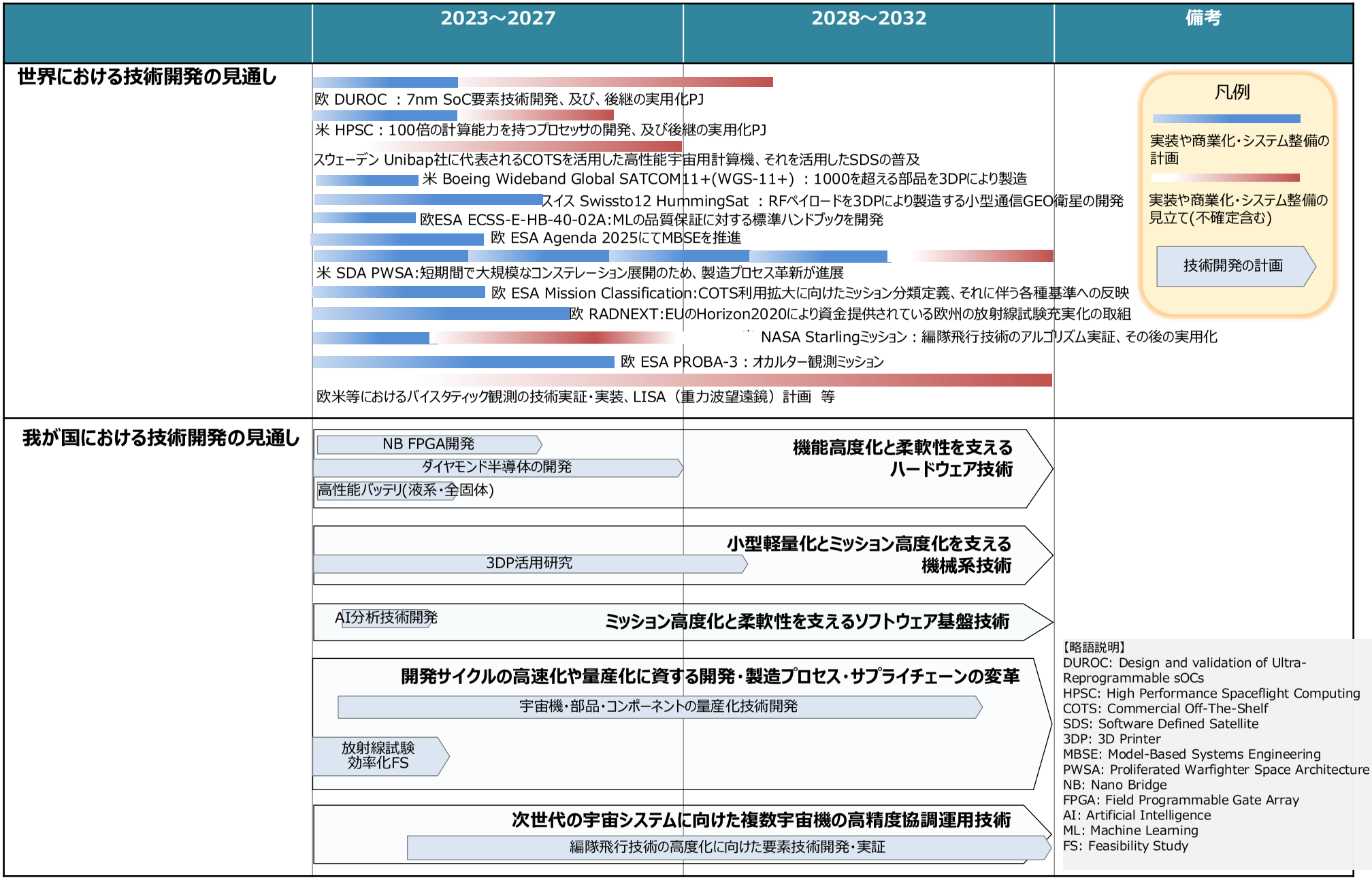
地球低軌道・国際宇宙探査共通の技術ロードマップ（案）



宇宙輸送の技術ロードマップ（案）



分野共通技術の技術ロードマップ（案）



【略語説明】
DUROC: Design and validation of Ultra-Reprogrammable sOCs
HPSC: High Performance Spaceflight Computing
COTS: Commercial Off-The-Shelf
SDS: Software Defined Satellite
3DP: 3D Printer
MBSE: Model-Based Systems Engineering
PWSA: Proliferated Warfighter Space Architecture
NB: Nano Bridge
FPGA: Field Programmable Gate Array
AI: Artificial Intelligence
ML: Machine Learning
FS: Feasibility Study