

宇宙工学の戦略的シナリオ（案）

宇宙工学委員会 宇宙工学 GDI

2024 年 9 月

目次

1. はじめに	2
2. 宇宙科学ロードマップ案	2
3. 宇宙工学の戦略とシナリオ案	6
3.1 次世代探査工学ミッション	
3.2 革新的輸送・推進システムによる新しい探査への挑戦	
3.3 超小型探査機による高頻度・多様な本格太陽系探査への挑戦	
4. 戦略的に獲得すべき技術	14
5. まとめ	24
（附表 1）宇宙工学コミュニティからの情報提供	別ファイル
（附表 2）戦略的に獲得すべき技術の詳細	別ファイル

1. はじめに

宇宙科学の推進においては、理工学の各コミュニティからのボトムアップによる競争的かつ協調的な発展が必須である。そうであってこそ、宇宙科学の裾野を拡げ将来の多様な可能性を追求し、タイムリーに新たなミッションを立ち上げることができる。その一方で、大型化・高度化する宇宙科学計画の実現には、ミッション群の段階的实施により技術を獲得する「プログラム化」が重要である。すなわち、ボトムアップとプログラム的な実施の両立が求められている。コミュニティを広げ、プログラムを拡大していくための1つの方策は、今後期待される宇宙科学ミッションや必要な技術分野を明示し、コミュニティと共有して取り組むことと、そして、新たなプレーヤーと技術を取り入れ、ミッションを活性化していくための魅力的で成長可能な研究開発プラットフォームを獲得することであろう。そのためにも、長期的に投資すべき課題をある程度絞り込んだうえで、それでも残る複数のパスを確実に追求していく新たな仕組みが必要であり、その1つがGDIによるミッション創成活動である。

2020～30年代に系統的に準備すべきことや戦略的に獲得すべき技術（キー技術）については、「宇宙科学の今後20年の構想を検討する委員会」（通称：20年委員会）にて提言された。本ドキュメントは、20年委員会提言書の宇宙工学チャプターを最新化し、宇宙工学と関連するミッション、必要な技術シナリオについて提示したものである。宇宙科学を発展させ得るのは、新しい技術開発と革新、これらをベースとしたイノベーションの実現であり、これらのすべてのステップにおいて、宇宙工学が果たす役割は大きい。本文書は、これら全てのコミュニティ活動が記載できている訳ではなく、例えば、民間との協業が求められるプラネタリーディフェンスなどの最新かつ有望な分野が含まれていない。コミュニティの各研究者が各々の研究戦略を考え、そして実行に移すための参考にしてほしい。また、今後戦略をブラッシュアップした上で、コミュニティ内外と共有し、そして実現に移していく予定である。本文書をきっかけに戦略的な技術開発に向けての活動が活性化し、また、理学と工学が連携したミッション創出活動が進展すれば幸いである。

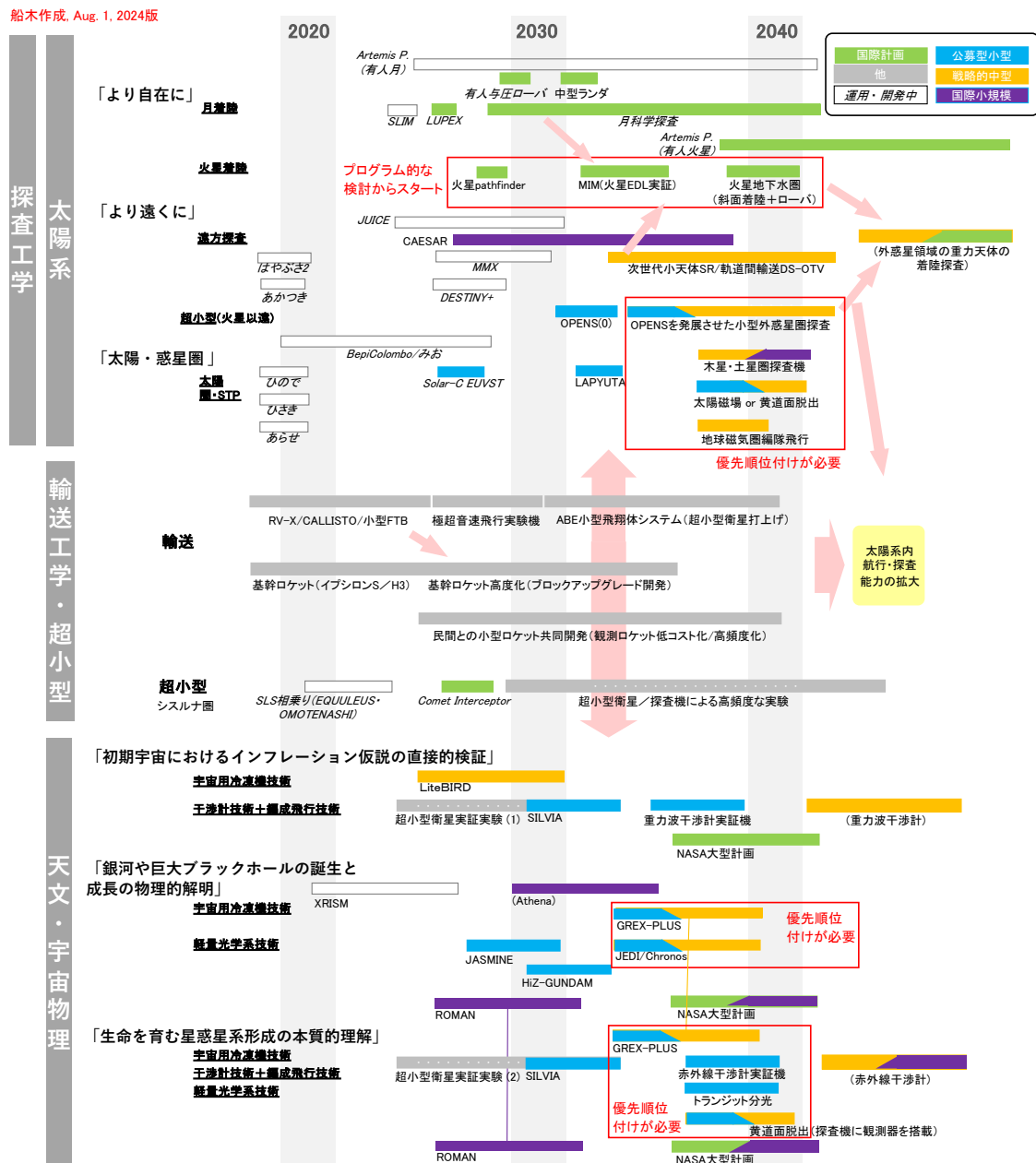
2024年9月 宇宙工学GDI

宇宙工学 GDI メンバならびに執筆協力者（敬称略）

石上玄也 慶應義塾大学	石村康生 早稲田大学	稲富裕光 ISAS
小川博之 ISAS	小原新吾 JAXA 研究開発部門	
笠原次郎 名古屋大学	岸本直子 関西学院大学	北川幸樹 九州工業大学
佐伯孝尚 ISAS	坂井真一郎 ISA	坂本啓 東京工業大学
澤井秀次郎 ISAS	鈴木宏二郎 東京大学	高島健 ISAS
竹内央 ISAS	永井大樹 東北大学	永田晴紀 北海道大学
西田浩之 東京農工大学	西山和孝 ISAS	野中聡 ISAS
坂東麻衣 九州大学	樋口丈浩 横浜国立大学	松尾亜紀子 慶應義塾大学
丸祐介 ISAS	水野貴秀 ISAS	三田吉郎 東京大学
宮崎康行 ISAS	宮田喜久子 名城大学	山田和彦 ISAS
吉光徹雄 ISAS	尾崎直哉 ISAS	津田雄一 ISAS
船瀬龍 ISAS	船木一幸 ISAS	

2. 宇宙科学のロードマップ

20 年委員会からの提言書では、太陽系科学、天文・宇宙物理学、宇宙工学の各分野について、世界的潮流、我が国が目指すべき方向と、そこに向けて持続的発展を遂げるための理工協調シナリオが提示された。その中で提示されたロードマップを、最近までの理工学コミュニティの動向をもとに線表を可能な限りアップデートしたものを次に示す。



宇宙工学分野のミッション構想については、2023 年度から 2024 年度初頭にかけて実施された情報提供依頼（short RFI）の結果が最新であり、図ではこれらのいくつかを記載している。Short RFI に提供いただいた情報は、附表 1 にまとめた。

太陽系科学と宇宙物理・天文物理分野については、主に、20 年委員会提言書に記載のある事項をある程度更新する形で示してあるが、これらの考え方を抜粋して以下にまとめた。太陽系科学分野では、理学の科学目標と工学の挑戦課題が合致する以下の三つのパスを長期的に追求することが有効とされた。

(1) 「より自在に」～地下探査と重力天体着陸技術

重力天体の着陸探査、将来的には地下探査を行う。例えば 2030 年代までに月の裏側やマントル露出地域の物質探査を行い、その技術を発展させ、さらに EDL（大気圏突入・降下・着陸）や惑星保護の技術を獲得することにより、火星の高緯度の地下凍土層や急斜面の地層の探査を行う。MMX により火星周回軌道への大質量の輸送が実現することからの発展でもある。

(2) 「より遠くに」～外惑星領域の探査と遠方航行技術

スノーライン以遠に 2030 年代までに独自技術で到達する。小天体からのサンプリングや遠方航行技術といった日本の強みを伸ばしつつ、国際ミッションへの超小型宇宙機や観測機器の提供も含めて、木星トロヤ群などスノーライン以遠の始原天体や木星・土星圏の探査を実現する。

(3) 「太陽・惑星圏」～太陽から惑星への結合の多角的観測と編隊飛行・黄道面脱出

小型衛星による多角的な太陽観測に加え、上記の遠方航行技術の活用により黄道面脱出など地球から離れた特徴的な視点からの太陽観測を行う。また超小型衛星の活用と観測機器の小型化により、磁気圏や惑星間空間の多点同時編隊飛行ネットワーク観測を実現する。

さらに、「より自在に」と「より遠くに」のパスの結合により、海洋天体や準惑星など遠方の重力天体を我が国自らの意志で着陸探査できる理工学双方の能力を獲得することを目指す。我が国の研究者が、海洋天体のハビタブル環境探査や生命兆候探査をも自律的に選択できる基盤技術を有することは、さらにその先を展望できるようになるために重要である。

天文学・宇宙物理学分野では、将来 20-30 年後までに望まれる成果として、

(1) 初期宇宙におけるインフレーション仮説の直接的検証、(2) 銀河や巨大ブラックホールの誕生と成長の物理的解明、(3) 生命を育む星惑星系形成の本質的理解、などが挙げられた。この先 10 年以内の打ち上げが見込まれる中・大型ミッションとして、例えば LiteBIRD は(1)に、XRISM や Athena は(2)に、GREX-PLUX や WFIRST は(2)と(3)に多大な貢献をすることが期待できる。また、(1)や(2)に繋がる先鋭的な成果を目指して、HiZ-GUNDAM や JASMINE といった小型ミッションが提案されている。上記の目標を達成するために、今後、欧米のミッションは益々、大型化が進むことは必須である。小型衛星クラスで実現でき、かつ、上記の科学成果(1)～(3)に対して大型計画と対抗できる有力な観測手段として、まず「宇宙干渉計」が挙げられる。空間解像度という観点に着目すると、必ずしも望遠鏡の巨大化が得策ではない。宇宙赤外線干渉計が実現できると、比較的小口径(50cm～1m)の望遠鏡でも複数台を用いることで、ALMA や TMT をも凌駕する高空間分解能を手に入れることができる。宇宙干渉計を用いるべきもう一つの分野は重力波天文学である。宇宙重力波干渉計が実現できれば、地上の重力波ネットワークに対して桁違いの感度が期待されるため、ブラックホール合体や中性子星合体のようなイベントも発生前から予知することが可能となる。他の戦略的な方向性として、あらたな技術で高感度化した広視野観測がある。

以上をまとめると、必ずしも高感度を追及するのではなく、「高空間分解能」、「広視野」、あるいは「高即応性」を極めることで、科学的意義を高めることが、一つの戦略となる。上記の観測手段を実現するためのキー技術として、次のものが重要であるとされた（詳細は 4 節を参照のこと）。

(a) 宇宙用冷凍機技術

広視野サーベイにおいて必要感度を得るために必須である。また、赤外線・重力波のいずれの干渉計においても光学系を冷却することで感度の大幅な向上が期待できる。

(b) 軽量光学系技術

小型衛星に口径 1m クラス望遠鏡を搭載することを可能にするために必須の技術である。

(c) 干渉計技術・(d) 編成飛行技術

赤外線観測・重力波検出のための「宇宙干渉計」に必須の技術である。両ミッションで可能な限りの共通化を図り（同時搭載の可能性も含めて）、効率的な開発が望まれる。

3. 宇宙工学の戦略とシナリオ案

宇宙工学は工学技術によって宇宙科学ミッションを先導し、同時に探査機・輸送システム等の宇宙工学技術に革新をもたらすことをその目的としている。そしてその成果が、宇宙科学のみならず、人類の活動領域の拡大を含む我が国および世界の宇宙開発全体へ貢献することを目指している。先進的なテクノロジーの開拓による工学発のシーズによって既存技術を変革させる工学実験ミッションは、工学系の学術関係者に高いモチベーションを与えつつ、我が国の宇宙産業界の実力を底上げする利点がある。したがって、今後もあらゆる機会を捉え、工学シーズをベースとするミッションを立ち上げていくべきである。

宇宙工学には、理学観測の要求に基づくキー技術に対して各サブシステムの英知を投入して取り組むことが求められている。例えば、編隊飛行技術については誘導制御系、推進系、通信系にまたがる要素技術を系統的に統合することで、また、冷凍機に代表される低温技術については熱制御分野の継続的な性能向上の取り組みにより、理学要求を満足し得る技術を開発していく必要がある。これらと強く関連しつつ、宇宙工学コミュニティとして将来の宇宙工学の柱となる技術の開拓に挑戦し続けることが重要である。これら開拓には今現在明らかになっている技術やシステムだけではなく、まだ明確になっていないものや、今後新たに生み出されるものについても順次取り組んでいくという前提であるが、次世代探査技術、宇宙輸送システムの革新、超小型探査機による深宇宙探査の3分野に集約して良いだろう。これらと前節までに述べた将来の理学観測の要求に基づくキー技術を合わせ、計4分野の研究開発を重点的に推進していくことが必要である。

- ・太陽系探査技術においては、「はやぶさ」シリーズから宇宙航行能力を向上させた次世代探査機にて、2030年代以降の小天体をはじめとする遠方探査をリードする。そのような航行技術は黄道面脱出など新規性のある視点からの太陽観測や天文観測も可能にするものである。また、SLIMによって実証された重力天体へのピンポイント着陸技術を、月のみならず火星等に応用するとともに、木星・土星圏そしてより遠方の宇宙空間を、より速く探査することを目指した技術革新が、次世代の目標となる。さらに、探査天体での自在な活動(自在性)も重要である。はやぶさ2では小型子機がミッションの価値を高めるこ

とに成功しており、単機能型の子機であっても母船との組み合わせで、魅力的なミッションを実現できることが示された。深宇宙機と超小型宇宙機の技術等の組み合わせで、世界的にもユニークなミッションの実現を目指していく。

- 宇宙輸送系技術と宇宙推進技術を革新することで、多様な宇宙科学の世界をカバーする地上低軌道間および深宇宙軌道間の軌道間輸送を実現する。まず、これまでの再使用ロケット研究の成果を最大限活用し、大気アシストなどの革新的な推進系技術との組合せで、高性能かつ高頻度で宇宙へのアクセスが可能な輸送システムを構築するための実現に向けた技術を獲得する。さらに、国内でも本格化しつつある民間による小型ロケット開発、再使用輸送システム開発を支援し、大学アカデミア・民間との連携により獲得する技術を融合して日本全体の地上低軌道間の輸送を新たな時代へと導く。また、公募型小型宇宙科学ミッションのためのイプシロンロケットの技術進化を継続し、探査等多様な宇宙科学ミッションがイプシロンクラスの発展的な実施を後押しする。そして、次世代小天体 SR ミッションを達成することで、深宇宙領域における軌道間輸送（OTV）技術を獲得し、太陽系探査の自在性と深宇宙に活動領域を拡張した軌道間輸送へと発展させる。以上の地上から深宇宙までの軌道間輸送システムをネットワーク化し、軌道間輸送ネットワークへと発展させることで、宇宙科学の多様性を一気に高め、全く新しい宇宙科学を生み出す母体とする。

- PROCYON・SLS 相乗り超小型探査機（OMOTENASHI・EQUULEUS）の経験を踏まえ、超小型高機能探査機術を確立することで、小型・軽量で低コストかつ短期開発が可能という特長を生かした宇宙科学・探査ミッションを展開する。すなわち、遠方領域探査ミッションの実現、複数機構成でのミッションの展開、そして、月近傍を含む深宇宙での高頻度探査などの実現を目指す。また、高機能な小型宇宙機の実現により、太陽系科学・天文分野で重要となる編隊飛行にも道を拓く。このように超小型で高頻度な宇宙科学・探査を常態化させることで、従来の公募型小型ならびに戦略的中型ミッションだけではカバーしきれないより多様なミッションへの挑戦を可能とする。そのためには超小型深宇宙探査機に適応した宇宙輸送系の進化も同時に進展させる。

以下では各分野について概説する。なお、今後 20 年を考える場合、戦略的中型計画の候補としては LiteBIRD に加え小天体 SR・GREX-PLUS・JEDI 等があり、

スロットが限定的である。したがって、公募型小型～小規模プロジェクトの枠組みで良質な工学ミッションを立案できるかどうか鍵となる。現行のイプシロンの能力で達成可能なミッションの範囲を拡げるべく、探査機の小型軽量化に努めるとともにイプシロンの能力向上を各方面に働き掛けていく必要がある。

3.1 次世代探査工学ミッション ―サンプルリターンミッションの進展と惑星探査の本格化―

SLIM・MMX の次のミッションとして、月・火星等の重力天体の本格探査、更にはサンプルリターンに挑んで行くことが求められる。これを可能とするのは、多様な宇宙工学技術（打ち上げロケット、深宇宙航行能力、探査機の小型・高機能化、重力天体への軌道投入および EDL（大気突入、降下ならびに誘導制御、着陸）といったシステム技術、サンプルリターンカプセル技術など）である。そしてそのためには、はやぶさシリーズで実用段階にはいった微小重力天体への到達技術や SLIM で実証された重力天体への着陸技術ベースとして、様々な科学観測要求に応えられるよう深化していくことが重要である。

様々な天体表面環境下での活動技術に対し、研究者のモチベーションを重視し、工学からのシーズ創成を原動力として育成する。例えば、欧米の火星探査でポピュラーな地表ローバーのみならず、惑星大気圏内飛行、地下調査、水中調査等、独創性の高い技術開発により、自在な探査を実現する。

さらに探査システムの大型化が顕著な米中に対し、我が国でははやぶさでの MINERVA シリーズや SLIM に搭載された LEV シリーズといった小型探査ロボット技術がある。さらには惑星大気（特に火星）における探査航空機の検討も進められている。大型かつ国際協働ミッションとなる重力天体からのサンプルリターン計画においても、通常のロボットなどでは進入できない探査領域へこれら小型探査プローブを展開併用することによって、ミッションの拡張とリスク分散を可能とし、新たな科学的発見に繋がることが期待される。小型探査プローブの高頻度なフライト機会ならびにミッション期間拡張のためには、特に通信といったサブシステムの小型化が必要となるであろう。

我が国の探査技術が現状網羅している領域は太陽を中心に水星～火星の領域であるが、今後はメインベルト、木星（トロヤ群小惑星帯を含む）、土星等、火星以遠の領域の探査技術を獲得し、上記の独創的探査技術と融合させる。これには、探査対象天体到達後の高度な探査を担う探査機が、軌道上で自在に分離・ド

ッキングし、燃料の補給や物資・サンプルの積み替えを行う、いわゆる宇宙港のコンセプトも重要となる。また、技術的蓄積を重ねた信頼性の高い輸送機が、外惑星領域の環境に特化して極限まで小型軽量化された超小型探査機を外惑星へ打ち出し挑戦的なミッションを展開するコンセプトも、超小型探査機という日本の強みを生かした戦略として有望である。より遠方の探査をより速く可能にするためには、軌道工学ならびに推進工学の発展に加えて、高効率発電（高重量電力比の発電システム、宇宙用原子炉・原子力電池等の半永久電源）、高信頼・高比推力推進技術、省電力技術（超小型衛星技術との融合や高エネルギー密度バッテリーの開発）、熱制御技術（電池や推進系等の低温保存技術および能動熱制御システム）などの各領域でブレークスルーが必須である。これらをクリアし遠方探査の道を開くために、戦略的な取り組みを進める必要がある。

当面の現実的な深宇宙機打ち上げ手段はH3のみである。H3は現状の公称コストとしてはイプシロンロケットと拮抗しているので、単純な代替でもコスト上はペイする。一方で、JAXA ないし日本全体としては、イプシロンロケットによる探査ミッションのためにキックモーターを開発することは、より柔軟で効率的な打ち上げの観点で、長期にわたる探査ミッション立案に資する可能性がある。H3のGT0への打ち上げミッションの相乗りとして、キックモーターと深宇宙機を組み合わせで打ち上げ、仮に打上自由度の制約などをクリアできれば、深宇宙探査の機会の大幅な増加とコストの観点で魅力的であろう。

探査の自由度を拡大するために、従来の手法にとらわれないミッション構築を考えることも有益である。例えば、1機のH3ロケットで複数ミッションを打ち上げる、イプシロンロケットを複数機連続して打ち上げて軌道上で宇宙機をドッキングさせる、あるいはH3ロケットとイプシロンロケットを短い時間間隔で打ち上げることによって一つのミッションを構成することで、ロケット1機のミッション規模で制約を受けないミッションの構築が可能である。また、小型の分離機を使うことで、ミッションの自在性を向上させることが可能となる。超小型機による確実な長期間の巡航は、信頼性等に課題があるが、母船と超小型分離機の構成にすることで、超小型機の機能の単純化や動作期間を短くすることができ、本格科学ミッションへの超小型機の貢献が可能になる。また、母船を、深宇宙巡航を担う輸送機として共通化することで、探査天体での活動に注力することが可能になる。

3.2 革新的輸送・推進システムによる新しい探査への挑戦 ―地上から深宇宙までの輸送ネットワークの構築に向けて―

2040 年代の多様な宇宙科学の世界をカバーし、月・惑星探査の礎となるベースキャンプ的な軌道上インフラと、それらを繋ぐ宇宙輸送を構築するためには、現行の基幹ロケットによる宇宙輸送とその発展に加えて、地上から低軌道への高頻度低コスト輸送と低軌道から静止軌道への頻繁な輸送、科学観測のためのさらなる深宇宙への軌道間輸送が必要である。再使用、革新的推進システム、OTV などの技術を段階的に獲得・融合し、地上低軌道間および深宇宙軌道間の宇宙輸送ネットワークへと発展させることで、持続的な宇宙科学が可能となる。

地上低軌道間輸送においては、2020 年代後半には、これまでの再使用ロケット研究の成果を最大限活用し、大気アシスト式のエンジンの小型 FTB 飛行実証を実現し、それに続く技術として、HIMICO や DES シリーズなどの観測ロケットミッションによって革新的な推進系技術（エアブリージングエンジン、デトネーションキックモーター等）を獲得する。これと並行して、先進的な要素技術（ヘルスマネジメント、超軽量構造、再使用熱防御、極超音速飛行制御など）を戦略的に獲得し、これら技術が、2040 年代には極超音速飛行域まで加速飛行可能な輸送システムの構築技術を獲得する。再使用運用技術と革新的推進系技術を組み合わせることで、日本独自のコンパクト、高性能かつ高頻度で運用可能な宇宙輸送システムの構築を目指す。さらに、国内において本格的になりつつある民間による小型ロケット開発や再使用輸送システム開発を支援し、大学アカデミアと民間技術を融合することで、観測ロケットの低コスト化や高頻度化、再使用化、さらには小型衛星打上げシステムへの発展を実現し、日本全体の地上低軌道間の輸送を新たな時代へと導く。

深宇宙軌道間輸送においては、次世代小天体 SR ミッションによって軌道間輸送技術を獲得し、並行して深宇宙ランデブー・ドッキングや軌道上燃料補給などの軌道間輸送を支える重要技術を段階的に獲得することで、活動領域を深宇宙に拡張した軌道間輸送を実現する。さらなる太陽系探査の自在性の拡張に向けて、化学推進と電気推進の融合・ハイブリッド化をはじめ、宇宙航行に必要な革新的な推進システムなどの技術を段階的に実証する。月・火星を始めとする重力天体への着陸機についても、柔軟エアロシェルをはじめとした再突入システム

技術や、ロケット再使用化のための離着陸や帰還飛行に関する技術を融合して技術革新を先導し、宇宙科学の多様性を一気に高め、全く新しい宇宙科学を生み出す軌道間輸送ネットワーク時代に備える。

基幹ロケットプログラムに関しては、2020 年代後半の打ち上げは、H3 ロケットと、イプシロン S ロケットによって担われることになる。低コストで打ち上げ能力も向上した H3 ロケットの特性を生かして、短期間で速く遠くの対象天体に到達する能力が求められている。一方、イプシロン S ロケットについては、これを宇宙探査の高頻度化に適用し発展的なプログラムとするためにも、火星領域へ意味のある質量を輸送できるだけの能力増強が求められる。これは、20 年後に目指すべき世界ではなく、宇宙科学がイプシロン S ロケットと共に歩むためには今すぐ実施すべき施策である。イプシロンロケットのメリットは自在性（探査機への適応性、カスタマイズの自由度）であり、この点を定量化し科学ニーズを実現するための改良目標を掲げ、進化させていくため、JAXA 内外と連携した議論が必要である。特にキックステージの開発は、軌道間輸送や軌道上サービスへの拡張性を考慮し実施すべきである。

3.3 超小型探査機による高頻度・多様な本格太陽系探査への挑戦 一次世代の超小型高機能探査機－

超小型衛星は、いまや地球周回に留まらず、深宇宙探査へも進出しはじめている。2014 年にはやぶさ 2 と相乗りで打ち上げられた PROCYON は、50 kg 級の超小型探査機バスや、深宇宙通信用の高効率アンプ、高精度軌道決定などの先進的な探査機技術を実証するとともに、深宇宙での科学観測成果もあげ、超小型衛星による深宇宙探査の可能性を切り拓いた。PROCYON の成功に続き、宇宙研と東京大学を中心に、さらに小さな CubeSat 級の探査機として、EQUULEUS と OMOTENASHI を開発し、2022 年に NASA の SLS ロケット（Artemis-1）により打ち上げられ、高精度・高効率な軌道制御技術の実証に成功するなど超小型探査機の更なる能力拡大に資する成果を得た。

大学衛星に端を発する超小型衛星は、予算の制約から民生品ベースの設計を強いられる状況を逆手に取るような形で、個々の部品の信頼性に期待できない中でいかにミッション全体の信頼性を担保できるかという、従来の衛星設計の発想とは逆の方向からスタートして、軌道上実績を積み重ねてきた。その過程で、1kg の CubeSat から 50kg、100kg のマイクロ衛星へとスケールアップしてきた。

地球周回ではビジネス利用のために多数機の衛星コンステレーションが構築されつつあるなど、その数は爆発的に増えてきている。超小型衛星用推進系やその他バス機器全般の研究開発も、世界的な市場で活況を呈している。

超小型衛星は宇宙科学の将来にとって以下のような意義を持っている。

- ・中大型の低頻度ミッションの間を埋める手段となる（例えば、期待した観測結果となるか分からないハイリスクなサイエンスへの挑戦、前の中大型のミッションの成果を踏まえて次の中大型ミッション計画を先鋭化するためにサイエンスの仮説を短期間に軌道上で検証する、など）
- ・複数小型機の協調運用によって理学ミッションに道を拓く（宇宙干渉計の技術実証、小惑星超マルチフライバイを実現する深宇宙コンステレーション、磁気圏の多地点観測ネットワークなど）
- ・技術開発のステップのひとつとして短期間で宇宙実証する機会を提供し、PDCAサイクルを早く回す。
- ・異なる複数の“パス”をオプションとして追求する手段となる（まずは小さく始める＋多様なパスの追求）
- ・高い即応性を活かして（国内/海外問わず）相乗り機会を最大限活用する手段となる
- ・実践的な人材育成機会を頻度高く提供することにより、開発を支える企業も含めた宇宙工学コミュニティの持続的な発展が可能となる
- ・今後大化けするかもしれない新しい技術に対する分散投資として、技術・サイエンスの最適組み合わせを考えることができる
- ・コストを抑えつつミッション全体の信頼性を確保する新たな考え方を小型衛星のコスト削減に活かす
- ・低コスト・高頻度化できる特性から民間主体で実現できる適正規模であるため、民間企業の能力を最大限に活かすことができる

超小型探査機の今後の方向性としては、基幹ロケット相乗りの際に超小型キックモーターによって深宇宙に出る、あるいはイプシロンなどのロケットの超低成本化により超小型探査機だけの打ち上げ（場合によっては複数機の同時打ち上げ）を行うことで、地球周回衛星並の頻度を確保することが重要である。地上系についても自在性とコスト削減が必要であり、超小型を活かした探査（多数機・高頻度化）に対応するにはブレークスルーが必要である。小型・軽量とい

う超小型探査機の特長を生かしたミッションのもうひとつの方向性は、外惑星等の太陽系遠方領域探査である。超小型衛星技術を活用することで、探査機自身による複数回の軌道変換・スイングバイを前提にイプシロンロケットであつても探査機を外惑星まで到達させることが可能であり、日本初の外惑星探査をコンパクトな規模のミッションで早期に実現することが望まれる。その先には、技術的蓄積を重ねた信頼性の高い輸送機が、外惑星領域の環境に特化して極限まで小型軽量化された超小型探査機を外惑星へ打ち出し挑戦的なミッションを展開するミッションコンセプトも考えられる。また、超小型衛星による外惑星探査は世界的に最先端の技術であり、このような実績を獲得することにより、国際協力ミッションとして海外の大型の外惑星探査機に日本の子機を相乗りさせる機会の獲得にもつなげたい。このように外惑星探査の多様な機会を捉えることにより、巨大なコストをかけて低頻度だが単発で大きな成果を得る欧米の外惑星ミッションとは異なる方向で、低コスト・高頻度で、それゆえにリスクも取った外惑星探査プログラムを日本として展開していくことも期待される。

このような超小型探査ミッションに必要な衛星技術としては、超小型衛星用の推進系や、外惑星探査の場合は電力（セイル技術、超低消費電力）、通信（光通信など）、熱設計技術の革新が必要である。プロジェクト推進の観点では、超小型衛星の低コスト・短期開発のメリットを維持するためには、昨今の衛星ならびに探査機に求められる高い信頼性要求をそのまま適用するのではなく、開発において一定のリスクを許容することが重要である。信頼性を確保しつつ効率性を追求した 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・経験のメーカー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構築することも、技術開発と合わせて進める必要がある。

4. 戦略的に獲得すべき技術

20 年委員会の提言では、2 章にて抜粋して説明した長期シナリオから、我が国が戦略的に獲得すべき技術を抽出して示した。以下では、獲得すべき技術項目を再掲すると共に、情報の最新化を行っている。詳細については、附表を参考のこと。

(1) 宇宙用冷凍機技術の高性能化

日本はこれまで、赤外線や X 線分野で「あかり」「ひとみ」に代表されるような液体ヘリウムと機械式冷凍機を組み合わせた冷凍システムの軌道上実証に成功してきた。近い将来では LiteBIRD などのミッションが提案され、また ESA の Athena 計画へのカロリメータ冷却系への協力を検討している。新たにこれらに必要な冷却技術としては、無冷媒かつ長寿命であることがキーとなる。

100 mK などの極低温冷却に関しては、断熱消磁冷凍機 (ADR)、希釈冷凍機等の開発を行ってきたが、未だ軌道実証に至ったものはない。冷凍機、ヒートスイッチ等の冷却技術のみならず、センサへの配線、温度計測等の実装技術も含め技術確立が必要である。この分野は民生の開発も進んでおり、宇宙応用に向け、大学等にも開発を期待する分野である。

数 K までの冷却に関しては我が国の Joule-Thomson 式冷凍機が、冷却能力および効率の面で世界のトップクラスにあるといえる。ただし、冷却能力、寿命等ミッションからの要求に合わせたカスタマイズと標準技術としての確立のバランスをとりつつ、今後も開発は必要である。

一方で、冷凍機で使用されるコンプレッサーによる振動は、観測機器への影響は大きく、その振動およびその伝播を極限まで抑える技術の確立と振動源からセンサまでの距離を取りつつ冷却できる技術が必要である。後者については極低温ヒートパイプなどの高効率熱制御デバイスの開発も必須である。

今後、宇宙用冷凍機・冷却系技術の価値はますます高くなると思われるため、「宇宙用冷凍機技術の高性能化」を我が国の強みとして、これを持って巨大ミッションに参画する道が考えられる。

(2) 軽量光学系技術

「より遠くまで、より鮮明に」という科学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している中、限られたペイロードの中において、望遠鏡の軽量化、高精度化が一層求められており、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進めることが重要である。

当該技術について、これまでに、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を実現しており、軽量鏡面材およ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が重要である。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等が考えられる

また、赤外線や可視光だけでなく、電波に対する反射鏡アンテナにおいても軽量・大開口な光学系が実現できれば、地上の電波天文アンテナと組み合わせた高度な電波天文観測や、ミッションデータの高速通信が可能になるなど、多くのミッションに貢献できる。なお、次世代移動体通信 6G (第 6 世代移動通信システム) の帯域としてミリ波帯 (7-24GHz) やさらにはサブテラヘルツ帯 (92-300GHz) が計画されており、アンテナ光学系の軽量化に対する技術は波及効果も大きい。

有効面積増大に関しては、0.8~1.5m 径のイプシロン級小型ミッションだけでなく、5~10m 径を超える展開アンテナも必要であり、そのための展開技術の構築は必要である。膜面展開アンテナのような新たな構造様式だけでなく、従来からのフープ型展開アンテナは、欧米では Ka 帯 (26-40GHz) の高い周波数における通信用としても利用されており、日本の技術としても確立することが不可欠である。

これらの要求を実現するためには、耐環境性を有する材料やその製造技術の開発が望まれる。材料技術としては、観測波長に対応した鏡面材料の性能向上や、構造システムの軽量化のためには比剛性・非強度が高く、熱膨張係数の小さい繊維強化複合材料(CFRP)の利用拡大が必要である。そのためには、CFRP による脱湿変形、クリープ変形など、宇宙空間での鏡面形状を高い精度で維持するための研究を継続・発展させることが望まれる。また、従来からの製造技術に加え、Additive Manufacturing(AM)技術による高機能構造実現のための設計技術の獲

得が必要である。さらに、実験による検証に加え、解析による検証など DX 化による開発効率向上に向けた取り組みも必要である。

いずれの周波数においても観測においては分解能向上および観測時間拡大が期待されている。観測時間を拡大するには、熱シールドによる遮熱だけでなく、熱変形による鏡面精度の低下を補うためのスマート構造技術の確立が不可欠である。これには、センシング・アクチュエーションに関する技術だけでなく、それらを統合する技術が必要である。ここで、アンテナのミッションは観測もしくは通信であり、適した構造形態を素早く求めて確実に変形させる必要がある。そのような自律運用技術の確立も必要である。

また、鏡面形状だけでなく、目標天体を高い分解能で確実に観測するには視野が狭くなることから、ミッションによっては 1 秒角以下の高い指向精度が必要である。例えば、X 線天文では長大マスト構造が採用されている。これは熱変形に対してロバストなだけでなく、さまざまな外力によって生じる振動を抑える制振技術が必要である。宇宙構造で要求される軽量化は固有振動数の低下を招き、制振が困難となる。これに対して、高精度で安定した制御技術の確立が不可欠である。

それに加えて、これらの高精度宇宙技術は、地上での実験検証が困難であり、熱解析、構造解析、光学解析などを統合したデジタル検証技術（可視光領域では STOP 解析（Structural Thermal Optical Performance Analysis）として知られる）として、複合領域・マルチフィジックス解析技術の高精度化が必要である。

(3) 編隊飛行技術（フォーメーションフライト）

天文分野や太陽地球系物理学（Solar-Terrestrial Physics、STP）分野の将来計画において編隊飛行は要である。例えば、磁気圏観測では、4 機の衛星で正四面体を構成すること、衛星間距離は 1~1000km をミッション期間中に可変とすることが求められている。また、極域磁気圏の観測のために、複数機の衛星で直線隊形あるいはレコード盤隊形での観測も構想されている。衛星の相対位置決定精度・時刻決定精度としては、衛星間距離が L km の時にそれぞれ $L/100\text{km}$ と $L/1000\text{msec}$ が要求される。一方、天文分野の赤外線干渉計や重力波干渉計では、より高い精度が要求される（次項目: (4) 干渉計技術を参照のこと）。

編隊飛行を形成・維持する相対航法誘導制御技術、および観測ミッション実施中に高精度で相対位置を保持する精密航法誘導制御技術の研究を推進する必要がある。すなわち、航法センサを高精度化させた粗制御と、観測センサ情報まで

を組み合わせた精制御を協調させる超精密制御が重要となる。アーム長 10m 程度の編隊衛星観測（FFAST）にて相対位置制御型の編隊飛行システム研究が実施された他、宇宙重力波干涉計など相対加速度要求が高いミッションに向けた精密制御用電気推進の研究も実施されているが、いずれも限定的である。将来的には SILVIA を初めとしたミッションが提案され、編隊飛行に関する要素ならびにシステム研究を、将来天文ミッションなどが求める要求の実現へ向けてプログラマ的に実施することが求められる。

(4) 干涉計技術

赤外干涉計の基線長は、遠赤外線で 1km 以上（ALMA 相当かそれ以上を目指す）、近・中間赤外線で 10-100m 以上（地上望遠鏡相当かそれ以上を目指す）が必要である。このとき編隊飛行に必要な精度は、遠赤外線で 100mm、中間赤外で 10-100mm、近赤外線で 1-10mm である。これらを実現するための技術としては、先に述べた編隊飛行技術に加え、高周波擾乱の制御技術、高精度な測距技術、長基線赤外線干涉技術、ナール干涉技術が必要である。

重力波干涉計では、基線長として 100km ないしは 1000km が想定されている。距離の絶対精度の要求値は 500m ないし 5km 程度であるが、0.1-10Hz の周波数帯における重力波を捉えるためには、そのゆらぎスペクトルが $10^{-18} \text{ m Hz}^{-1/2}$ 程度以下である必要がある。衛星に対する外力雑音を低減するためのドラッグフリー技術、高い変位感度を実現するための長基線レーザー干涉計技術、外力雑音の抑圧技術が必要である。これらの技術開発を、小型衛星等を利用して 2030 年頃を目処に実現し、2040 年頃に干涉計ミッションの実施を目指すシナリオが考えられる。

(5) 深宇宙航行・黄道面脱出に必要な技術

外惑星領域に到達することを可能とし、太陽圏全域の自在な探査を実現する技術が必要である。黄道面脱出など太陽圏を俯瞰できる地点からの観測は、太陽圏全体の物理的理解を推し進める。黄道面脱出により可能になる太陽表面の多点観測は、日震学による太陽内部推定ノイズを大きく下げることが期待される。その結果、太陽内部での磁場生成、いわゆるダイナモの理解を進展させ、太陽活動周期の謎解明への大きなステップとなりうる。また、「整った」磁場を持つ高緯度での磁場観測と太陽風のその場観測の比較は、理論的に太陽風加速問題を解決するためのユニークな観測データとなることが予想される。太陽と地球を

同時に俯瞰することは、地球に影響を及ぼすコロナ質量放出（CME）や高速太陽風の多面的理解や早期検出にも繋がるだろう。また深宇宙航行や黄道面脱出により、地球近傍と比べ惑星間ダストによる太陽光散乱や熱放射が著しく低減することで、宇宙論の重要課題である宇宙初期の初代天体や素粒子に起源をもつ可視赤外波長域の宇宙背景放射を、惑星間ダストに影響されない究極の感度で検出できる。銀河系や矮小銀河など拡がりをもつ天体の観測精度が飛躍的に向上するなど、拡散放射の観測による天文学が大きく進展することも期待できる。軌道間輸送技術の獲得は、探査ミッションの頻度と可能性を増大させるものである。また、バス系コンポーネントの小型軽量化等により比較的重量がある観測装置を目的地に持っていくことができるようになると、多様で高度な計測が実現しミッションの可能性が広がる。合わせて、望遠鏡やアンテナなど観測装置の軽量化も重要である。

より遠方の天体に到達し、到達後に効率的・自在に軌道制御するために宇宙航行能力を向上することが、多様な探査活動のために重要である。具体的には、ソーラー電力セイル（スピン型・ブーム型）や、イオンエンジンの高性能化（高比推力・高推力化・小型化・低コスト化・長寿命化・信頼性向上）、ホールスラスターの深宇宙適用、二液化学推進系の高度化（大推力エンジン、スロットリングなど）、自律相対航法・自律ランデブー・ドッキング技術の高性能化（測角・測距精度と有効距離の向上、小型軽量化、省電力化）などに、高度な軌道決定や運用の自動化をはじめとした地上技術を組み合わせた総合的な技術向上が必要である。さらに軽量大面積太陽電池パドル（薄膜太陽電池パドル）、高効率薄膜太陽電池、リチウムイオン電池、再生型燃料電池、半永久電源、省電力などの電力技術や広範囲の太陽距離変化に対応した熱制御技術の高度化が必要である。これらの技術は、小型宇宙機、観測ロケット等の頻繁な飛翔機会を活用して、積極的に軌道実証がなされることが望ましい。また、欧米に遅れをとっている通信容量の増大は、深宇宙探査のみならず観測衛星からの要求を含め、喫緊の課題である。媒体(周波数、光)、通信方式、コンポーネントの3領域について、多値変調、高能率符号化等の変復調技術、光を含めた高周波関連技術および集積回路技術など、地上と搭載をシームレスなシステムとして研究が推進されることが望ましい。一方、膜面を展張し光圧推進により航行する技術は日本が最先端をゆく技術であり、形状精度の高いセイル構造技術や、光圧を利用したより効率の高い軌道・姿勢統合制御技術を向上させること、膜デバイス（薄膜太陽電池、アレイア

ンテナ、干渉計、反射シートなど）を貼り付けた高機能膜を実現することなどにより、今後も世界をリードしていくことが重要である。

(6) 天体表面到達および離脱技術

大気を持つ天体へ大質量をエントリさせる技術（エアロキャプチャや展開型エアロシェル等の先進的な手法も含む）に加え、SLIM で先鞭をつける高精度着陸についても大気を有する天体での航法誘導、超音速パラシュートなどの技術を獲得する必要がある。さらに、天体表面環境での熱制御など長期生存・稼働技術、天体上の各種の移動手段（長距離踏査ローバーあるいは火星航空機や火星ヘリ等）による極限地形へのアクセス技術ならびに通信遅延を補償する自律移動運用システムなどの技術を獲得する必要がある。当面の対象は火星であり、そのために惑星保護技術も合わせて確立する必要がある。これらの技術を日本はまだ手にしておらず、2020 年代後半に最初の EDL 実証を中型クラス以上で実現することがその後の本格火星探査のために重要である。さらに、着陸技術が確立した先を見越した、微小重力天体からの離脱技術の確立も重要である。

(7) 地下アクセスと試料採取・分析技術

地下を掘削する技術として、はやぶさ 2 の SCI や MMX で開発中の円筒コアサンブラがあるが、さらに重力天体でも適用可能な手法として土木・建築で用いられるようなスクリーやドリルを月・惑星環境へ対応させるための改良、あるいは NASA Insight 火星着陸機に搭載されたモグラ型地下プローブや OKEANOS に向けて開発されたガス噴出型掘削装置など、新しい掘削技術のタイムリーな育成が大切である。

試料採取機構としては、小天体に適した弾丸射出やガス噴出による採取を進化させるとともに、重力天体に適したマニピュレータに各天体表面環境にカスタマイズしたエンドエフェクタを搭載した装置の新規開発が必要であろう。

その場分析技術としては、次世代小天体 サンプルリターンミッション で検討中の高い質量分解能を有する質量分析技術や将来の火星着陸探査や海洋天体探査を想定した生命活動兆候検出技術、有機分子のウェット化学分析技術などが重要である。各装置は当然、小型軽量かつ低消費電力であることが望ましい。外惑星領域の探査に向けては、内部海プルームなど微粒子の非破壊採取技術と、探査機内部で捕集試料を化学分析するための試料ハンドリング・試料準備技術などの確立も求められる。上記のような生命探査を軸としたアストロバイオ

ロジー研究を可能とする往復路の惑星保護技術（バイオバーデン技術、揮発成分の真空低温保存、汚染管理技術）の確立も必須である。これらについては、MMXでの実績や今後の火星探査ミッションの動向等を踏まえて、今後事項をたてて充実化を図る。

(8) 低コスト高頻度な宇宙輸送システム構築技術

イプシロンロケットの能力向上・低コスト化と、再使用型宇宙輸送システムの構築がキーとなる。前者は、カスタマイズ性など科学・探査用途のメリットを生かしつつ、キックモーターを開発・利用するなどして、火星圏に一定の質量の探査機を打ち上げられる能力が求められる。さらには短期間での複数機打ち上げ／ドッキングや上段の再使用化により多様な科学ニーズに応えるための輸送技術の獲得も重要である。後者は、超軽量構造や再使用熱防護材など機体の再使用化技術のみならず、再使用のシステム・運用・マネジメント技術等、総合的な技術獲得が必要である。また、再使用システムのさらなる高性能化のため、エアブリージングエンジンやデトネーションエンジンなどの革新的な推進システムの開発も重要である。さらに多様な宇宙科学ミッションを可能とする軌道間輸送ネットワークの構築には再使用型の軌道間輸送システムの開発・運用が必要である。

(9) 超小型探査機技術（観測機器の小型化を含む）

超小型衛星・探査機は、今後の宇宙科学において多様で萌芽的なミッションを短いサイクルで高頻度を実施するための有効なプラットフォームとして認識され、宇宙工学のみならず太陽系科学・天文分野においても多くのミッション構想がある。そこで宇宙工学としては、超小型衛星による本格的な深宇宙探査を目指して、より遠方領域の探査を実現するための広範囲なバス技術（電力確保、省電力技術、高効率通信、推進系、EDL、自動化自律化技術、MEMS・半導体・薄膜技術を活用したバスコンポの超小型化・超軽量化など）の獲得を目指す。超小型探査機技術の研究開発と実証にあたっては、地球周回での商業利用も含む多様な取り組みとの間で相乗効果を意識することが重要である。また、従来の探査機の小型軽量化、省エネ化（省電力化、耐低温化、高効率発電など）の方向性とも連携しながら成果を挙げていくことも求められる。編隊飛行 STP ミッションのための観測装置の小型化など、超小型衛星を科学観測に活用するための理学機器の革新も合わせて行う必要がある。また、これらのミッション要求を早期に確

実には実現していくためのシステム設計・検証手法の確立や製造を支えるサプライヤの維持拡大、効率的に運用を続けることを可能とする機上・地上の仕組みや体制づくりなども重要となる。

現在の超小型衛星・探査機プラットフォームの世界標準は CubeSat であり、多くのユーザを背景に、様々な搭載機器が CubeSat 用に開発販売されている。ただし CubeSat には衛星表面積の制約があり、より多くの電力やアンテナ開口面積を必要とする深宇宙探査を含むミッションでは不利である。この欠点を補うものとして直径 1 m 程度の薄型衛星 (DiskSat) のプラットフォームが近年提案されている。薄型衛星は、CubeSat が不得意な大電力、大開口面積が必要なミッションに適しており、さらにロケットに段積することで商用のメガコンステレーションや超低高度 (vLEO) 観測に採用されると思われる。科学衛星ミッションもこの薄型衛星の動向に無縁とは言えず、これらの動きとの相乗効果を強く意識していく必要がある。

(10) 高機能構造材料技術

高度な科学観測ミッションを支えるためには、基盤技術として高機能構造材料技術の不断の研究開発が重要である。特に、観測機器や衛星主構造側のインターフェースの線膨張係数に依存せずに、機械的なインタラクション (熱、熱応力、振動) の諸問題を解決できるインターフェース構造材料は渴望されている。赤外線望遠鏡などの極低温の検出器の運用を実現するためには、断熱性能のみならず、インターフェースにおける熱応力緩和が必要である。これらの技術は、赤外線以外の他波長の望遠鏡、検出器、スタートラッカーなどの高精度支持構造としての活用も期待される。

また、高精度材料に加え、さまざまな特性をもつ複合材料や積層材等の研究開発は新たなミッションの創成や画期的な機器の小型化につながる。これには、様々な炭素繊維強化プラスチック、ポリイミドフィルムや熱光学特性可変材料、制振合金、形状記憶合金なども含まれる。

バルク材としての物性に焦点を当てた研究開発だけでなく、近年応用物理の分野を中心に研究が盛んにおこなわれている「機械的メタマテリアル」と呼ばれる機械システムの導入も考えられる。「機械的メタマテリアル」の設計では、ユニットセルと呼ばれる基本要素の幾何的なデザインの工夫と、そのユニットセルの周期的な配置により、構造を構成する材料のみでは得ることができない特性の発現や性能の向上を図ることができる。例えば、構造中を伝搬する弾性波動を

制御するアプローチとして、周波数バンドギャップの生成により特定の周波数帯の波動伝搬を抑制する方法があり、機械構造に機能を付加する新しいアプローチとなりえる。

上記の高機能材料を用いた製造プロセスの研究、および幾何形状が複雑な機械的メタマテリアルの造形技術として、近年急速に発展を遂げている積層造形（または3Dプリンティング）の活用が今後さらに重要になってくる。特に金属積層造形装置（パウダーベッド方式やデポジション方式など）の航空宇宙分野での使用は拡大している。使用する材料の多様化や、部品点数削減による組み立てコストの低減など様々な効果が期待でき、従来製造技術に加え、こうした新しい製造技術を取り入れた設計・開発の重要性は高まると考えられる。

(11) 高耐環境性・新機能電子デバイス関連技術

宇宙科学ミッションの高度化にともない、耐環境性を有する高性能マイクロプロセッサ等の集積回路技術、およびMEMS多機能デバイスの継続的研究に加えて、ニューロモフィックプロセッシングやAI技術といった新しい情報処理技術にも目を配るべきである。深宇宙ミッションにおける通信および電力システムの電力効率の改善も重要で、次世代パワーデバイスの1つであるダイヤモンド半導体プロセスや、待機電力不要システム、エネルギーハーベスタ、薄膜太陽電池等があげられる。さらに、EDL&Rに関わるレーダ、光センサ技術、および画像処理およびそれらを使った航法・誘導・制御技術、ワンチップ通信機といったキー技術の研究は、日本の惑星探査の自在性を確保するために必須である。

極めて少量でありながら、高い信頼性が求められるこれら新規デバイスの調達には、次第に困難を増すことが予想される。安定した調達を可能とする仕組みや、COTS(Commercial Off-the-Shelf)品の活用の際の信頼性に関する考え方の整理および注意深い運用が必要である。逆に、新しい技術を取り入れる際、実証前に信頼性の保証要求を必要以上に厳しくすることは技術の発展を阻害することになるので、使用する部品の保証が完全でない場合でも採用でき、最悪の場合でも何等かの動作を可能とする総合的なシステム設計技術が重要である。

5. まとめと今後

宇宙工学は、工学技術によって宇宙科学ミッションを先導し、同時に探査機・輸送システム等の宇宙工学技術に革新をもたらすものである。理学観測の要求に基づくキー技術開発にとどまらず、工学発のシーズによって既存技術を変革させる工学実験ミッションを立ち上げていくことが重要である。太陽系探査としては、宇宙航行能力に加えて高効率発電、省電力技術、低温技術を向上させた次世代探査機で2030年代の遠方探査をリードするとともに、重力天体への着陸と表面探査の技術を獲得する。輸送システムについては、短中期的には再使用観測ロケットを構築して実利用することにより効率的な運用技術確立するとともに、長期的には完全再使用型の輸送システムによる高頻度宇宙輸送や軌道間輸送を実現する。また、宇宙科学がイプシロンロケットと共に歩むためには、最低限、火星領域へ探査機を輸送できるだけの能力増強が必須である。イプシロンロケットについては、コミュニティからの厳しい意見¹もあったが、イプシロンと共に宇宙科学が発展するシナリオこそが重要であろう。

超小型衛星は今後の宇宙科学において独創的なサイエンスを短いサイクルで実現するための有効なプラットフォームである。深宇宙探査での本格活用のために、超小型衛星用の推進系や、電力、通信、熱設計技術の革新が必要である。超小型衛星は、これまでに大学を主体として取り組まれてきたが、大学コミュニティ内では宇宙科学の長期ビジョンや重点を置くべき研究開発の方向性が十分に共有されず、また資金面・技術面でもJAXA等からの組織的支援がない状況で、ある種ゲリラの的に実施されてきた。深宇宙探査も含めて、宇宙科学の長期ビジョンに資する形で超小型衛星を本格的に活用するためには、ボトムアップの良さは残しつつも、従来の実施スタイルを脱却し、長期ビジョン実現の一翼を担う飛

¹ 現行のイプシロンの能力で達成可能なミッションの範囲を拡げるべく、探査機の小型軽量化に努めるとともにイプシロンの能力向上を各方面に働き掛けていく必要があるが、この状況の見通しの悪さによりコミュニティ全体が閉塞状況に陥ることは避けなければならない。例えば、打ち上げ能力の制約を超えるための方策として、イプシロン2機で打ち上げたペイロードを軌道上でドッキングするアイデアがあり得るが、このような方策を採る場合には、軌道間輸送に向けた技術開発など、将来の大目標に対する布石として位置づけを明確にしつつ実施することが重要である。すなわち、大量軌道間輸送の時代には、ペイロードを打ち上げ後に軌道上の拠点で組み立て、そこから深宇宙等の目的地に向かう運用が当たり前になると想定されるが、これに関わる技術の一部を世界に先駆けて実証することで、2機打ちの形態がより大きな意義を持ち得る。

翔機会として JAXA が積極的に資金面・技術面で支援し方向性を示すことが望まれる。ただしその際には、信頼性の考え方や開発のスタイルなど超小型衛星の良さ（低コスト・短期開発）をもたらしている「文化」を生かした形での推進を追求することが、本質的に重要である。

超小型衛星や再使用観測ロケットは、宇宙惑星居住科学を掲げる宇宙環境利用分野の新たな手段とも位置付けられる。月周回プラットフォームに加え、超小型衛星や再使用観測ロケットを活用することにより、計画から実施までを短い期間で実施できる体制を構築することが期待される。

(附表1) 宇宙工学コミュニティからの情報提供 2024/8/1 版
(short RFI response)

宇宙工学メンバRFI

ID	情報提供者に関する情報 (団体名、代表者所属 種別 氏名)		想定するカテゴリ	分野	ミッション名 or 技術名	ミッション or 技術の概要 (100文字程度)	ステータスおよびスケジュール(100文字程度)
1	東京都立大学 システムデザイン学部 航空宇宙システム工学科 佐原 宏典	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	研究レベル (Research Level)	推進系	低毒性推進系モジュール	低毒性推進剤を用いたマルチモードスラスタ(一液式・二液式)を組み込んだモジュール型推進系とこれを組み合わせた多用対応型の推進系	2025年頃宇宙実証を予定
2	東北大学 高橋和貴、JSOL 下原裕一郎	ミッション構想 (Mission Concept)	戦略的中型 (L-class Mission)	スペースデブリ除去	電気推進による非接触デブリ除去	高周波を用いたプラズマ推進によって、非接触でデブリ除去が可能であることを実証する。特に、非協力物体でありドラッキングが困難な1-10cm級のデブリ、および m級の大型デブリの除去に関するミッションを構想している。	スペースデブリ除去の原理実証は室内実験で検証し、国内外の企業と連携してスラスタの本格開発に向けたスキーム構築を検討している最中である。 また、このスラスタの宇宙実証を目的として、今後需要増加が見込まれる小型衛星搭載に向け、本格開発に向けたスキーム構築を検討中である。
3	大阪公立大学 工学研究科 小木曾望	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	研究レベル (Research Level)	科学衛星、通信衛星など通信に関する技術	高精度スマートアンテナミッション	数百GHzの電波天文観測や次世代の衛星通信に向けて、熱変形などによりアンテナ光学系に生じるmmオーダーの光路長誤差を適応的に補正し、μmオーダーの光学系精度を実現するためのスマート構造システムに関する技術	スマート構造によるアンテナ利得回復の地上実証および要素技術の大気球実験実証はすでに成功している。現在はシステムとしての実現を目指した軌道上実験を計画中。また、リスクを考慮した運用効率向上技術の研究を進めている。
4	早稲田大学 石村康生	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	研究レベル (Research Level)	科学衛星 (Scientific Satellite)	高精度インターフェース	観測機器のインターフェースにおける熱変形抑制、伝熱管理、微小振乱のアイソレーションに関する技術	個々のミッションでの知見はあるものの、構想士での技術の蓄積、研究が乏しい分野である。本年度から戦略予算を申請している。
5	日本航空宇宙学会／日本ロケット協会 将来宇宙輸送ビジョンTF委員長 内海政春 (室蘭工業大学・航空宇宙機システム研究センター)	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	研究レベル (Research Level)	輸送 (Transportation)	人類のフロンティア拡大を牽引するシームレスな宇宙輸送ネットワークの実現	本アイデアは、プラネタリーデフエンス、科学探査、宇宙資源探査に資する新たな小惑星探査の形を提供するものである。フライバイサイクラーという特殊な軌道上に構築された深宇宙コンステレーション (最低12機程度) を用いることで、毎月1個以上の頻度で小惑星フライバイを行うことができる。かつ即応型の探査が実現できる (プラネタリーデフエンスに資する)。また、多種多様な小惑星を月一の頻度で近接遭遇することで、惑星科学的な情報の継続的な蓄積および資源探査に適した小惑星の発見が可能となる。低コストな超小型宇宙機を複数機かつ継続的に開発することから、技術実証・人材育成を加速できるという特徴も備えている。	たいへん恐縮ですが、日本宇宙会議の未来の宇宙振興構想のホームページをご参照いただけますと幸いです。 https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/kohyo-25-t353-3.html グランドビジョン⑪ No.153
6	兵頭龍樹	ミッション構想 (Mission Concept)	公募型小型 (M-class Mission)	探査 (Probe)	深宇宙コンステレーション (ASTROMINE)	本アイデアは、プラネタリーデフエンス、科学探査、宇宙資源探査に資する新たな小惑星探査の形を提供するものである。フライバイサイクラーという特殊な軌道上に構築された深宇宙コンステレーション (最低12機程度) を用いることで、毎月1個以上の頻度で小惑星フライバイを行うことができる。かつ即応型の探査が実現できる (プラネタリーデフエンスに資する)。また、多種多様な小惑星を月一の頻度で近接遭遇することで、惑星科学的な情報の継続的な蓄積および資源探査に適した小惑星の発見が可能となる。低コストな超小型宇宙機を複数機かつ継続的に開発することから、技術実証・人材育成を加速できるという特徴も備えている。	Stooster 2023 のファイナリストに選ばれている (2023年11月現在)。チーム名はASTROMINEであり、提案者はJAXA兵頭龍樹およびJAXA尾崎直哉である。 参考URL: https://s-booster.jp/2023/finalroundhtml YOUTUBE: https://www.youtube.com/watch?v=BUVK9cyqWRY
7	将来深宇宙探査に向けた革新的超小型推進システム技術実証RG、月崎竜童	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	研究レベル (Research Level)	推進技術	イオン液体用いた電気推進 / 化学推進 / 統合推進	イオン液体を推進とする電気推進、化学推進の2種類のスラスタを研究している。電気はエレクトロスプレーズスライム数千秒、推力電圧比が10 ⁻⁵ 50mN/kW程度で、化学は低毒性一液式スラスタである。さらに電気と化学を統合した統合推進機も提唱している。	現時点ではTRL3程度であり、開発を請負うシステムメーカを調査している。2025年度にTRL5を目指している。
8	大山聖	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	研究レベル (Research Level)	探査 (Probe)	火星の飛行探査技術	火星大気中を飛翔する探査機 (火星航空機) に関する技術である。空力設計・航法誘導制御などの技術課題はあるものの、これが実現できれば高精度、広範囲な残留磁場観測や雲露観測、地下空洞探査などローバでは実現が難しい探査が可能になる。	戦略的開発研究費等により基礎技術の開発を進めており、2016年と2023年には大気球を利用した高精度飛行試験を実施している。2030年頃の火星着陸ミッションにおいて1kg級の小型航空機、2040年頃の火星着陸ミッションではより大型の火星航空機による探査を目指している。
9	OPENSワーキンググループ、共同代表: 矢野 創、船瀬龍 (JAXA/ISAS)	ミッション構想 (Mission Concept)	公募型小型 (M-class Mission)	探査 (Probe)	OPENS零号機 (超小型外惑星探査実証計画)	低価格・高精度に探査機が外惑星探査を行うOPENSプログラムの第一歩として、公募型小型エコクラスの範疇で、超小型宇宙機による外惑星探査の必須技術を実証する。2028年イプシロン打上げ、クルーミング観測と冬眠運用を経て、土星円環のフライバイ観測も目指す。	ステータス: 宇宙工学委員会下のワーキンググループ活動、およびエコクラス検討モデルケース検討活動を並行して実施中。2024年度小型公募にエコクラス・ファストトラックカテゴリで応募予定。
10	宇宙研 宇佐美尚人	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	公募型小型 (M-class Mission)	探査 (Probe)	ワンチップ無線機	RFフロントエンド+デジタルベースバンドの一部の機能を単一チップで実現する。これにより、通信機能のアクセモーションの超小型化、軽量化が可能になり、かつ部品点数が少なくなることにより長期信頼性の確保が容易となることが期待される。	受信・送信回路のキーとなる回路 (LNAを含む受信フロントエンド、外部のパワーアンプを駆動する能力のあるドライバアンプ等) を搭載したチップを試作し、現在検証を進めている (動作については一部確認済み)。
11	展開型柔軟エアロシェル 研究開発グループ・高橋裕介 (北海道大学)	ミッション構想 (Mission Concept)	小規模計画 (S-class Mission)	探査 (Probe)	展開型超小型衛星による抗力変動エアロキャプチャ実証	地球高層大気飛行時に展開型超小型衛星の軽量・大面積の柔軟エアロシェルを用いて空気減速を回り、必要な減速速度を獲得したタイミングでエアロシェルを投棄する抗力変動型エアロキャプチャ技術の軌道上実証を行う。	2016年度に展開型超小型衛星EGGIによる軌道実証実施済み。2023年度BEAKIによる軌道上エアロシェル分離実証、および2025年度以降に観測ロケットによる分離実証を予定している。これらのヘリテージを用いて2028年度以降に抗力変動型エアロキャプチャ実証を行う。
12	九州工業大学 宇宙システム工学科 北川幸樹	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	研究レベル (Research Level)	輸送 (Transportation)	ハイブリッドロケットエンジンの推力・O/Fフィードバック制御能力	本質的に非爆発性のハイブリッドロケットは、将来の有人輸送ロケットとして最適である。しかし、燃料流量をコントロールできず混合比 (O/F) が変化する現象が発生し、エネルギー効率が低下するという問題があり、実用化には至っていない。高い燃焼効率かつ最適なO/F値を保ちながら推力を制御する技術により解決を目指している。	現在は大学での基礎研究開発の段階。ステップを踏んで、技術実証を行いつつながら、小型観測ロケットや基幹ロケットの上段エンジンをハイブリッド推進系に置き換え、最終的には、月面拠点建設ミッションなどに利用できる有人輸送機を開発することを構想している。
13	JAXA 松本純、真生有理、森治	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	戦略的中型 (L-class Mission)	探査 (Probe)	サンプル採取・その場分析技術	小天体に探査機が接近し、サンプルを採取する。そのサンプルは探査機内部で分配され、質量分析や光学計測など、多様なその場分析を実現する。	OKEANOS及び次世代小天体サンプルリターン検討 (※) において、検討が進んでいる。 (※) においては、その場分析技術として、特に質量分析に特化して検討を行っている。 検討スケジュールは (※) に従う。
15	月崎 竜童	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	研究レベル (Research Level)	推進技術	マイクロ波イオンエンジン Hlisp	従来の電圧1.5kVの比推力3000sec付近から6kVで6000sec程度まで高めた高比推力マイクロ波イオンエンジン。推力は20-25mN、電圧は1kW程度。従来は400W 10mN Isp3000secでの仕様。	HlispモデルはTRL5程度。特に電源の開発が必要。寿命試験等は、スラスタ設計は従来の宇宙実証を最大限活用する予定。
16	宇宙科学研究所、西山和孝	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	公募型小型 (M-class Mission)	探査 (Probe)	μ10イオンエンジンシステムの低電力化・低コスト化	「小型ソーラー電力セイルによる外惑星領域探査」等の実現のため、従来の380Wから200W以下の低電力向けにマイクロ波放電型イオンエンジンμ10の作動条件を最適化するほか1台構成用シナバルを開発する。	2023年度から超小型ソーラー電力セイルRGIにてインハウスの概念検討に着手した。DESTINY+向け試作スラスタ最大380W、1.2mN、3000秒) で164W、3.1mN、2400秒相当の動作を実証した。
17	佐藤哲也	ミッション構想 (Mission Concept)	研究レベル (Research Level)	輸送 (Transportation)	観測ロケットを用いた極超音速統合実験 (HIMICO)	HIMICOは、アカデミア主導により観測ロケットS-520を用いて、航空宇宙輸送系のゲームチェンジャーとなる極超音速観測のためのロケット技術の確立、月面における有望な科学テーマ (月面天文台、月震計ネットワーク、サンプルリターン) の実現のためのプリカーサとして、質量50kgクラスの月面探査ローバを実現する。	現在、HIMICOのS-520-35号機による実証が認められ、2025年度の飛行実験に向けて準備を進めている。要素試験はほぼ完了し、機体構造の製作を行っている。事前に地上設備を用いたMach 5推進試験、S-520による姿勢制御系の飛行実証試験を実施する予定である (いずれもFY2024)。
18	東京大学 松下 得典	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	公募型小型 (M-class Mission)	探査 (Probe)	薄膜太陽電池バドル、ブーム型高機能機	ブームの伸張により、薄膜太陽電池セルを貼り付けた膜を展開することで超軽量の薄膜太陽電池バドル (200W/kg以上) を構成する。薄膜太陽電池以外にもアンテナ、干渉計、反射シート等のデバイスを貼り付けることでブーム型高機能機となる。	薄膜太陽電池バドル: 2020-2022年度において技術のFLIにてBBM相当を開発した。 現在、OPENS0に搭載することを前提にC/F調整中。 2024年度にCEM相当を開発する方針。 ブーム型多機能機: 2022年度にHELIOS (革新3号機搭載) を打ち上げたが、ロケット打ち上げに失敗した。 現在、HELIOS-R (革新4号機搭載) のFMを開発中。
19	宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所	ミッション構想 (Mission Concept)	小規模計画 (S-class Mission)	探査 (Probe)	月面探査ローバ	将来の火星表面無人探査、アルテミス計画や日本独自の月着陸機のためのロボット技術の確立、月面における有望な科学テーマ (月面天文台、月震計ネットワーク、サンプルリターン) の実現のためのプリカーサとして、質量50kgクラスの月面探査ローバを実現する。	現在は計画段階にあるが、2020年代に打ち上げを目指して進めている。ロケットを使っての単独ミッションではなく、日本あるいは諸外国の月面着陸ミッションに対してパイロットとして搭載することを考えている。現在のところ、この観測ミッションは未定である。
20	宇宙科学研究所 森 治	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	戦略的中型 (L-class Mission)	探査 (Probe)	月面着陸機用太陽電池タワー	極域での越冬を実現するために、着陸機からブームを伸展し、太陽電池膜を高(上げる)ことで太陽電池タワーを構成する。太陽を追追えるための位相調整機能、着陸点の傾斜に対応するための水平調整機能も具備する。	現在、LEAD1号機に搭載することを想定して、部分・スクリーンモデルを開発中。 2025年度までに実物大モデルを開発する方針。
21	宇宙科学研究所 森 治	ミッション構想 (Mission Concept)	公募型小型 (M-class Mission)	探査 (Probe)	小型ソーラー電力セイル探査機による外惑星領域小天体ランデブー・着陸	OPENS0の技術を継承し、外惑星領域小天体へのランデブー・着陸を目指す。薄膜太陽電池バドルで外惑星領域でも十分な電力を確保し、イオンエンジンを駆動することで外惑星領域小天体にランデブー・着陸する。	現在、理工学のキーパーソンとミッション検討およびシステム検討を実施中。 2024年度から新たにRG活動を行い、OPENS0の後継機としてミッション提案する方針。

	JAXAホールスラスト研究開発チーム 船木一幸	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	戦略的中型 (L-class Mission)	探査 (Probe)	ホールスラスト技術・オール電化衛星技術の深宇宙ミッション適用	はやぶさ等の小型探査機に利用が限定されていたイオンエンジン技術を開発させ、数トン級の探査機ならびに軌道間輸送機等で高い機動変換能力と高いペイロード率(すなわち低コスト)を実現するスラスト・バスターを提供する。	2025年に国産6kW級ホールスラストとオール電化衛星技術をETS-9にて実証。実証に優れたオール電化バスは、バリエーションをえることでいから軌道の探査・輸送ミッションへも貢献可能であり、関連研究をall-JAXAで実施中。
23	九州大学 高尾勇輝	ミッション構想 (Mission Concept)	戦略的中型 (L-class Mission)	探査 (Probe)	小型ソーラー電力セイル探査機と深宇宙OTVによる外惑星領域小天体サンプルリターン	次世代小天体SRの技術を継承し、外惑星領域小天体からのサンプルリターンを目指す。深宇宙OTVが外惑星領域小天体にランデブーした後、子機である小型ソーラー電力セイル探査機が着陸。サンプルリターン・イオンエンジンを利用した地球帰還を行う。	現在、理工学のキーパーソンとミッション検討およびシステム検討を実施中。2024年度から新たにRG活動を行い、次世代小天体SRの後継機としてミッション提案する方針。
24	宇宙科学研究所 宇宙機応用工学研究室 曾根理嗣	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	研究レベル (Research Level)	探査 (Probe)	半永久燃焼／電源	月面での長期日照期間や深宇宙探査を実現するためには、太陽電池発電による電気に依存しない熱と電力の確保は必須となる。このために、ラジオアイソトープを使用した熱源と、熱電変換による発電技術を開発する。	10年後以内に200W級熱／1W級電力確保の技術習得を図りつつ、ラジオアイソトープの大規模確保の課題抽出と解決を進め、20年後には200W級熱／20W級以上の熱電出力を可能とし、日本の月・惑星探査の自在性を確保する。
25	深宇宙軌道間輸送・ランデブー・ドッキングFL活動 (宇宙研・津田雄一)	ミッション構想 (Mission Concept)	戦略的中型 (L-class Mission)	探査、宇宙輸送、超小型衛星技術の融合	深宇宙軌道間輸送機	金星～木星圏の広範な目標天体への輸送を共通的に担う深宇宙巡航輸送機を実現する。目標天体到達後の探査活動の挑戦性により注力する手段として巡航部の共通化を図ることで、探査のコストやミッション設計の特長みに構造的な変化をもたらす。	現在、フロントローディング活動の下で研究開発を実施中である。現状、次世代小天体サンプルリターン(2030年代前半の戦略的中型)の巡航母機および火星着陸探査の輸送・周回機をターゲットとして検討を進めている。
26	中重力天体着陸RG (宇宙研・津田雄一)	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	研究レベル (Research Level)	探査 (Probe)	タッチアンドゴーサンプリングブローブ (高機動天体着陸ブローブ)	金星～木星圏の広範な目標天体への輸送を共通的に担う深宇宙巡航輸送機を実現する。目標天体到達後の探査活動の挑戦性により注力する手段として巡航部の共通化を図ることで、探査のコストやミッション設計の特長みに構造的な変化をもたらす。	現在、科研費及び工学委員会戦略的開発経費により大学及びISAS(探査系・輸送系)/研開20横断で研究開発を実施中。2030年代後半にメインベルト、水星星の表面へのアクセス手段を提供することを目指している。
27	次世代小天体サンプルリターンWG 佐伯孝尚 (ISAS)	ミッション構想 (Mission Concept)	戦略的中型 (L-class Mission)	探査 (Probe)	次世代小天体サンプルリターンミッション	はやぶさ2の技術等を継承し、遠方飛行する始原天体(慧星等)からのサンプルリターンを目指す。往還機と着陸機の複数探査機による自在な探査を行う。また、往還機は他の太陽系ミッションとの共通化を目指す。	現在、工学委員会および理学委員会の下で、2030年代前半の戦略的中型での実現を目指してWG活動を実施中。太陽系および工学GIからの推薦を受け、時限WGとなっている。
28	深宇宙固体キックモーターRG (宇宙研・徳留真一郎)	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	研究レベル (Research Level)	輸送 (Transportation)	深宇宙固体キックモーター	ISASが保有する固体モーター技術を深宇宙で活用することを考える。従来の深宇宙探査機の液体推進系を固体モーターに置き換えることにより、安価・高信頼・低電力で木星以遠の惑星・水星星へ直接軌道投入にできる手段を提供することを目指す。	現在、工学委員会戦略的開発経費により大学及びISAS(探査系・輸送系)/研開20横断で研究開発を実施中。2030年代後半に木星・土星および水星星周回軌道へのアクセス手段を提供することを目指している。
29	日大、東工大、斎藤宏文	ミッション構想 (Mission Concept)	小規模計画 (S-class Mission)	地球監視観測	薄型SAR衛星メカゴンステレーションによる超低高度からの高頻度高分解地球観測	提案者らは、展開型平面スロットアレーアンテナを利用した小型SAR衛星の開発・軌道上実証を行ってきた。その発展形である構体を薄型にしたSAR DiskSatは、段幅による多数機打ち上げ、CubeSat用電気推進より350km程度の超低高度での定常的な高分解SAR観測が可能である。	2023-2025にはNEDO資金を獲得済であり広帯域SARアンテナ、薄型機体モデルを開発する。その後、競争的資金を獲得して2027年頃(小型衛星機)を打ち上げる計画である。薄型衛星DiskSatバスについては米国Aerospace Corporationと協業を行っている。
30	宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所大規模観測	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	研究レベル (Research Level)	探査 (Probe)	テラメカニクス(天体表層シミュレータ)	地球より低重力の天体表層の機械特性を考慮した相互作用ダイナミクスを予測する技術。着陸機、ローバ、マニピュレータ、掘削ドリル等、天体表層に接触する機械の設計、検証評価に用いる計算方法や経験学習的に獲得したモデルが該当する。	より複雑な形状と表層との接触解析、レグリス粒子のふるまい予測、1G試験での検証方法など開発課題が多々あり打上事例も少ない。Hourglass, LEV, MMX等への適用機種との答え合わせを経て、将来ミッションの設計基準を定めるなど、今後の10年間に行う。
31	宇宙機応用工学研究室 曾根理嗣	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	研究レベル (Research Level)	探査 (Probe)	再生型燃料電池の実用化	月面での長期滞在、とくに月面天文台の維持においては、長いランデブーでの充放電を繰り返すことができる再生型燃料電池(RFC)に実用化が必要になる。特に、単独のセル/スタックでリパシブルに運転が可能なRFCは、二次電池代替として有望である。	燃料電池を水電解と組み合わせて二次電池ライクに使用することはかねてから検討されているが、必要とするミッションの大型化や長期化に対しては、質量が高となる課題がある。これに対して、質量軽減が可能な単独のセル/スタックを電解と発電で共用する技術の習得を目指す。
32	OPENSワーキンググループ、共同代表: 矢野 創、船瀬誠 (JAXA/ISAS)	ミッション構想 (Mission Concept)	公募型小型 (M-class Mission)	探査 (Probe)	OPENS1号機(超小型外惑星ランデブー探査計画)	OPENSプログラムの公募機以降の展開の一つとして、2030年代前半の公募型小型遠征クラスの単体打上げにて、零号機で工学実証した探査機・運用技術に電気推進エンジンを追加し、木星・土星・土星逆行衛星、クワンロス天体等、カイパーベルト起源の可能性が高い氷路の小惑星にランデブーし、世界初の全球観測を実現する。	OPENS WGにおいて、今後四半世紀程度のOPENSプログラム展開の可能性の一つとして検討中。OKEANOS開発チームの流れを組むHELIOS-Rチームと技術検討を連携。OPENS零号機が採択された段階で、本ミッション提案を目指すWGの設立を想定。
33	N/A(宇宙科学研究所 宇宙飛翔工学研究室、宇宙科学研究所 宇宙飛翔工学研究室 徳留真一郎)	ミッション構想 (Mission Concept)	研究レベル (Research Level)	輸送 (Transportation)	競争力ある宇宙往還システム関連技術の獲得に向けた極超音速飛行実験機ミッション	将来の競争力ある宇宙往還システムの実現に向けたゲートウェイ・技術として、空気を吸込み式推進、再使用型防護シールド、極超音速飛行制御系を上げ、それらの技術を獲得するための飛行実験機システムを構築し、飛行実証を行う。	JAXAIにおける四半世紀を超える関連の要素技術研究の成果に基づき、飛行実験機システムを提案する段階である。今後数ある年度にかけ概念検討を行い、FY2025から4年5年5年の開発期間を経て機体システムを構築してミッションを達成する。その成果を観測ロケットの高度化に応用することで、将来の科学ミッションに貢献可能である。
34	OPENSワーキンググループ、共同代表: 矢野 創、船瀬誠 (JAXA/ISAS)	ミッション構想 (Mission Concept)	小規模計画 (S-class Mission)	探査 (Probe)	OPENS2号機(海外旗艦クラス外惑星探査機搭載式超小型探査計画)	OPENSプログラムの零号機以降の展開の一つとして、戦略的国際協力の枠組みにて、2030-40年代のNASA、ESAの旗艦クラス外惑星探査機に搭載・輸送された超小型探査機による科学観測を行う。天王星圏、土星圏へのランデブーの可能性があり、衛星やプリューム等へのフライバイ観測等、観測のリスクとリソースを一部代替することでミッション成功率の向上と科学成果の最大化に貢献する。	OPENS WGにおいて、今後四半世紀程度のOPENSプログラム展開の可能性の一つとして検討中。欧米の旗艦ミッションの検討ワークショップに参加したり、現地研究者との車の根レベルでの協力可能性を模索中。先方のミッション提案時期に左右されるものの、2028年のOPENS零号機の運用開始以降には、国際協力を正式に交渉できる条件が整うと想定。
35	OPENSワーキンググループ、共同代表: 矢野 創、船瀬誠 (JAXA/ISAS)	ミッション構想 (Mission Concept)	戦略的中型 (L-class Mission)	探査 (Probe)	OPENS3号機(OTV搭載式超小型外惑星探査計画)	OPENSプログラムの零号・1号機以降の展開の一つとして、戦略的中型の単体打上げにて、OTVシステムの宇宙実証(2030年代半ば以降)に、世界初の外惑星領域サンプルリターン・物質分析を実現する。往路はOTV観戦に搭載・輸送・軌道投入され、復路は子機が電気推進エンジン等を駆使して独自航行し、海洋天体プリュームや逆行衛星等の採取試料を持って地球帰還する。	OPENS WGにおいて、今後四半世紀程度のOPENSプログラム展開の可能性の一つとして検討中。OTV開発実証を目指す次期天体SR WG、OKEANOS開発チームの流れを組むHELIOS-Rチームとも技術検討を連携。2030年代のOPENS1号機の打上げ・運用後に、本ミッション提案を目指すWGの設立を想定。
36	超小型ソーラー電力セイルの開発研究RG(東京工業大学 中条 俊大)	ミッション構想 (Mission Concept)	小規模計画 (S-class Mission)	探査 (Probe)	超小型ソーラー電力セイルの航行技術実証ミッション	IKAROS、OKEANOSで培ったソーラー電力セイルの知見を開発させ、太陽輻射圧による光子加速と電気推進を組み合わせたハイブリッド推進による、「狙った場所に行く」航法誘導制御技術を実証する。特に、セイル展開前にジンバル機構を備えることで可能になる、推進剤消費量を極限まで低減させる姿勢・軌道統合制御を実現する。	これまでRGとしてミッション検討とキー技術の研究開発を行ってきた(同系列のWGでは2022年度に公募型小型計画にも応募している)。ミッション検討では、月近傍から惑星間まで幅広い打ち上げ条件を想定し、工学的・理学的意義が大きなミッション案を創出している。またキー技術としては、これまで特に姿勢・軌道統合制御系やセイル構造系の地上試験モデルを製作している。さらに地球周回軌道における予備的な技術実証を担い、JAXA-SMASHの超小型衛星ミッション公募#2に応募、フィージビリティ・スタディに採択されている。今後はこれに向けた研究開発と並行し、深宇宙におけるミッション検討を継続しつつ、新たな飛翔機会を見出す。
37	再使用高頻度宇宙輸送システム研究チーム 代表 宇宙科学研究所 野 中聡	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	研究レベル (Research Level)	輸送 (Transportation)	再使用ロケットの高頻度運用技術	将来の軌道間輸送ネットワークの構築には地上から低軌道への大量高頻度物資輸送がベースとなるため、ロケットを高頻度で繰り返し再使用するための技術を戦略的に獲得しなければならない。特に、「繰り返し運用」、「故障許容」、「帰還飛行」は高頻度再使用に関するキー技術であり、実験機等による技術実証を見据えた要素技術研究に取り組んでいる。	戦略的開発研究としてFY2022まで高頻度再使用に関する重要技術課題に取り組んできた。本研究で得られた成果は研開部門主体で取り組まれているRV-XIに適用され、FY2024に予定されている飛行試験に向けて準備が進められている。これまでの研究成果は大型エアバスシステムの再使用FTBI(FY2024飛行実験予定)に適用するとともに、今後の民間を中心とした新しい輸送システムの開発に貢献する。
38	宇宙科学研究所 後藤 健	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	公募型小型 (M-class Mission)	科学衛星 (Scientific Satellite)	能動制御宇宙望遠鏡システム	技術ロードマップ(太陽系・宇宙物理関係)の実現に必須なキー技術として、口径60 cmの能動制御宇宙望遠鏡を開発する。重要な技術要素は、宇宙仕様の高精密小型アクチュエータと鏡面のある形状制御のためのアクチュエータ配置・制御方法である。	2022年度から技術のフロントローディング活動のなかで宇宙望遠鏡の能動制御機構のシステム概念検討を開始した。2024年度から3年間で宇宙望遠鏡の能動制御機構の「高精度DBM」開発を行う。2027年度には赤外線・サブミリ波対応(極低温対応)の検討を実施する計画である。
39	JAXA・宇宙科学研究所 安田博実	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	研究レベル (Research Level)	宇宙機器製造技術	金属3次元造形を活用した宇宙機器の高自由度設計・製造技術の開拓	デポジション方式に注目したマルチマテリアル機器の製造技術を開拓する。同方式では粉末を直接ワークに吹き付けるため、複雑材料を過材通しに配置することが可能で、機構のかつ材料的機能性を自在に機器に付与できる。これにより宇宙機器の設計自由度を飛躍的に向上させることを目指す。初めは超小型探査機の機器の小型・スマート化を対象とする。	外部資金等による基礎研究段階であるが、デポジション方式の優位性を活用した2種金属粉末体によるマルチマテリアル造形を達成し、日本国際工作機械見本市に展示するとともに、超導・形状記憶効果等に応用した機械装置が不要な展開/スループート・システム等の材料開発を実施した。2020年代中に構造、材料の最適化を図り、可能な限り早期に実機機の設計・製造を目指す。

41	JAXA宇宙科学研究所 宇宙飛翔工学研究系・丸祐介	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	研究レベル (Research Level)	輸送 (Transportation)	推進供給電動ポンプ技術	推進供給用の電動ポンプの実現に向け、技術課題を克服するための研究を行う。技術課題は、適用対象に応じた電動ポンプ仕様の設定や、電動モーターの熱マネジメント、インバータ等電氣的補機のシステム設計と軽量化、などがある。	工学委員会の戦略的基礎開発研究費に申請中(2023年度期初は不採択)。大学との連携により、基盤的な技術の研究を進めている。また、JAXA他部門と連携して、実開発を行える程度の予算獲得に向け、情報収集や戦略の検討を行っている。
42	深宇宙軌道間輸送・ランデブドッキングFL活動 (宇宙研・坂東信尚)	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	戦略的中型 (L-class Mission)	探査 (Probe)	深宇宙ランデブドッキング	本技術は、深宇宙探査の自在性を拡大するため、火星圏で遠でのランデブドッキングを可能とする低リソース・高自律の誘導航法、ドッキング機構の開発を行う。直近の適用先としては、次世代小天体サンプルリターンを考えている。	現在、フロントローディング活動の下で研究開発を実施中である。次世代小天体サンプルリターン(2030年代前半の戦略的中型)の巡航母機と着陸機の再結合実現をターゲットに検討を進めている。
43	宇宙科学研究所 後藤健	ミッション構想 (Mission Concept)	戦略的中型 (L-class Mission)	探査 (Probe)	超小型着陸機による火星の多地点観測ネットワークの構築	超小型(数10kg)で火星表面に到達し、火星地表で科学観測が実行できる超小型火星着陸機システムを開発する。地震計、気象計などの科学観測機器を搭載した着陸機による多地点観測ネットワークを構築し、火星の火山およびマグマの活動を調査する。	2023年度より技術のフロントローディング活動の中で新技術の展開型柔軟エアロシェルを適用したハードランディング型の超小型着陸機システムを開発している。火星に対応する耐低温技術、耐衝撃技術、電源技術、通信技術、惑星保護技術がクリティカルな工学技術となる。2027年度までにEM相当の高級BBMを完成させる計画である。
44	JAXA宇宙科学研究所 宇宙飛翔工学研究系・丸祐介	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	研究レベル (Research Level)	輸送 (Transportation)	競争力ある宇宙往還システムの実現に必要な極超音速飛行技術	将来の競争力ある宇宙往還システムの実現に向けたゲームチェンジャーとして、極超音速飛行に関する技術。特に、空気吸込み式推進系(エアターボ、スクラムジェット、RBCC、など)、再使用型熱防護系(再使用可能な耐熱材料、熱制御系)、極超音速飛行制御系の各技術を獲得する。	アカデミア及びJAXAにおける30年(1990年代以降)を超える期間に獲得された要素研究成果を、飛行実験によって実証し、技術を具体的に獲得する段階にある。これまでの地上実験手法、数値解析手法に、飛行実験手法を加えた三位一体の研究手法を、今後5年程度のうちに構築し、極超音速飛行技術を獲得する計画である。
45	宇宙探査イノベーション ハブ 杉原 アフマッド清志	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	戦略的中型 (L-class Mission)	探査 (Probe)	RF相対航法センサ	小天体着陸探査、その他衛星測位システム圏外における遠距離相対航法を実現するセンサ。	次世代小天体サンプルリターンWGI内で概念検討及びBBM試作・評価を実施中。2024年度からフライトに適したフォームファクタで検証する方針。
46	名古屋大学 笠原次郎	将来の科学ミッションに資する技術 (Technology contributing to future scientific missions)	小規模計画 (S-class Mission)	輸送 (Transportation)	デトネーションエンジン技術	デトネーションエンジンを用いると、ロケットエンジンの小型化、高効率化、他のコンポーネントとの統合化などが可能となる。イプシロンロケットのPBS、軌道間輸送機用エンジン、月・惑星探査機用ランダーエンジン、ロケット初段、2段などに適用可能である。	宇宙工学委員会のワーキンググループ「デトネーションキックモーター観測ロケット軌道投入実証」にて、活動中である。2024年度には、観測ロケットS-520-34号機を用いた液体推進剤デトネーションエンジンの宇宙空間作動実証を行う。また、H3ロケットの2段用リテンションスラストなどでの軌道上実証ミッションを計画している。
47	展開型柔軟エアロシェル 研究開発グループ・山田和彦 (JAXA)	ミッション構想 (Mission Concept)	小規模計画 (S-class Mission)	技術実証ミッション	展開型エアロセルの大気圏突入実証試験	次世代の大気圏突入技術として期待が高まっている展開型エアロシェル技術に関して、地球低軌道からの大気圏突入実証試験を行う。	展開型エアロシェル技術は、2000年頃から研究開発が進められており、各種フライト試験を経て技術は成熟し、実応用を検討するフェーズにある。2021年には、観測ロケット実験でのデータ回収システムとしての実用された。本試験は、その技術を火星着陸探査、及び、地球低軌道からの帰還・回収システムとして応用するための最終実証試験と位置付けられる。2024年から実証機の開発、2027年頃の実施を目指す。

情報提供者に関する情報 (団体名、代表者所属氏名)							いつ頃の実施を考えているか(スケジュール感)(100文字程度)	
ID	機関	想定するミッションの規模	分野	ミッション名 or 技術名	ミッション or 技術の概要(100文字程度)	いつ頃の実施を考えているか(スケジュール感)(100文字程度)		
1	Astromine Inc.、尾崎 直哉	宇宙科学・探査ミッション構想 (Space Science and Exploration Mission Concept)	その他、ビギナーバック等 (Other)	探査 (Probe)	深宇宙コンステレーションのよる小惑星マルチフライバィおよび即応型フライバィバィ探査	Astromine Inc.は、小惑星フライバィサイクリャー軌道上に複数の超小型探査機を配置し、毎月頻度での小惑星フライバィ探査を実現する深宇宙コンステレーション構想を計画しています。本深宇宙コンステレーションは、地球スイングバィのタイミングで即応した大きな方向転換が可能であるため、突発的に見つけた危険小惑星や恒星間天体等を対象に、即応型フライバィバィ探査を実現することが可能です。高精度な深宇宙探査機を製造して、深宇宙探査技術を加速的成長させることができ、プラネタリーディフェンスや小惑星資源探査にも資するミッションを実現します。	2024年度中にAstromine Inc.を設立し、民間資金や基金等を活用しながら、2026-2028年頃の軌道上天実証を目指す。2029年には小惑星Apophisが地球に接近するため、深宇宙コンステレーションを活用したAophis探査も目指す。	
2	株式会社テイト微研 代表取締役 首藤隆利	将来の宇宙科学・探査ミッションに資する基礎技術 (Fundamental technologies contributing to future space science and exploration missions)	その他、ビギナーバック等 (Other)	月面基地における生活環境	宇宙飛行士の排泄処理	ゲートウェイ、月面探査車にて発生する宇宙飛行士の排泄を処理。保存するために化学分解性に消費分解用の生物製剤を使用し、生分解性であるガスが発生しないこと、袋が膨らむことが無い状態で保存する。これを月面基地にて回収して簡易堆肥化処理機にて堆肥化する。将来に向けては月面基地に於いて堆肥化プラントを目指す。	現在、JAXAイノベーションハブへRFIとして提出中。RFPの要請があれば直ちに基礎試験として提供受からの悪臭ガス、無臭ガスが無いことへの研究を大学へ委託研究開始する。その後は簡易堆肥化処理機にて約2週間で完熟堆肥にする実験を行います。概ね2年間以内に研究成果を出したい。	
3	藤田昂志	宇宙科学・探査ミッション構想 (Space Science and Exploration Mission Concept)	イプシロンロケットで打ち上げる規模 (公募型小型クラス) (M-class Mission)	探査 (Probe)	航空機による惑星探査	現在、JAXAと大学の研究者の共同として火星探査航空機が検討されている。その発展形として、金星やタイタンなど他惑星の航空機による探査を行う。航空機により、従来の探査衛星や探査車では得られない新たな視点からの観測データを提供する。	2060年頃	
4	山崎 進	将来の宇宙科学・探査ミッションに資する基礎技術 (Fundamental technologies contributing to future space science and exploration missions)	イプシロンロケットで打ち上げる規模 (公募型小型クラス) (M-class Mission)	衛星 (工学) (Space Engineering Satellite)	衛星向け分散AIエッジのコンピュータとソフトウェアに関する技術	近い将来に想定される、衛星間通信を前提にして、分散コンピューティングによりMLM等のAIエッジ処理をオンボードで行いたいニーズに応える技術シーズを有している。またミッション途中でのFPGAロジックとファームウェア、アプリケーションソフトウェアのアップデートに対応できる技術シーズも有している。特許出願中。	2026年に月面探査車YAKU1に搭載して実証するスケジュールを進めている。スタートアップ企業の創業も行う。	
5	鳥取大学工学部電気情報系学科 西村 亮	将来の宇宙科学・探査ミッションに資する基礎技術 (Fundamental technologies contributing to future space science and exploration missions)	H3ロケットで打ち上げる規模 (戦略的中型クラス) (L-class Mission)	探査 (Probe)	月および惑星探査機に搭載する太陽電池パネルに垂直な太陽電池の電界カーテンによる除去	太陽電池の受光面上に透明電極材料等で作した電極を埋め込み、それに多相交流を印加することで進行電界を作り、帯電したレジリスを太陽電池の外に輸送して除去する。電界カーテンは理論的に電力を消費せず、可動部分が無いため、省エネで信頼性の高いレジリス除去が可能です。	現在、真空装置内で月レジリスを模擬した粒子を使い、除去実験を行っている。真空において発生する異常放電の克服および実用サイズの「電界カーテン付き太陽電池」が製作でき次第実用化できると思われる。	
6	高尾勇輝 (九州大学)	宇宙科学・探査ミッション構想 (Space Science and Exploration Mission Concept)	イプシロンロケットで打ち上げる規模 (公募型小型クラス) (M-class Mission)	探査 (Probe)	イオンエンジンとソーラー電セルを用いた外惑星領域ランデブー探査 (OPENS1)	2024年に公募型小型計画へ提案予定のOPENSは、化学推進を用いた土星フライバィバィを行う計画であり、シリーズ0号機に相当する。このOPENS1にイオンエンジンを搭載し、メインバィルへ土星圏の小天体へのランデブーを可能にするOPENS1計画を新たに提案する。	2024年度にOPENS1 RGを立ち上げて概念検討を行い、2025年度にWGを設置する。その後、OPENSが打上を想定している2020年代後半に、OPENS1が公募型小型計画へ提案し、2030年代前半の打上を目指す。	
7	将来深宇宙探査に向けた革新的超小型推進システム技術実証RG、月崎竜竜	将来の宇宙科学・探査ミッションに資する基礎技術 (Fundamental technologies contributing to future space science and exploration missions)	その他、ビギナーバック等 (Other)	衛星 (工学) (Space Engineering Satellite)	イオン液体用いた電氣推進/化学推進/統合推進	イオン液体を推進とる電氣推進・化学推進の2種類のスラスタを研究している。電氣はマイクロスプレースタとして1μsp数千ナ、推力電力比が10 ⁻⁵ 0mW/kW程度で、化学は低毒性一液式スラスタである。さらに電氣と化学を統合した統合推進機も提唱している。	現時点ではTRL程度であり、開発を誘負システムメーカーを調査している。2025年度にTRL5を目指している。	
8	将来深宇宙探査に向けた革新的超小型推進システム技術実証 RG内化学推進G 日本大学 松本幸太郎	将来の宇宙科学・探査ミッションに資する基礎技術 (Fundamental technologies contributing to future space science and exploration missions)	観測ロケット (Sounding Rocket)	輸送 (Transport)	高エネルギーイオン液体を推進剤とした化学スラスタの宇宙実証	国内外の新規候補と比較して高推進性能な低毒性推進剤である高エネルギーイオン液体(ELs)推進剤とした化学スラスタの宇宙実証を計画している。本スラスタは取扱いが容易かつ推力力比が可能であるため、観測ロケットSJに適用することで、観測ロケットのコスト低減及びミッション拡充に寄与することが期待できる。	本計画は既に観測ロケット実験公募に提案済みであり、実験候補に選出されている。観測ロケット打上げ計画に依存するか、2025〜27年度での実証を見込んでいる。また、将来計画として、2028年度以降の観測ロケットRCS実証実験を目指している。	
9	宮田喜久子	将来の宇宙科学・探査ミッションに資する基礎技術 (Fundamental technologies contributing to future space science and exploration missions)	その他、ビギナーバック等 (Other)	衛星および探査	ジンバルによる、観測機、カメラなどの高精度位置決め制御	惑星探査等の需要の広がりなどから、ジンバルによる高精度位置決め制御の需要は増加している。各種リソース制約、探査対象の条件などから、従来より高精度かつ温度環境変動にロバストかつ小型な制御システムが求められてきている。民生分野で培ってきた高精度サーボ技術を用いた制御システムに適用することによりその要求に対応する。	今後の着陸機を含む科学衛星全般で需要がある対象を適用の視野に入れる。	
10	宮田喜久子	将来の宇宙科学・探査ミッションに資する基礎技術 (Fundamental technologies contributing to future space science and exploration missions)	その他、ビギナーバック等 (Other)	衛星 (工学) (Space Engineering Satellite)	蓄熱材を用いた温度変化緩和とシステム	蓄熱材を対象物に適切に実装することにより温度変化を緩和するシステムを構築する。	蓄熱材を用いたパッシブシステムを製作。超小型人工衛星に実装することによる軌道上デモンストラーションを2024年度以降に実施予定 (現在打ち上げ時期調整中)	
11	高尾勇輝 (九州大学)	宇宙科学・探査ミッション構想 (Space Science and Exploration Mission Concept)	H3ロケットで打ち上げる規模 (公募型小型クラス) (L-class Mission)	探査 (Probe)	DSOTVと超小型ソーラーセイルを用いた小天体コンステレーション探査	深宇宙軌道間送達機(DSOTV)で多数の超小型ソーラーセイル(3U)を構成し、小天体上空でコンステレーションを形成する。推進剤を消費せず多様な軌道を周回し、高解像度の全球観測やレーダーターゲットモグワフ観測を行う、ばら撒き型の新しい探査方式を提案する。	ソーラーセイルの収納・展開機構および軌道制御用アクチュエータを統合したCubeSat用モジュールを開発し、地上試験まで完了している。今後、まずは革新的な超小型ソーラーセイル単体の軌道上技術実証を目指し、続いてDSOTVと連携したミッション検討を進める。	
12	九州大学 山本一博	宇宙科学・探査ミッション構想 (Space Science and Exploration Mission Concept)	イプシロンロケットで打ち上げる規模 (公募型小型クラス) (M-class Mission)	衛星 (理学) (Space Science Satellite)	重力の量子性検証実験	重力が量子力学的な重み合わせの原理に従うのかという問いは量子重力理論の前提となる根源的な問題であるが、全くの未検証の問題である。この問題に対して、オプティカルによる巨視的物体の量子状態を実現し、重力相互作用による量子もつれ生成を検証するミッションを検討している。	この構想の実現には、宇宙空間でのオプティカルの量子制御といった技術を要し、20年後程度が想定される。	

(附表2) 戦略的に獲得すべき技術の詳細 2024/8/1 版

下表における「必要根拠」の分類A～Dについて

A) ある科学ミッションを実施する上で必須となる、世界初の技術

B) 従来から日本が強みを持った技術であり、さらなる技術開発によって飛躍的な科学成果が得られるもの

C) 国際協働探索へと接続・発展することが期待され、将来の基盤技術となるもの

D) 宇宙科学の枠組みを超え、宇宙開発全般、あるいはその他の分野において革新的でステップ的な発展につながるもの

要素技術	必要となる分野	必要根拠	開発完了 (TRL>6) となっ てほしい時期	適用を想定・期待する将来 ミッション例（候補・構想含 む）	開発・実証ステータス (TRLなど)	左記の根拠となる実験・実証事例と実証された時期
(1)宇宙用冷凍機技術						
100K-20K冷凍機の長寿 命化・大型化 ・PT冷凍機など新たな 宇宙用冷凍機の開発	天文学・地球観 測等	B	2030年代初め	次期中型銀河進化・惑星系形 成観測ミッション 米国FIR/X-ray Probeへの協 力	200mW@20Kは軌道実証済 み、1W級への拡大はまだ始 まっていない。	1段スターリング冷凍機、2段スターリング冷凍機につい ては、あかり、ASTRO-Hなどの実績があり、TRLは9に達してい るが、部品枯渇による変更がある。また、冷凍効率は高いも のの冷凍能力の絶対値は0.2W@16K程度である。一方で米国 がPlankで使用したH2ソーブションは1W@20Kを達成した。 (ただし使用電力も5倍) 今後大面積の集光鏡を冷却する など、冷却効率だけではなく大冷却能力、あるいは10K以下 への低温化などの応用が生まれる可能性もあり、長期的に みて開発は望ましい。
4K-1K級冷凍機の性 能・信頼性向上 ・4K/1Kジュールトム ソン冷凍機	天文学・地球観 測等	B	2020年代初め	LiteBIRD 次期中型銀河進化・惑星系形 成観測ミッション 米国FIR/X-ray probeへの協 力	TRL8 (4K) TRL5 (1K)	4KJTはSMILES/Astro-Hに搭載され、駆動が確認された。1K 級冷凍機については、LiteBIRDでの使用が予想され、CC- CTP実験を通じヨーロッパのADRとの組み合わせ試験が実施 され、また圧縮機ピストンクリアランスの確立による長寿命 化、高信頼をすすめている。ただし、運転の自動化など制御 系はまだまだ改善の余地があるものと思われる。また、本体 の大型化、あるいは予冷 (20K) 冷凍機の低温化により冷却 能力を改善する方向も考えられる。
100mK級冷凍機の開発 ・ADR/希釈冷凍機など の開発	天文学	B	2030年代初め		TRL3	100mK以下の冷凍機に関して、日本製で軌道実証されたもの はない。米国製のADRがXRISMなどで利用され、LiteBIRDで はヨーロッパ製が搭載予定である。ADRには、一定時間ごと にリサイクルが必要で、連続観測ができないという難点があ り、LiteBIRDあるいは将来のスキャン観測衛星のために 連続観測が可能な希釈冷凍機等の技術開発を行うことが 必要である。JAXAでは研開本部が機械式冷凍機の圧縮機を 利用し、フランスと共同で実験室レベルの実証を行なっ た。
(2)軽量光学系技術						
紫外・可視・近赤外線 能動制御望遠鏡 ・低熱膨張セラミック 鏡	天文学・惑星科 学	B	2020年代中盤	紫外線宇宙望遠鏡計画 LAPYUTA	TRL3、ただしSiC鏡はTRL8	SiCをはじめとする低熱膨張セラミック材は、熱伝導性や剛 性、宇宙放射線耐性などにも優れており、とくに熱安定性 が求められる宇宙用軽量望遠鏡の材料として優れている。 「あかり」望遠鏡の主鏡・副鏡（温度6 K、波長5ミクロン 回折限界）は世界で初めての宇宙冷却SiC鏡であった。他の 実績として、Herschel (80 K、遠赤外線)、GAIA（位置天 文、可視）、「あすなろ」（地球観測）などがある。SiCは 硬く加工が容易でない欠点があるが、近年は加工性を高め た新しい低熱膨張セラミック材が開発され、宇宙観測用の 鏡に適用されつつある。
中遠赤外線望遠鏡 ・CFRP（炭素繊維強化 プラスチック）鏡	天文学・惑星科 学	A, B	2020年代中盤	次期中型銀河進化・惑星系形 成観測ミッション	TRL3、ただしサブミリ波帯 望遠鏡としてはTRL8	CFRPは熱安定性（熱伝導率/線熱膨張係数）と比剛性（ヤン グ率/比重）の両方で非常に優れており、fracture toughnessも非常に高いため、衛星搭載用の高信頼度な極低 温軽量大型ミラーとして大変、魅力的な素材である。 Planck衛星で採用された実績がある。ただし、炭素繊維が 存在するため、良質な鏡面を得ることが困難である。電 波・サブミリ波帯望遠鏡としては問題ないが、短い波長に 適用するためには、鏡面形成法の開発が必要である。
X線望遠鏡 (1) MEMS方式超軽量望 遠鏡 (2) Si高温塑性変形鏡 (3) CFRP望遠鏡 (4) 電铸2段一体型鏡	天文学・惑星科 学	A, B	2020年代中盤	(1) 超小型衛星 GEO-X、 (2, 3) 小型衛星 SuperDIOs、 (3, 4) 次期中型広帯域X線撮 像分光ミッション	TRL3-5	日本のX線天文衛星の望遠鏡として採用されてきた、多重薄 板型Al1フォイル軽量ミラーに代わる次世代の技術として、 いずれも日本発の技術である。(1) 薄いSi基板に数十ミク ロン程度の微細孔をあけ、その側壁を平滑化して反射鏡とし て用いる。Si基板を球面に曲げて、2段に重ねる。(2) Si高 温塑性変形技術を用いて、Wolter-I型望遠鏡の放物面・双 曲面をSi基板で実現する（従来のAl1フォイルでは円錐近似 であった）。(3) 放物面・双曲面一体型をCFRPあるいは(4) 電铸で実現する。
太陽観測用の光学望遠 鏡の超軽量・小型化 ・80cm-1mクラスをイ ンシリコンに搭載可能に ・超軽量化ミラーや精 密支持構造の軽量化	太陽物理学、天 文学全般	A, B	2030年代中盤 ~2040年	次世代大型宇宙望遠鏡	TRL2（アイデア検討段階）	ひので搭載50cm口径光学望遠鏡（ガラス鏡、CFRPトラス構 造）は重量103kgで軌道上実績がある（2007年）。SOLAR-C 1m 口径光学望遠鏡の概念設計（ひので設計思想を基本的に踏 襲）の結果として重量は500 kgとなる（2015年）。光学系の革 新的な精密支持やミラーの超軽量化（CFRP鏡の適用も含む） など、重量の半減（200-250kg 目標）が重要である。なお、 入熱環境が厳しい太陽観測用の光学望遠鏡は、低温の宇宙 赤外線望遠鏡と同様に、過酷な熱環境のもと光学安定性が 求められるため、両技術の関連性は強い。
(3) 観測飛行技術（フォーメーションフライト）						
測距技術	赤外干渉計、 重力波干渉計	A	2030年代初め	SILVIA（技術実証）	TRL3-4	赤外線干渉計では、輝線長として1km（遠赤外線）、10- 100m（近・中間赤外線）を想定し、その距離を100mm（遠赤外 線）、1-10mm（近赤外線）と、10 ⁻⁴ の精度で測定する必要がある。 ETS-VIIのランデブレーザは数10mの距離域で10cm程 度、数100mの距離域で数10cm程度の測距精度であったの で、これを1桁から2桁高精度化する必要がある。
測角技術	赤外干渉計、 重力波干渉計	A	2030年代初め	SILVIA（技術実証）	TRL3-4	赤外線干渉計では、基線長として1km（遠赤外線）、10- 100m（近・中間赤外線）を想定し、その位置を100mm（遠赤外 線）、近赤外線（1-10mm）と、10 ⁻⁴ の精度で測定する必要がある。 ETS-VIIのランデブレーザは数100m付近で 0.05deg （10 ⁻³ rad）程度の測距精度であったので、これを1桁程度高 精度化する必要がある。
精密協調制御技術	重力波干渉計	A	2030年代？	SILVIA B-DECIGO	TRL3	重力波干渉計では、基線長として100km（B-DECIGO）、 1000km（DECIGO）が想定されている。衛星間のフォーメー ションフライト制御系（粗制御系）は、レーザ干渉計を干 渉可能範囲に保ちつつ、ブルーフマスを可動範囲（0.1mm） 内に保つようにレーザ干渉計制御系（精制御系）と協調制 御を行う必要がある。 SILVIAにおける着実な開発として実施。
衛星間通信・複数衛星 運用技術	赤外干渉計、 重力波干渉計	A	2030年代初め	SILVIA（技術実証）	TRL2-3	SILVIAに研究者・専門技術者を糾合（民間・大学含め て）。SILVIA個別の必要技術と汎用性の確保はバランスが 必要

要素技術		必要となる分野	必要根拠	開発完了 (TRL>6) となつてほしい時期	適用を想定・期待する将来ミッション例 (候補・構想含む)	開発・実証ステータス (TRLなど)	左記の根拠となる実験・実証事例と実証された時期
	低擾乱制御技術	重力波干渉計、汎用高感度加速度計	A	2030年代初め	SILVIA (技術実証)	TRL2	重力波干渉計では、基線長として100km(B-DECIGO)、1000km(DECIGO)が想定されている。距離の絶対精度は基線長の1/100程度だが、0.1-10 Hzでの重力波を捉えるためには、そのゆらぎスペクトルが $1\text{E-}18\text{ m/sqrt(Hz)}$ 程度である必要がある。低擾乱化された参照質量は加速度計の参照としても応用可能。
	編隊飛行する多数の宇宙機の運用技術	地球磁気圏STP	A	2020年代後半	SILVIA B-DECIGO FACTORS	TRL4	複数の宇宙機を宇宙機間の距離・編隊隊形を観測対象・観測領域に応じて変化させながら運用し、相互に通信し、相対位置を計測し、宇宙機の健康状態を相互監視して、一部に異常が発生した場合には正常な宇宙機が安全に回避し、編隊を再構成する技術が必要となる。ETS-VIIでは2機の宇宙機間で相互通信、相対航法、安全監視と自動回避技術を実証した。複数宇宙機間の通信および測距技術は、準天頂衛星システムで7基の衛星間で研究開発を行っている。

(4) 干渉計技術

	中遠赤外干渉計検出技術 ・光路差をコヒーレント長レベルで安定させる光学系 ・安定化レーザーを含むヘテロダイン検波技術	赤外干渉計	A	2020年代後半	NASA FIR Probe 候補ミッション	TRL3	気球実験FITEは、飛翔実験には至らなかったものの、2つのビームの焦点を一致させ、かつ光路差をコヒーレント長内にすることが可能な光学系を完成させた。さらに、この技術を発展させ、NASAとの共同気球実験 (JUSTICE) を準備している。
	超高精度宇宙レーザー干渉技術	重力波干渉計	A	2020年代後半	SILVIA B-DECIGO	TRL4-5 基本的な技術は既に獲得済み。宇宙への応用技術については現在開発中。	光共振器を用いたレーザー干渉計を制御し超高感度を実現する技術そのものは、地上の大型重力波検出器であるKAGRA等により既に獲得されている。ただし、地上検出器はアーム長が数kmであるのに対し、宇宙検出器は100km(B-DECIGO)~1000km(DECIGO)である点、そして、鏡の変位雑音に関しては地上検出器は周波数帯が10Hz~10kHzであるのに対し、宇宙検出器は0.1~10Hzである点において違いがあるため、それをカバーする技術を開発中である。
	大容量データ伝送 (近地球やL1/2点の科学ミッションのKaバンド使用)	赤外天文学、太陽物理学、X線天文学など	A	2020年代半ば (まずはWFIRST)		右欄参照	追跡ネットワーク分科会にて、JAXA追跡ネットワークの整備構想が検討されており (2017.7)、まず地球観測データダウンリンクのX帯→Ka帯化の為に地上局の整備が始まっている。また、科学衛星向けのKa帯対応化も構想として考えられ始めている。海外(NASA)では、2020年代の科学ミッションはKa帯が標準。またスペクトラム拡散通信のロングコードの使用などによる高信頼性、高データレート通信技術の開発も検討に値する。

(5) 低コスト高頻度な宇宙輸送システム構築技術

	イプシロンロケットの能力向上・低コスト化	地球周回観測ミッション 太陽系探査	B, D	2020年代初め	DESTINY+, OPENS (キックステージ)	TRL3-5	これまでの固体ロケットモータ開発技術を用いて小型キックスモータ、キックステージを開発し打ち上げ能力を向上する。H3ロケットとの構成要素を共有し低コスト化を図る。
	固体ロケットシステム技術高度化・拡張 (固体ロケット推進の軌道上・深宇宙輸送応用を含む)	低コスト高頻度宇宙輸送を必要とする将来ミッション	B, D	2020年代初め	高頻度運用が可能な小型ロケット (弾道飛行観測実験用、小型衛星打上げ用) イプシロンロケット高度化 深宇宙探査ミッション	TRL3-5	日本の強みである固体ロケットシステム技術は、より高度に拡張する余地が残っている。固体推進薬の量産化技術のような基礎技術開発から小型ロケットシステムへの統合まで、固体ロケットシステム技術の「空白地帯」を埋める取り組みを、産官学連携で進める。
	システム設計技術 (最適化/高信頼性/寿命管理、大気中の極超音速飛行技術、宇宙輸送ネットワーク、等)	低コスト高頻度宇宙輸送を必要とする将来ミッション 大気観測・サンプリング	C, D	2020年代初め	再使用ロケット、再使用宇宙輸送システム	TRL3-5	再使用実験機、再使用観測ロケット、極超音速飛行実験機、軌道上輸送機 (OTV) などの機体システムを設計・開発し、それらによるシステムレベルでの実証を行う
	運用効率化技術 (システム知能化/自律化等)	低コスト高頻度宇宙輸送を必要とする将来ミッション 大気観測・サンプリング	D	2020年代初め	再使用ロケット、再使用宇宙輸送システム	TRL3-5	衛星探査機での成果とのシナジーを得つつ、再使用実験機、再使用観測ロケット、極超音速飛行実験機などによるシステムレベルでの繰り返し運用実証を行う
	ヘルスマネジメント技術 (先進搭載センサ/ワイヤレスネットワーク等)	低コスト高頻度宇宙輸送を必要とする将来ミッション 大気観測・サンプリング	B, D	2020年代初め	再使用ロケット、再使用宇宙輸送システム	TRL3-5	衛星探査機での成果とのシナジーを得つつ、要素レベルでの研究開発とともに、再使用実験機、再使用観測ロケット、軌道上輸送機 (OTV) などによるシステムレベルでの実証を行う
	推進薬マネジメント技術 (貯蔵/輸送/予冷/ボイルオフ等)	低コスト高頻度宇宙輸送を必要とする将来ミッション 太陽系探査工学ミッション	D	2020年代初め~半ば	再使用ロケット、再使用宇宙輸送システム 軌道上デポ 月・火星探査ミッション	TRL3-4	要素レベルでの研究開発とともに、観測ロケットを用いた飛行実証や実験機などによるシステムレベルでの飛行実証を行う。また軌道上実験 (基幹ロケット残推進薬実験)、数値シミュレーション高度化、微小重力実験 (解析検証) による実証を行う。
	機体構造超軽量化	低コスト高頻度宇宙輸送を必要とする将来ミッション	B, D	2020年代半ば	再使用ロケット、再使用宇宙輸送システム 深宇宙軌道間輸送機 (DSOTV)	TRL3-4	地上構造試験、地上真空熟環境試験による要素レベルでの研究開発とともに、構造コンセプト、構造様式の検討を進め、再使用実験機、再使用観測ロケット、軌道上輸送機 (OTV) などに適用する。
	軽量再使用熱防護材	低コスト高頻度宇宙輸送を必要とする将来ミッション 大気観測・サンプリング	D	2020年代半ば	再使用ロケット、再使用宇宙輸送システム 軌道上飛行実験	TRL3-4	地上高エンタルピー風洞試験、地上真空熟環境試験等による、要素レベルでの研究開発とともに、再使用実験機、再使用観測ロケット、極超音速飛行実験などによるシステムレベルでの飛行実証を行う 再突入カプセルとのシナジー効果を得る
	突入/帰還飛行最適誘導制御技術	大気観測・サンプリング 太陽系探査工学ミッション	D	2020年代半ば	再使用ロケット、再使用宇宙輸送システム	TRL3-4	再使用実験機、再使用観測ロケットなどによるシステムレベルでの飛行実証を行う 観測ロケット実験 (HIMICO) 極超音速飛行実験

要素技術		必要となる分野	必要根拠	開発完了 (TRL>6) となつてほしい時期	適用を想定・期待する将来ミッション例 (候補・構想含む)	開発・実証ステータス (TRLなど)	左記の根拠となる実験・実証事例と実証された時期
	空力制御技術 (プラズマクチュエータ／モーフィング等)	低コスト高頻度宇宙輸送を必要とする将来ミッション 大気観測・サンプリング 惑星大気飛行ミッション	D	2020年代半ば	再使用ロケット, 再使用宇宙輸送システム	TRL3~4	要素レベルでの研究開発とともに、実験機 (極超音速飛行実験など) によるシステムレベルでの飛行実証を行う
	高性能、高機能推進技術 (デトネーションエンジン、ハイブリッドロケットエンジン、エアブリージングエンジン、エアロスパイクエンジン等)	低コスト高頻度宇宙輸送を必要とする将来ミッション 太陽系探査工学ミッション	B, D	2020年代半ば	観測ロケットによる飛行実験月・火星ミッション 再使用ロケット, 再使用宇宙輸送システム ハイブリッドロケットキックステージ／モーター	TRL3-9	要素レベルでの研究開発とともに、観測ロケットを用いた飛行実証や実験機などによるシステムレベルでの飛行実証を行う 軌道上輸送推進系への展開、シナジーを考慮する 観測ロケット実験 (デトネーションエンジン、HIMICO) 極超音速飛行実験
(6) 深宇宙航行・黄道面脱出に必要な技術							
	軌道間輸送技術 (ドッキング/再補給/推進薬合成) (電動ポンプ技術含む)	低コスト高頻度宇宙輸送を必要とする将来ミッション 太陽系探査	B, C, D	2020年代後半	次世代小天体SR月・火星探査	TRL3	極低温推進薬長期保存技術研究 (戦略研究) H-IIA上段高度化、HTV-X 技術試験衛星 (ETS7) ※今後、再使用観測ロケットや基幹ロケットを用いた宇宙環境での技術実証、実験機などによる飛行実証を通じた要素レベルでの研究開発とともに、探査ミッションの輸送機能へ段階的に適用する。
	ソーラー電力セイル	太陽系探査	A, B	2020年代後半		TRL4 (OKEANOS)	IKAROSで14x14mのセイルを軌道上実証 OKEANOSで40x40mのセイルを開発中
	イオンエンジンの高性能化 (高比推力・高推力化・小型化・低コスト化・長寿命化・信頼性向上)	太陽系探査	B	2020年代初め	DESTINY+ 小型ソーラー電力セイル 黄道面脱出	TRL3-7 (DESTINY+)	DESTINY+ではやぶさ2の2倍の航行能力を獲得
	ホールスラスターの深宇宙・軌道間輸送への適用	太陽系探査	B, C, D	2020年代中頃	火星探査	TRL4-7	ETS9向けホールスラスタを開発中
	低毒性推進系技術 (電気推進/化学推進の統合技術を含む)	太陽系探査 科学衛星	A, B, D	2020年代後半			工学委員会戦略研究テーマ
	二液推進系エンジン (既存化学推進系の性能向上、新機軸推進系、電動ポンプ技術)	太陽系探査	B, C, D	2020年代初め	SLIM LEAD 次世代小天体SR 火星探査	TRL9 (SLIM)	あかつき、SLIMでセラミックスラスタを実証した。 さらに軽量・大型・高性能化を目的としたセラミック/金属接合スラスタを研究開発 (戦略研究) 探査ハブでの複数の要素技術研究 (民間共創)
	大電力薄膜太陽電池	太陽系探査	B, C, D	2010年代後半	SLIM DESTINY+ MMX	TRL4-9 (9:SLIM)	以下のように、R&Dの結果を軌道上実証しつつ、ミッションの特色に合わせて投入 SPRINT-A/NESSIE (軌道上実証) HTV#6/SFINKS (軌道上実証) SLIM (ボディマウント) DESTINY+ (大面積パドル) MMX (大面積パドル) OKEANOS (電力セイル)
	低消費電力技術	太陽系探査	B, D	2020年代初め～中頃		TRL3-4	ヒータ電力の削減の観点から、低温動作バッテリーについて車載セルの評価を実施。非凍結型低温2液推進系はソーラーセイルWGで研究
	小型軽量コンポーネント技術	太陽系探査 地球周回小型ミッション	B, D	2020年代初め～中頃		TRL3-4	超小型統合AACSユニットやMEMS IRUなどを技術のフロントローディング等で開発 高機能化 (AI等)
	自律技術	あらゆる分野		2020年代中頃～		TRL3-6	画像航法の発展、遠方領域での自律探査機技術、及びこれを実現するための宇宙用電子部品技術の戦略的な獲得
	大容量通信技術	太陽系探査 太陽物理学 地球周回観測ミッション	A, B, D	2020年代初め～2030年代初め		Ka帯導入 (はやぶさ2) ターボ符号導入 (MMO)	1. 周波数帯 X帯⇒Ka帯 (GREAT54m) 2. 多値変調化 QPSK⇒8PSK⇒64APSK 3. 高能率符号化 (ターボ符号、LDPC符号化) 4. 衛星間光通信 NASA実績: Parker Solar Probe (0.6 m HGA, 34W TWTA Ka-band, 167kbps at 1AU distance) から、10年後にあるべき伝送速度としては0.5Mbps/sec@1AU 程度の数字が挙げられる。
	先進通信系技術	あらゆる分野		2020年代中頃～		TRL3-4	通信系機器の小型化は超小型ミッション等からの要望が強く、ワンチップトランスポンダなどを加速。ソフトウェア無線の適用など民生分野の技術発展も取り入れるべき。光通信の探査ミッションへの適用についてもイメージの醸成等から着手すべき
	宇宙機バスの革新的な軽量化 (例: 現在の標準小型バス250kgを150kg級に、イプシロン余剰能力をミッション部に)	あらゆる分野		2020年代中頃			現在の標準小型バスは250kg級。バス機器の中には部品枯渇などを受けて換装が計画されているものもある。 NASA SMEXにおいては、衛星バスが150kg級で実施されており、搭載できるミッション機器に自由度が多い。
	地上系・地上試験技術	あらゆる分野		2020年代中頃～		TRL3-4	地上系は民生含めたオープンな規格を再導入することで、メーカ依存体質からの脱却・コスト低減を図るとともに、将来に向けた技術的発展につなげるべき。地上試験技術はモデルベースやシミュレーション技術などにより試験の効率化を図る
	先進エネルギー技術	あらゆる分野		2020年代後半		TRL2-3	外惑星探査の実現に向けて必須。薄膜太陽電池やRTGなどをトレードオフしつつ、蓄電系を含め、段階的に目標を定めて開発すべき
(7) 天体表面到達および離脱技術							
	天体相対自律画像航法技術	太陽系探査	A, B	2020年代初め		TRL9 (SLIM)	着陸天体によらず共通な技術要素と天体ごとに特化した技術が存在 SLIM (月) MMX (火星衛星) 次世代小天体SR 火星探査

要素技術		必要となる分野	必要根拠	開発完了 (TRL>6) となつてほしい時期	適用を想定・期待する将来ミッション例 (候補・構想含む)	開発・実証ステータス (TRLなど)	左記の根拠となる実験・実証事例と実証された時期
	着陸用航法センサ	太陽系探査	A, B, C	2020年代初め～	SLIM LEAD 月・火星探査	TRL7 (フラッシュライダ)	フラッシュライダはALL JAXAの課題として設定され、ISASのチームによる開発により、HTV-Xの搭載が検討されている。 着陸レーダは2000年代半ばからISASで開発され、SLIMに搭載される。その先、さらなる高精度化に向け、キャリア周波数の高周波化などが望まれる。
	深宇宙でのランデブー・ドッキング技術	太陽系探査	A, B, C	2030年代初め	次世代小天体サンプルリターン等	TRL3	広義の軌道間輸送技術のうち、軌道上ロボティクス技術や深宇宙での位置決定技術、軽量な再結合機構技術を次世代小天体サンプルリターンWGに研究者を糾合して加速する必要がある
	ランダー技術 (極限地形へのアクセスを含む)	太陽系探査	A, C	2020年代初め～	SLIM LEAD 月・火星探査	TRL9 (SLIM)	SLIMで月面へのピンポイント着陸 (斜面) を実証。火星に向けては、大気を有する重力天体特有の技術課題に取り組む必要あり (エアロキャプチャ等を含む)。展開型エアロシエルによるナノランダーミッションはSPURとして提案された。
	ローバー技術	太陽系探査	A, B	2020年代初め～	SLIM LEAD 月・火星探査	TRL8-9 (MINERVA-2) TRL8-9 (SLIM LEV)	対象天体に合わせた移動機構の最適化が継続的に必要。MINERVAシリーズやSLIM搭載LEV-1においては対象天体に合わせて最適化した移動機構等をそれぞれ実証済。LEV-1は加えて地上のリソースに拠らない自律探査機能を一部実証済。
	EDL&R技術	大気を有する天体探査	A, C, D	2020年代中頃～後半	火星探査	TRL2-3	将来の重力天体探査に必須であり、海外の先行技術に対して日本の強み (小型化等) を意識した研究開発を、ALL JAXAと工学コミュニティが一丸となった体制で取り組むことが重要
	重力天体離着陸推進系	重力天体着陸探査	C, D	2020年代中頃～後半	月の三科学ミッション 重力天体着陸探査	TRL2-6	重力天体着陸探査に不可欠。TRLは、ミッション規模に依存
	先進熱制御技術	太陽系探査	B, C, D	2020年代初め		TRL3-4	気液二相流体ポンプシステムやマルチエバポレータ型LHPなどによる能動的、あるいは高機能 (熱スイッチなど) な熱制御技術、極低温の熱制御技術のBBMレベルの部分試作が進められている。(戦略研究)
	天体表面環境での長期生存・稼働技術	月探査・火星探査	A, B	2030年代初め		TRL3	月面越夜技術について、SELENE-2プリプロの活動で、ローバー、ミッション機器、バスの熱モデルの試作による保温性能の評価、及びセルの試作による超高エネルギー密度の越夜用リチウムイオン電池の評価を実施
	微小重力天体からの離脱技術	微小重力天体探査	C	2020年代後半	MMX後継ミッション	不明	
(8) 超小型探査機技術 (観測機器の小型化を含む)							
	外惑星領域で使用可能な電力確保技術	超小型探査機による本格太陽系探査	A, B	2020年代中盤	超小型外惑星探査 (OPENS)	技術FLでEMレベル開発実施。 HELIOS (革新実証4号機, 2024予定?) で部分的に実証予定	軽量大面積太陽電池パドル、高効率薄膜太陽電池、ソーラー電力セイルなど、工学委員会研究でいくつかカバー。技術FLで外惑星探査想定EMレベルの研究開発を実施。 HELIOS (革新実証4号機, 2025以降予定) で部分的にも実証予定。
	超小型・低消費電力計算機	超小型探査機による本格太陽系探査	A, B	2020年代中盤	Comet Interceptor 超小型外惑星探査 (OPENS)	CubeSat向け1W級OBCは軌道上実証済	CubeSat向け1W級OBCは軌道上実証された。性能はさほど落とさずに、さらなる低消費電力化を図り、土星以遠の超小型探査に備えたい。
	超小型・大電力・高効率電力増幅器	超小型探査機による本格太陽系探査	A, B	2020年代中盤	超小型外惑星探査 (OPENS)	50kg級衛星向けは軌道上実証済み。 CubeSat級 (12U, 24U-class含めて) への展開に早く取り組むべき。	PROCYON、ほどよし等の50kg級衛星でGaNアンプ実証済み (2014) CubeSat級 (12U, 24U-class含めて) への展開 (超小型化) が必要。EQUULEUS・OMOTENASHIでは「大電力」は目指していないので、新たな開発・実証の場が必要。
	超小型衛星用高利得アンテナ	超小型探査機による本格太陽系探査	A, B	2020年代中盤	超小型外惑星探査 (OPENS)	50kg級衛星のための50cm級HGAは開発・打ち上げ済みだが、軌道上未実証。 CubeSat級は (利得はそこまで稼げないが) JPLが展開型HGA軌道上実証済み。	50kg級衛星のための50cm級HGAはPROCYON向けに開発済みだが、軌道上での作動機会がなく未実証。どこかで実証機会が必要。 将来的には、薄膜小型Phased Array Antenna等を開発して、姿勢運用制約なく高レート通信を可能にするアンテナ技術が欲しい。
	超小型衛星用高推力推進系	超小型探査機による本格太陽系探査	A, B	2020年代前半	超小型外惑星探査 (OPENS)	BBM実験段階	水を推進剤とした統合推進系が、BBM実験段階。一部 (水レジストジェット) は2019年以降実証予定でFM開発中。
	超小型キックモータ	超小型探査機による本格太陽系探査	A, B	2020年代前半	GEO-X	BBM/EM実験段階	観測ロケット/低軌道/GTO等で段階的に実証する。Storableな酸化剤を適用したハイブリッドロケットを想定。2025年度GTO相乗りを目指してBBM/EM実験段階@北大
	超小型EDL技術	超小型探査機による本格太陽系探査	A, B	2020年代前半	火星探査	サブスケールの軌道上実証を経てミッション提案段階	EGG (2017) でサブスケールの柔軟エアロシエルの展開・再突入実験に成功 火星EDLへ適用し実証を計画中 (SPUR)
	地上局との更新頻度を極端に減らす自律航行技術	超小型探査機による本格太陽系探査	A, B	2020年代後半	Comet Interceptor 超小型外惑星探査 (OPENS)	具体的なミッションを想定した取り組みはない	超小型探査機の運用スタイルは、まだ小型中型探査機と同じスタイルを踏襲している。超小型探査機の運用コストを低減し、多数機・高頻度な探査を実現するためには、自律管制・自律軌道決定・自律軌道制御の実現に向けた研究は極めて重要だが、戦略的に研究がされているとは言えない。 軌道決定に関しては、原理レベルの基礎研究段階 (LIAISON, ASST) or X線バルサー航法は超小型向けではないがISSで原理検証はされた。また、衛星間測距+小Δによる複数探査機による自律軌道決定技術も研究には着手されている (東京大学)。

要素技術		必要となる分野	必要根拠	開発完了 (TRL>6) となつてほしい時期	適用を想定・期待する将来ミッション例 (候補・構想含む)	開発・実証ステータス (TRLなど)	左記の根拠となる実験・実証事例と実証された時期
	観測装置の小型・軽量化 (例: 編隊飛行STP ミッションに搭載のその場観測装置)	地球磁気圏STP	A, B	2030年前半	FACTORS	(1) 波動: TRL 5-6 (2) 粒子: TRL 2-3	(1) 波動 ①受信器部、ブリアンプ部のASICチップの開発が行われている。アナログチップは、SS-520-3ロケット実験(2021年)に搭載されるLFASIに組み込まれ正常に動作し、宇宙空間での実証に成功しており、更に広帯域化・高性能化について開発が進められている(京都大学、金沢大学)。 ②プラズマ波動計測で必要となるスペクトルマトリックス、FFT処理、オンボードノイズ除去などを一つのFPGAでリアルタイム処理するシステムの開発がすすめられている(金沢大学)。 ③自己伸展型小型軽量電界センサーの開発が行われている。Be-Cuを用い、収納時数cmになり、伸展時数mになるエレメントの開発が行われている(京都大学)。 (2) 粒子 BBM レベルの検討・開発が行われている。 ①超小型エネルギー分析部(宇宙研) ②イオン質量分析用小型飛行時間分析部(宇宙研、名古屋大学) ③飛行時間分析用高速応答ブリアンプの ASIC チップによる実現(京都大学、宇宙研) ASICチップ(③)については、試験品によって主要回路の動作が確認されている。
	システム設計・検証手法の確立	全分野		2020年代中	小型宇宙機ミッション全般		九工大などを中心とした試験標準ISOの設定、小型宇宙機ミッションにおける各種テラリングの実施

(9) 地下アクセスと分析技術

マニピュレーション	太陽系探査	B, C, D	2023年	MMX、アルテミス計画での月面サンプルリターン	TRL～6	MMXサンブラ (～2023年)
内部構造の物理探査技術	月探査・火星探査・外惑星領域探査	A	(1) 2020年代初め (2) 2030年代初め	(1) Dragonfly	(1) 地震計・熱流量計: 月面についてはTRL8、その他天体への汎用技術は2023年段階でTRL5-6 (地震計に対してはTRL6-7) (2) レーダーサウンダ: TRL3	(1) 地震計・熱流量計: Lunar-AプロジェクトにおけるFM製作, Selene-2, APPROACH構想における研究開発、DrgonFlyプロジェクトによる地震計開発 (極低温への対応) (2) レーダーサウンダ: マルコポーロ提案 (～2010年)、MMX計画 (2016年～) における地下物理探査装置の宇宙応用にむけた改修・研究開発
地下掘削技術(重力天体) (1) 着陸後のロボットアーム先端設置の円筒コアサンブラ押しつけによるレゴリス掘削 (2) 火星のアクセス困難地域での地下試料掘削	月・火星着陸探査	A	(1) 2023年 (2) 2020年代後半	MMX、アルテミス計画・月面サンプルリターン、次世代小天体サンプルリターン	(1) MMXで円筒コアサンブラ開発中 (TRL～6) (2) 従来の土木・建築で用いられるスクリュー、アースオーガの他、新規的な掘削技術 (ミミズ方式) も検討・開発されている。	(1) MMX円筒コアレゴリス掘削実験 (2016年～) (2) 一部はJAXAイノベーションハブでの研究課題により開発が進められている。
地下掘削技術(微小重力天体) (1) ランデブー後のSCI衝突による人工クレーター形成 (2) 着陸後のガス噴射によるレゴリス層掘削	外惑星領域探査	A	(1) 開発完了 (～2014年) (2) 2020年代後半	次世代小天体サンプルリターン	(1) はやぶさ2で宇宙実証 (TRL9) (2) OKEANOSでニューマチックドリル開発 (TRL5)	(1) はやぶさ2 EM地上衝突実験 (～2012年) (2) OKEANOS着陸機サンブラーBBM真空模擬レゴリス掘削試験 (～2018年)
試料採取機構 (重力天体)	月・火星着陸探査	A	2020年代		研究開発中	
試料採取機構 (微小重力天体) (1) 弾丸射出&スクープ&ガス噴射型のタッチ&ゴー着陸試料採取 (2) 超高速～低速衝突微粒子の非破壊捕集採取	外惑星領域探査	A	(1) 2020年代後半 (2) 2020年代後半	(1) 次世代小天体サンプルリターン、(2) ゲートウェイ・ダスト捕集実験、CORSAIR彗星核・コマサンプルリターン(NASA New Frontier候補)	(1) 弾丸射出&スクープ型ははやぶさ2で宇宙実証 (TRL9)、ガス噴射型はOKEANOS着陸機で開発 (TRL5)、(2) 超高速衝突微粒子はたんぼぼで宇宙実証 (TRL9)、低速衝突微粒子はたんぼぼで宇宙実証 (TRL9) + CORSAIR サンブラ機構BBM開発 (TRL4)	(1) 弾丸射出&スクープ型: はやぶさ、はやぶさ2 FM開発 (～2001年、～2013年)、OKEANOS着陸機弾丸射出サンブラBBM開発実験 (～2017年)、ガス噴射型: OKEANOS着陸機ガス噴射型サンブラBBM開発実験 (～2017年) (2) 超高速衝突微粒子: たんぼぼFM開発 (～2013年)、OPENS超高速衝突突生成物捕集機構基礎研究 (2018年～)、低速衝突微粒子: たんぼぼFM開発 (～2014年) + CORSAIR-Coma Dust Sampler BBM開発 (2013年～)
試料密閉機構 (重力天体)	月・火星着陸探査	A	2020年代		研究開発中	
試料密閉機構 (微小重力天体) (1) 試料から高温分離・再吸着したガス成分の密閉容器 (2) 有機物汚染防止・惑星保護対策のための密閉容器&密閉分析インターフェイス (3) 揮発成分の真空低温保存のための密閉容器	外惑星領域探査	A	(1) 2020年代後半 (2) 2020年代後半 (3) 2020年代後半	(1) 次世代小天体サンプルリターン、OPENS 1号機以降 (外惑星天体サンプルリターン)、(2) OPENS 1号機以降 (外惑星天体サンプルリターン)、(3) CAESAR彗星核・コマサンプルリターン(NASA New Frontier候補)	(1) はやぶさ2サンブラでFM宇宙実証 (TRL9) (2) OKEANOS着陸機サンブラ用試料密閉容器BBM (TRL4) & OPENS用密閉分析容器基礎開発 (TRL2) & たんぼぼCLOXS地上密閉エプロゲル初期分析装置実働 (TRL9) (3) 米CAESAR用地球帰還カプセルBBMを開発中 (TRL3)	(1) はやぶさ2 FM開発 (～2013年) (2) OKEANOS着陸機サンブラBBM試料採取地上実験 (～2018年)、OPENS用試料採取機構基礎開発実験 (2018年～) (3) CAESARカプセルプロトタイプ風洞実験・野外実験 (2017年～)

要素技術		必要となる分野	必要根拠	開発完了 (TRL>6) となっ てほしい時期	適用を想定・期待する将来 ミッション例 (候補・構想含 む)	開発・実証ステータス (TRLなど)	左記の根拠となる実験・実証事例と実証された時期
(10) 高機能構造材料技術	質量分析等その場物質 分析技術 (1) 月ローバー搭載 揮発性物質その場分析 用の高感度中質量分解 能質量分析装置 (2) 揮発性物質・有 機物用のその場高質量 分解能質量分析装置 (3) 生命活動兆候検 出用のその場観測装置 (4) 生命検出用の蛍 光顕微鏡	月・火星着陸探 査・外惑星領域 探査	A	(1) 2020年 台後半 (2) 2020年 代後半 (3) 2020年 代後半 (4) 2020年 代後半	(1) LUPEX (2) 次世代小天体サンプ リターン、OPENS-0号機 (土 星圏片道フライバイ)、 OPENS-1号機 (外惑星フ ライバイサンプリターン)、 (3) OPENS-0/1号機、 (4) 火星着陸・地下土壌探 査ミッション	(1) LUPEXローバー搭載 に向けて月極域水探査用3 回反射型リフレクトロン TRITONを開発中 (2023年段 階でTRL4) (2) OKEANOS着陸機用、 次世代小天体SR子機用、 OPENS-0号機用小型MULTUM 質量分析装置BBM開発 (TRL4～) (3) OPENS-0/1号機用超 高速衝突生成物用MULTUM試 料導入部の基礎開発 (TRL3 ～) (4) 生命検出顕微鏡 (LDM) BBMを開発中 (2018 年段階でTRL4)	(1) LUPEX搭載水資源分析装置REIWAの質量分析器として 設計・試作した3回反射型リフレクトロンTRITONテストモ デルの試験結果 (2) OKEANOS着陸機用MULTUM-BBM試料採取&分析実験 (～ 2018年)、次世代小天体SR子機&OPENS-0号機用小型MULTUM 開発 (2020年～)、探査ハブ小型MULTUM用高圧電源部開発 (2022年～) (3) OPENS-0号機用超高速衝突生成物捕集機構・原理確 認実験 (2021年～) (4) LDM-BBM模擬火星土壌試料分析試験 (2015年～)
	サンプリリターンカプ セル技術	太陽系探査	A	2020年代初め		TRL8-9 (はやぶさ、はやぶ さ2) TRL3-4 (CAESARなど)	「はやぶさ」カプセルのヘリテージを利用しつつ、MMX, CAESAR、OKEANOS等の各ミッションの要求を満足する高性能 化の技術開発 (大型化・高速再突入・低温保管等) が必要
	アストロバイオロジー 研究を可能とする往路 惑星保護技術 (1) 火星の特別な場 所へのピンポイント着 陸技術 (2) 火星の特別な場 所で着陸機を活動可能 にする滅菌・汚染管理 技術 (3) 火星&海洋天体 への衝突回避する軌 道制御技術	月・火星着陸探 査・外惑星領域 探査	A	(1) 2030年 代前半 (2) 2030年 代前半 (3) 2020年代 半ば	(1) (2) (3) 火星着 陸・地下土壌探査ミッシ ョン、(3) OPENS-0号機 (土星 圏片道フライバイ)、OPENS- 1号機 (外惑星フライバイサ ンプリリターン)	(1) SLIMで大気なし重力 天体のピンポイント着陸の FM実証 (2023年にTRL9)、 地上風洞・高層大気での模 擬火星大気飛翔実験 (2018 年段階でTRL3)、小型EDL 実証ミッションで大気あり 重力天体のピンポイント着 陸のFM実証 (2018年段階で TRL2) (2) OKEANOS着陸機で滅 菌・汚染管理技術のPM実証 (TRL3)、MMX探査機FM (火星着陸なし)の滅菌・ 汚染管理 (TRL6) (3) はやぶさ、はやぶさ 2で火星衝突回避軌道計算 でCOSPARカテゴリー承認を 取得 (TRL9)、OKEANOSで 外惑星領域小天体への近傍 運用 (TRL3)、OPENS-0 号機の軌道計画・GNC基礎 開発 (TRL3)	(1) SLIMでFM開発 (～2023年)、EDLミッションで基礎開 発 (2010年代～) (2) MMXでFM開発 (～2024年) (3) 火星についてははやぶさ、はやぶさ2で宇宙実証 (～2015年)
	アストロバイオロジー 研究を可能とする復路 惑星保護技術 (1) 火星地下土壌・ 海洋天体微粒子等、 COSPARカテゴリーで 「制約付き地球帰還」 となる採取試料の地球 帰還以前の滅菌・汚染 管理技術 (2) 同試料保管容器 を搭載する地球帰還カ プセル・地上回収技 術・カプセル内密閉分 析技術・開梱後実験室 内密閉分析技術・安全 確認分析技術、同試料 の長期保管技術など。	月・火星着陸探 査・外惑星領域 探査	A	(1) 2020年 代後半 (2) 2020年 代後半	(1) 火星着陸・地下土壌探査 ミッションに続くサンプリリ ターンミッション、国際有人 火星探査、OPENS-1号機以降 の外惑星フライバイサンプ リターン、(2) CAESAR彗星 核サンプリリターン (NASA New Frontier候補)、次世代 小天体サンプリリターン、 OPENS-1号機以降の外惑星フ ライバイサンプリターン、 火星着陸・地下土壌探査ミ ッションに続くサンプリリタ ーンミッション	(1) BSL4クラスの滅菌・ 汚染管理技術を海洋探査等 から技術移転 (TRL3) (2) はやぶさ、はやぶさ 2採取試料の「制約なし」 地球帰還・地上回収・開梱 後実験室内密閉分析のFM実 証 (TRL9)、MMXで同左実 証 (2029年でTRL9)。カプ セル内密閉分析技術・安全 確認技術・試料長期保存技 術は、海洋探査等より技術 移転 (TRL3)	(1) 海洋天体ブリューム微粒子軌道上分析装置BBM開発実 験 (2015年～)、JAMSTEC等近隣分野機関との連携 (2012年 ～) (2) はやぶさ&はやぶさ2で宇宙実証 (2010、2020 年)、MMXでFM開発 (2029年)、JAMSTEC等近隣分野機関と の連携 (2012年～)
(10) 高機能構造材料技術							
	対宇宙環境性を有する 高機能プラスチック材 料の開拓	太陽系探査	A, C	2020年代後半	次世代サンプリリターン、火 星着陸機	TRL3 (IKAROS、OKEANOS)に代 表されるソーラーセイル)	ポリイミドに代表される宇宙環境に対して高い耐性を有する プラスチックは、探査機表面を保護するサーマルブラン ケットや大気圏再突入用ヒートシールドといった柔軟、薄 膜な宇宙用構造物の構成に必須の材料である。さらに、 我々はIKAROSプロジェクトの成功によって、プラスチック 自体を膜材として展開する方式のソーラーセイル技術を獲得 している、世界でも有数の団体である。我々の有する世界 トップクラスのプラスチック宇宙応用技術の更なる活用 として、従来のポリイミドを超えた新規のプラスチック材 料の開拓が重要である。重要な指標としては、1. 太陽電池 の基材として十分な高い透過率、2. 再突入カプセルや金 星、水星の環境に用いることができるような超高温耐性、 3. 1-10 μ m厚といった超薄膜の形成による超軽量性、であ る。これまで宇宙研では、熱加工に優れたプラスチック基 板として、非対称ポリイミドISAS-TPIIの開発を行ってきた。 実際に、7.5 μ m厚のISAS-TPIIは、IKAROSのプラスチッ ク膜材として宇宙における大面積展開に成功している。今 後は、ISAS-TPIIの1 μ m化による超フレキシブルなISAS-TPI の開発、ISAS-TPIIへ薄膜太陽電池の直接作製を実現するこ とで、ISAS-TPIを用いた超フレキシブルな薄膜太陽電池の 実現を狙う。

要素技術		必要となる分野	必要根拠	開発完了 (TRL>6) となつてほしい時期	適用を想定・期待する将来ミッション例 (候補・構想含む)	開発・実証ステータス (TRLなど)	左記の根拠となる実験・実証事例と実証された時期
	各種観測機器のインターフェースにおける高機能構造材料 ・低熱膨張かつ低熱伝導かつ軽量高剛性構造材料 ・低熱膨張かつ高熱伝導かつ軽量高剛性構造材料 ・低熱膨張かつ低熱伝導かつ高減衰支持構造材料	天文学全般	E	2020年代後半	次世代大型宇宙望遠鏡	TRL2 (アイデア検討段階)	赤外、電波、X線など波長を問わず検出器等のミッション機器の低温維持、高精度な位置安定性の実現、擾乱のアイソレートは必要な技術として識別されている。基盤となる各種観測機器のインターフェースにおける高機能構造材料。
	大面積薄膜プラスチックを展開するためのブーム展開構造システム	月・火星着陸探査・外惑星領域探査		2020年代後半	HELIOS-R, OPENS 1 号機、次世代サンプリターン、宇宙物理観測機全般	TRL3	宇宙における柔軟展開構造の実現は、限られた打ち上げリソースの中で、大面積に展開することで高性能を実現する観測機や大電力発電が可能な太陽電池パドルといった応用から、次世代の宇宙機開発に必須の技術である。IKAROSに代表される遠心力を用いた展開方法は、シンプルな構造で展開が可能である一方、重心が回転中心にいない必要があることから、宇宙機の構造デザインが制限される、10mを超える大面積の展開においては構造強度の担保が難しい、といった課題を有していた。そこで近年、従来太陽電池パドルと同様の構造に展開が可能かつ十分な構造強度を実現可能な展開構造として、展開用ブームを用いた膜展開構造が開発されている。HELIOS-Rにおいては、繰出型ブームと3軸織物膜材を組み合わせることで、10m程度の三角形に展開可能な膜構造を実現した。今後、展開型膜材へ、薄型の太陽電池を搭載実装し、さらに膜アンテナによる短距離無線通信を組み合わせることで、展開した大面積シートに対して、シート上の温度、太陽光量、放射線量を複雑な配線なく測定可能なシステムを実現する。実現されたブーム展開システムは、軽量太陽電池パドルとして用いることができるだけでなく、SAR衛星、次世代宇宙観測機の検出機への応用が期待される。
	宇宙における軽量ロバストな3次元構造を実現するための柔軟インフレーション構造	月・火星着陸探査・外惑星領域探査		2030年代前半	火星着陸機、月面SAPタワー、LEAD	TRL3	宇宙における3次元構造展開は、月面基地、火星面基地用ドーム、月面太陽電池タワー、超小型衛星の展開大型化、といった観点から、将来の宇宙開発における獲得すべき技術である。特に、重量の大きな構造物を高さ方向へ展開を行う場合、構造物の重心が高くなることから、ロバストな3次元構造展開は困難である。そのため、従来の展開パネルに用いるようなヒンジや金属フレームを用いない、ロバストかつシンプルな3次元展開構造として、気圧差を用いたインフレーション構造が注目されている。これまで宇宙研では、観測ロケットによって、トラス構造を有するインフレーションブルームを開発し、宇宙における展開試験の実施や、共振周波数の測定などを行ってきた。将来的にはこの技術を用いて、インフレーションブルームを用いた惑星面基地用の太陽電池ドーム、また太陽電池時代をインフレーション構造化した、インフレーション太陽電池による月面SAPタワーの実現を狙う。
(11) 高耐環境性・新機能電子デバイス関連技術							
	ワンチップトランスポンダ	太陽系探査	A, B	2030年代初頭	OPENS1号機以降	TRL2-3	超小型～小型の月惑星探査向けトランスポンダとしては、COTSを利用した超小型トランスポンダが国内外で実用化されている。一方、長期間のミッションに耐えうるより小型なトランスポンダが今後必要とされることが期待されており、この要求への解答としてワンチップでトランスポンダの(少なくともPAを除くフロントエンド部の)機能を実現する。 2024年初頭のステータスとしてはBBMレベルでの開発が行われており、惑星探査機向けとして十分低い雑音指数を持つX帯レシーバ回路を試作した。
	ダイヤモンドパワーアンプ	太陽系探査	A, B	2030年代前半	OPENS1号機以降	TRL2	ダイヤモンド半導体はワイドバンドギャップ半導体の中でも真空管並みの大電力・高周波動作が期待されており、探査機のKa・X帯PAを置き換えることが期待される。 2023年に宇宙での適用を目指した産官学連携の研究グループが立ち上がっており、研究開発が進められている。
	新規薄膜太陽電池	月・火星着陸探査・外惑星領域探査	A	2030年代前半	OPENS 1 号機、次世代サンプリターン子機	TRL2-3	近年の宇宙機の大電力化、深宇宙探査に向けて、軽量の薄膜太陽電池技術の獲得は必須の課題である。三接合太陽電池を用いた軽量SAPは高効率である一方、大面積化によって指数関数的に製造コストが増加してしまうため、将来の大面積SAPに向けた低コストかつ大面積作製容易な創発的薄膜太陽電池の開拓が求められている。薄膜のペロブスカイト結晶を吸収層へ用いたペロブスカイト太陽電池は、薄膜太陽電池における最高変換効率・高い放射線耐性から、次世代の宇宙用薄膜太陽電池として注目されている。宇宙研ではこれまで、探査ハブ・大気球実験の枠組みを用いて宇宙環境に向けたペロブスカイト太陽電池の開発を進めてきた。今後は、試作されたペロブスカイト太陽電池の大面積化、トータル膜厚を100ミクロン以下にすることで、軽量、超フレキシブルな対宇宙環境性を有する太陽電池を狙っていく。大気球実験や観測ロケットといった、比較的短期間で新規材料の評価が可能なプラットフォームを用いることで、宇宙環境特性を評価し展開ブーム技術と組み合わせることで、将来の深宇宙探査プロジェクトに向けた展開型大電力電源として実装を目指す。

要素技術		必要となる分野	必要根拠	開発完了 (TRL>6) となつてほしい時期	適用を想定・期待する将来ミッション例 (候補・構想含む)	開発・実証ステータス (TRLなど)	左記の根拠となる実験・実証事例と実証された時期
	創発的な薄膜ナノ材料を用いた超高効率、軽量な次世代宇宙放射線シンチレータ	天文学全般	A	2030年代前半	次世代宇宙線観測プロジェクト	TRL1	宇宙形成の歴史を目的とした太陽磁気圏外の宇宙物理観測においては、宇宙環境における低エネルギー宇宙線の高性能、高解像度な計測技術の獲得が必須である。これまで我々はX線観測機XRISM、GRAMS、GRAINといった気球による宇宙線観測プロジェクト、ISSきぼうプラットフォームを用いた宇宙線カロリメータCALETという、様々な観測器を用いて宇宙線の観測を行ってきた。しかしながら、これまでの宇宙機や宇宙線観測デバイスには、既存の結晶シンチレータを用いた、小型で重いエネルギー検出器であった。そのため、角度分解能としても1-10degが限界であり、その限界を突破したGRAINも、感光板を用いた検出器システムであったため、宇宙における宇宙線の継続観測は困難であった。近年ペロブスカイトナノ粒子を用いた有機シンチレータが、光信号の伝搬損失が少ない高性能な有機シンチレータとして注目されている。有機シンチレータは、非常に高速な検出応答をするだけでなく、薄膜、フレキシブル化が可能であるため、大面積に展開可能なシート型検出器として、次世代の宇宙線検出デバイスへの応用が期待される。ナノ粒子シンチレータの材料開発から宇宙機応用まで一貫した研究開発を行うことで、宇宙研の理工学双方の教員の専門性を活かした、独自の宇宙物理開拓プロジェクトの実現が可能である。
	フレキシブルイメージセンサによる宇宙機システムの外観測定による健全性担保システム	月・火星着陸探査・外惑星領域探査	A	2030年代前半	OPENS、超小型衛星プロジェクト	TRL1	近年の宇宙機探査は、より遠方の対象に向けた長期プロジェクトが多く提案されている。遠方、深宇宙探査プロジェクトに向けた宇宙機においては、その長期の故障に対する信頼性担保が重要である。搭載する機器を宇宙での実績がある部品で構成することで、探査機のシステムロバスト性を高めることができる一方で、コストが限られる超小型衛星などのプロジェクトでは、故障の予備検知を行い、システム側でソフトウェア的に故障を回避可能な、相補的オブザーバシステムの開発が重要である。システムの故障検知システムとして最もシンプルな方法は、システムの外観の変化から、故障箇所を同定する方法である。宇宙機では、搭載機器の重量、空間的な制約が大きく、オブザーバとしてのカメラによる故障検知システムを搭載することは困難であった。近年、薄型のプラスチック基板へ薄膜のフォトリソグラフィを作製することで、3次元に貼り付け可能な軽量フレキシブルイメージセンサが開発されている。フレキシブルイメージセンサを宇宙機システムに対して貼り付け、外側からイメージセンサにて測定した外観変化から、故障に近い部品を同定し、故障予備システムの構築が可能である。土星という超遠方惑星への探査を主目的とするOPENS 1号機のサブミッションとして、上記のような故障検知オブザーバを導入することで、超小型衛星の長期運用に対する基礎技術獲得を狙う。
	超小型観測機器の実現に資する微細加工・デバイス技術	太陽系探査	B	2030年代前半	超小型探査ミッション全般、小型ローバミッション全般	TRL2	海外では微細加工技術により小型軽量な分光計やプラズマ分析装置を実現している。国内でもX線MEMS光学系やモスマイ構造のレーザ加工等の事例があるが、より広範に微細加工技術やシリコンフォトニクス等のマイクロエレクトロニクス技術の観測機器への適用を目指す。この活動の成果をもって、超小型探査機を用いたミッションや小型ローバミッションの科学的価値の増大を図る。
(12) 地上系							
	運用・通信	あらゆる分野	E				継続して維持・開発する必要有 高性能化や自動化は開発期間の短縮や低コスト化に大きく貢献 航空分野との連携、大気圏から宇宙空間へのシームレスな管制など
	地上試験	あらゆる分野	E				継続して維持・開発する必要有 ミッション要求を早期に確実に実現していくためのシステム設計・検証手法の確立や製造を支えるサプライヤの維持拡大、効率的に運用を続けることを可能とする機上・地上の仕組みや体制づくりなども重要となる。