

RSQ-2018026

宇宙科学技術ロードマップ

初版

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所

2019年3月29日

目次

1章 本文書の目的と位置づけ.....	5
2章 概要 ～ミッションロードマップ～.....	8
3章 ミッションRMの実現に必要な技術(技術領域別).....	10
3.1 天文学・宇宙物理学.....	10
3.2 宇宙工学.....	14
3.3 太陽系科学(太陽系探査・太陽圏科学).....	21
3.4 戦略的に獲得すべき宇宙科学技術リスト.....	23
4章 直近ミッションの実現に必要な技術(ミッション別).....	33
4.1 XRISM.....	34
4.1.1 ミッション概要.....	34
4.1.2 日本の役割／海外からの寄与.....	34
4.1.3 日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術.....	35
4.1.4 上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果.....	35
4.2 LiteBIRD.....	36
4.2.1 ミッション概要.....	36
4.2.2 日本の役割／海外からの寄与.....	36
4.2.3 日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術.....	36
4.2.4 上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果.....	37
4.3 SPICA.....	38
4.3.1 ミッション概要.....	38
4.3.2 日本の役割／海外からの寄与.....	38
4.3.3 日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術.....	39
4.3.4 上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果.....	39
4.4 小型 JASMINE.....	40
4.4.1 ミッション概要.....	40
4.4.2 日本の役割／海外からの寄与.....	40
4.4.3 日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術.....	41
4.4.4 上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果.....	42
4.5 Solar-C EUVST.....	43
4.5.1 ミッション概要.....	43
4.5.2 日本の役割／海外からの寄与.....	44
4.5.3 日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術.....	45
4.5.4 上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果.....	45

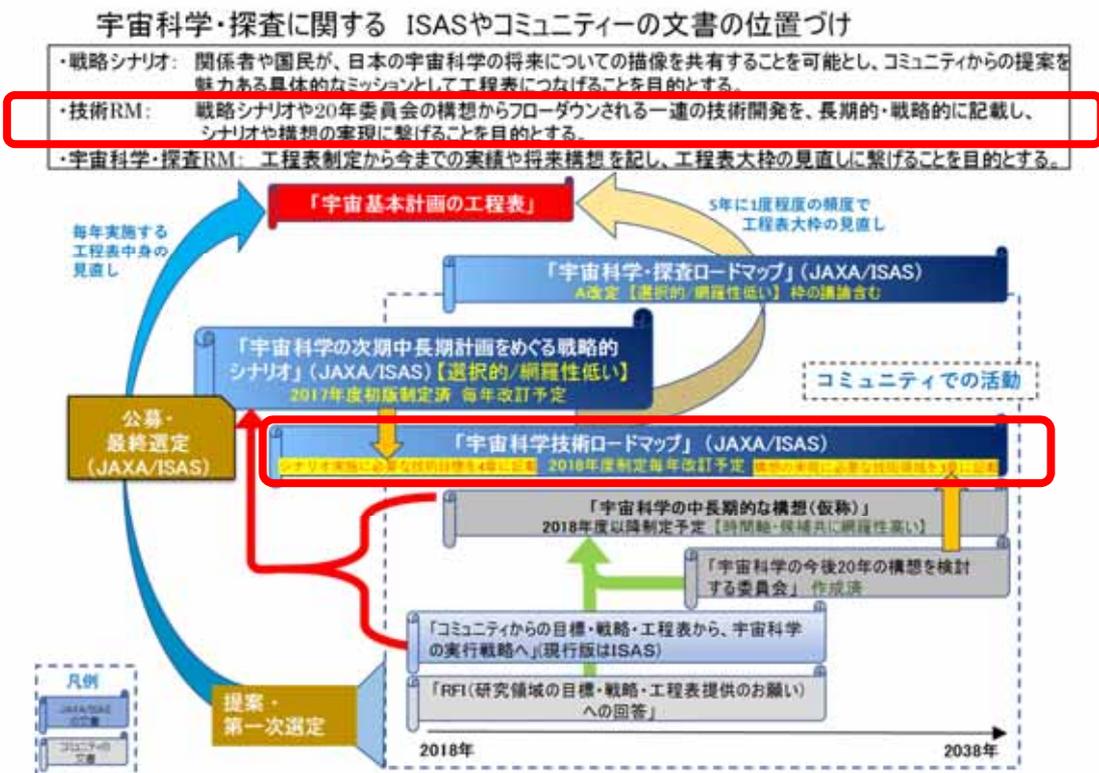
4. 6	HiZ-GUNDAM	47
4. 6. 1	ミッション概要	47
4. 6. 2	日本の役割／海外からの寄与	48
4. 6. 3	日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術	48
4. 6. 4	上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果	48
4. 7	MMX	50
4. 7. 1	ミッション概要	50
4. 7. 2	日本の役割／海外からの寄与	50
4. 7. 3	日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術	50
4. 7. 4	上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果	51
4. 8	OKEANOS	52
4. 8. 1	ミッション概要	52
4. 8. 2	日本の役割／海外からの寄与	52
4. 8. 3	日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術	53
4. 8. 4	上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果	53
4. 9	SLIM	55
4. 9. 1	ミッション概要	55
4. 9. 2	日本の役割／海外からの寄与	56
4. 9. 3	日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術	56
4. 9. 4	上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果	56
4. 10	DESTINY+	57
4. 10. 1	ミッション概要	57
4. 10. 2	日本の役割／海外からの寄与	57
4. 10. 3	日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術	57
4. 10. 4	上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果	58
4. 11	JUICE	59
4. 11. 1	ミッション概要	59
4. 11. 2	日本の役割／海外からの寄与	59
4. 11. 3	日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術	59
4. 11. 4	上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果	60
4. 12	CAESAR	61
4. 12. 1	ミッション概要	61
4. 12. 2	日本の役割／海外からの寄与	61
4. 12. 3	日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術	61
4. 12. 4	上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果	62

5章 まとめと今後.....	63
----------------	----

1章 本文書の目的と位置づけ

ボトムアップによるミッション立案を基本としつつも、技術とサイエンス両面におけるプログラム化による戦略的なミッション実施の必要性が増している中、宇宙基本計画の工程表の「宇宙科学・探査」の考え方もも整合した「宇宙科学の次期中長期計画をめぐる戦略的シナリオ」を2018年度末に策定した。これにより、宇宙科学分野におけるプログラムの全体像や目的の明確化を図り、宇宙探査に一定の予見性を確保し、一連の技術開発と科学成果の創出を戦略的に行うことで、魅力ある具体的なミッションとして工程表につなげる。

宇宙科学技術ロードマップ(本書)では、上述の戦略シナリオや、別途理工学委員会タスクフォース「宇宙科学の今後の20年の構想を検討する委員会」の提言書「2030年代以降の宇宙科学に向けた提言」に記載されているミッションなど実現するために必要な一連の技術開発を、長期的・戦略的に記載する。前者(戦略シナリオ)の実施に必要な技術目標を本書の4章に、後者(長期的なミッション構想)の実現に必要な技術領域を本書の3章にそれぞれ記載する。後者は「技術のフロントローディング」の候補にも繋がっていく。



点線内は“主として”コミュニティの活動を示し、下から上にある程度時系列に流れている(戦略シナリオと技術 RM は時系列が逆)。主として書いたのは RFI 回答を網羅性高くまとめた「実行戦略」は現行

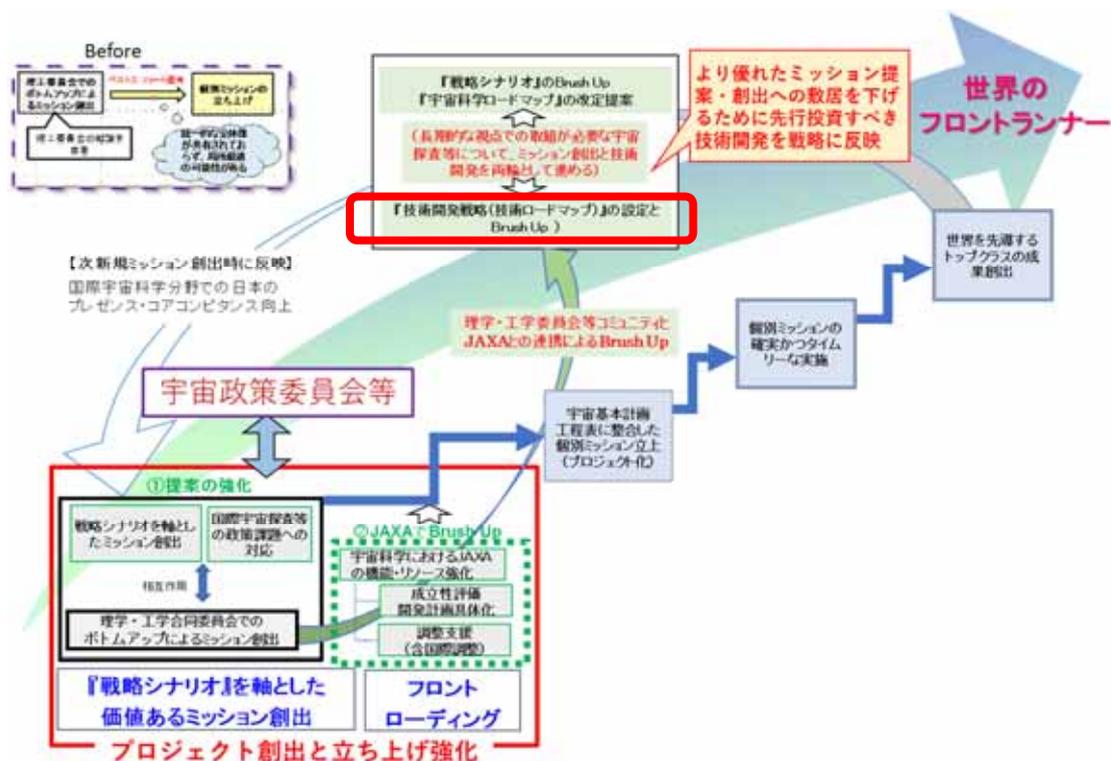
ISAS 文書なため、それに変わるものとして、20年委員会報告書も踏まえて、「宇宙科学の中長期的な構想(仮称)」という、時間軸も候補軸も網羅性の高い文書をコミュニティのクレジットで制定する予定。

宇宙理学・工学委員会では、「宇宙科学の実行戦略 ver0.16」をさらにより長期的な視点に立ったものに補完すべくタスクフォース「宇宙科学の今後の20年の構想を検討する委員会(以下、20年委員会と略称)」による検討を行い、さらにその報告書「2030年代以降の宇宙科学への提言」を踏まえうえて、「宇宙科学の中長期的な構想(仮称)」という、時間軸も候補軸も網羅性の高い文書をコミュニティのクレジットで制定する予定である。

コミュニティが網羅性高くして詳細な「中長期的な構想(仮)」をまとめたら、その中からより実現に近いものを戦略シナリオに加えるという想定。

左側の青矢印は、毎年実施する工程表の中身の個別更新に向けての流れで、具体的なミッション選定を反映するイメージ。

それに対して、右側の黄矢印にある「宇宙科学探査 RM(A 改定)」は、5年に1度程度の工程表大枠の見直しに資する文書で、戦略シナリオからピックアップした有力ミッションの記載に加えて、枠の議論(150/300等)も記載する。



科学ミッション立案の仕組み変革に際しては、提案の強化と JAXA による洗練を行うことにより、プログラム化の推進をはかる。

①提案の強化:

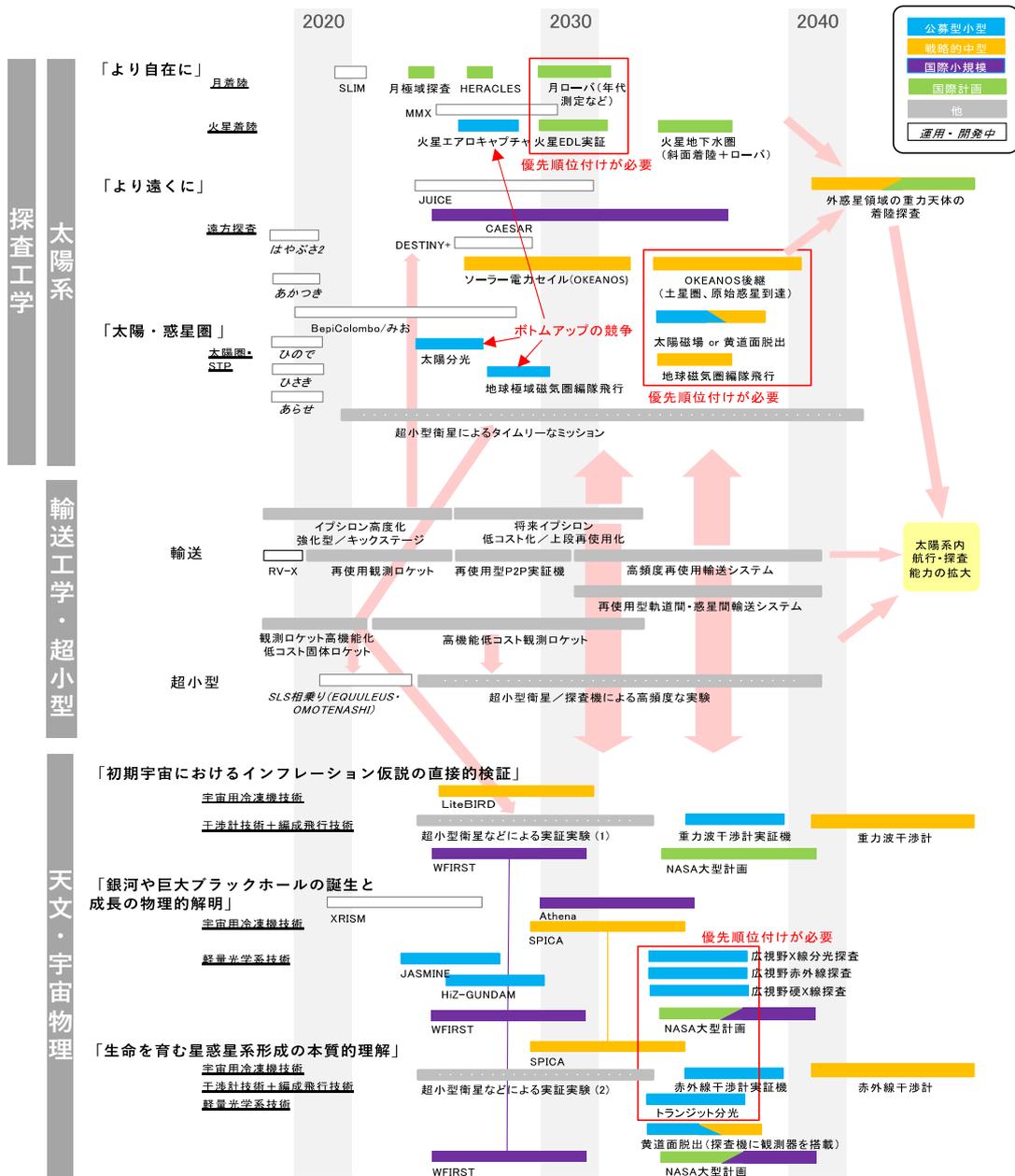
理工学委員会からのミッション創出提案に加え、国際連携を含む JAXA 先導の提案や国際有人宇宙探査等政策課題への対応も加味しつつ相互作用させることで、ミッション提案の強化を図る。

②JAXA による Brush Up (フロントローディング):

ISAS が JAXA 内で連携して、成立性評価(キー技術の研究開発等によるフロントローディング含む)と開発計画の具体化、国際調整機能、維持改定を行う「次期中長期計画をめぐる戦略的シナリオ」との整合性確認などを行う機能を強化することで、提案ミッションの実現性向上・開発リスク低減化を図る。

2章 概要 ～ミッションロードマップ～

本章では、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、そこに向けて持続的発展を遂げるためのシナリオを提示する。考えるシナリオの一つとしてタスクフォース「20年委員会」にて検討したミッションロードマップ例を線表にまとめた。この線表では上



コミュニティにおけるミッションロードマップ検討例

(2030年代以降の宇宙科学に向けた提言 - MMX/LiteBIRD/OKEANOS/SPICA のその先へ -)

宇宙理学・宇宙工学委員会下の20年委員会による提言書から

なお、本シナリオは、20年委員会委員による見識に基づいてミッションの絞り込みを行っておけるものであるが、並行して、各研究コミュニティでも将来計画については、様々な検討がなされている。

太陽系探査では、火星のアクセス困難地域と、スノーラインを超えた遠方の始原天体や内部海を持つ木星や土星の衛星とが、極めて科学的価値の高い未踏領域である。SLIM に続く月ミッションにて重力天体着陸技術を磨きつつ、火星と遠方の未踏領域探査へと挑むことで「より自在に」「より遠く」を実現し、長期的には遠方の重力天体の着陸探査を日本独自に実行する。一方、太陽地球系物理学（STP）分野を含む太陽圏科学では、太陽-惑星系の変動と共進化の理解を掲げ、多角的な太陽観測を小型衛星で実現するとともに、太陽圏内部領域や外惑星の電磁気圏探査、惑星間空間の多点同時観測、黄道面脱出などを旨とする。

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するだけでなく、同時に探査機・輸送システム等の宇宙工学全般に及ぶ革新をもたらすものである。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2020年代以降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、まず、宇宙科学が共に歩んできたイプシロンロケットについては、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。短中期的には再使用観測ロケットを構築して実用することにより効率的な運用技術を確立するとともに、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。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、深宇宙探査も含めて、長期ビジョン実現の一翼を担う飛翔機会とする。

天文・宇宙物理分野では、物質と空間の起源と進化、系外惑星、地球外生命が長期的な研究課題である。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、などが挙げられる。この先5-15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は、例えば LiteBIRD と XRISM の戦略的中型ミッションや、ESA との共同ミッションである SPICA、そして Athena や WFIRST といった海外大型ミッションへの参画が予定されている。また、(1)や(2)に繋がる先鋭的な成果を目指して、HiZ-GUNDAM や小型 JASMINE といった公募型小型ミッションが提案されている。今後の戦略としては、欧米で進む巨大ミッションの流れに追従するのみではなく、広視野サーベイ観測、宇宙干渉計観測、トランジット分光、マルチメッセンジャー・タイムドメイン天文学など、広視野・高波長分解能・高安定性・高い即応性のいずれかなど焦点を絞り、小型ミッションでも行える先鋭的なサイエンスを見極めて世界に先駆けて遂行し、これまでも培ってきた宇宙用冷凍機をはじめとする、キーとなる技術を特定して伸ばすことによって、世界がリードする巨大ミッションにピンポイント的に存在感を持って参画する。我が国が主体となってやりきれない小型衛星クラスで実現可能な革新的観測手段として、編隊飛行による赤外線ならびに重力波宇宙干渉計の実証をすすめ、我が国が主体となり海外計画とも相補的な「宇宙干渉計」を構想する。

3章 ミッションRMの実現に必要な技術(技術領域別)

宇宙科学においては、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ミッションの推進が基本である。コミュニティを中心としたミッション推進を基本としつつ、かつ、ミッションが大型化・高度化する中で我が国の宇宙科学計画を持続的に発展させるためには、ミッション群の段階的实施により技術をステップアップさせるための「プログラムの」戦略が不可欠である。JAXA 中期計画では2030年までのミッションが示されているが、2030年代以降と遠い将来までを確定的に予測することは難しい。しかしながら、科学的価値や実現可能性を総合的に鑑みて宇宙科学ミッションの将来展望を示し、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ことは可能であろう。そこで本章では、天文宇宙物理学・宇宙工学・太陽系探査の3分野において、次の4項目のいずれかに相当する重要技術を識別し、宇宙科学ミッションとの関連と技術の研究開発方針について記載した。

- A) 日本が実施する特徴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) 国際協働探査へと接続・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

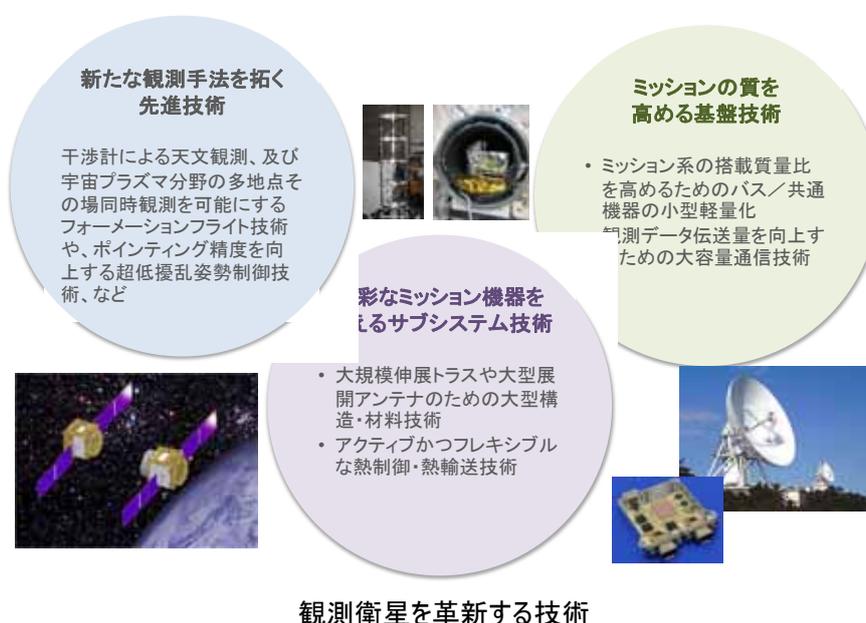
3.1 天文学・宇宙物理学

天文学・宇宙物理学分野では、前世紀以降、あらゆる電磁波の波長において観測研究の急速な発展があり、それに牽引された理論の進展によって我々の宇宙観は大きな変貌を遂げた。現在の天文学・宇宙物理学は、宇宙の物質・空間の起源と138億年の宇宙進化史を明らかにすること、系外惑星の形成過程の解明、そして地球外生命の探査を大きな目標としている。より具体的に、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、などが挙げられる。この先5-15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、SPICA 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。そのなかで、我が国の人的・経済的規模を考えた場合、そのまま世界の流れに追従して大型化の波に呑まれるのではなく、20年後を見据えて我が国独自の路線・戦略を採ることも重要である。具体的には、(A)

小型ミッションでも行える先鋭的なサイエンスを見極め、世界に先駆けて遂行する。小型ミッションに特化した挑戦的な技術の開発を進め、その先の巨大ミッション用の技術として世界に提案・提供することも念頭に置く。その一方で、(B) 巨大ミッションをリードすることは考えずに、世界がリードする巨大ミッションに、我が国が「存在感」を持って参画する。そのために、世界に誇れるキー技術を特定して伸ばし、戦略(A)を通して、宇宙用技術としての実績をあげる。戦略(A)では、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。

以上の観測手段を実現するための技術としては、宇宙用冷凍機技術の高性能化、軽量光学系技術、編隊飛行技術、ならびに干渉計技術が特に重要であり、下記に説明した。図では、観測衛星を革新する技術群、ならびに関連するロードマップを示した。

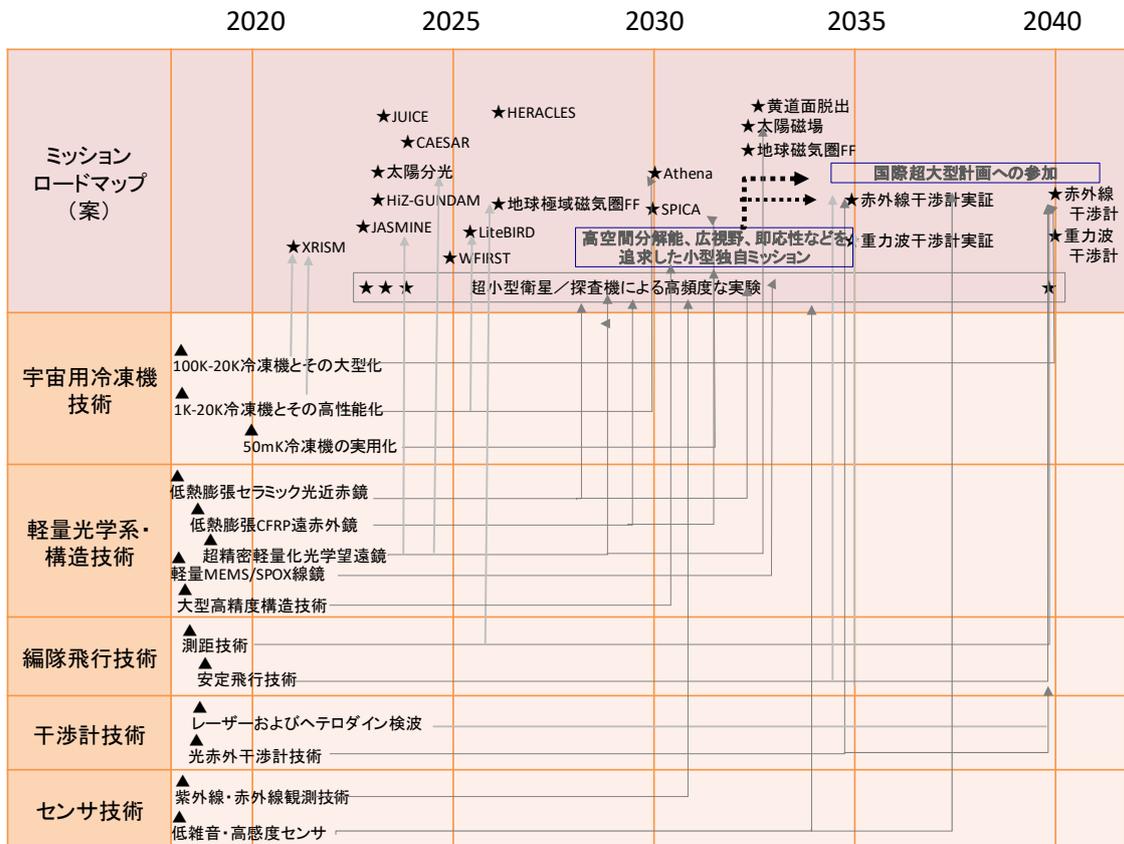


(1)宇宙用冷凍機技術

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 SPICA、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。



天文学・宇宙物理学の技術ロードマップ

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。

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されるため、「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

科学要求から、必然的に望遠鏡の有効面積は増大し、ミッションは巨大化していく方向にある。限られた搭載手段、厳しい打ち上げ振動環境、苛酷な熱環境という条件下での望遠鏡の軽量化というのは、地上観測装置にはない飛翔体観測での独自の要求となる。「あかり」望遠鏡をさらに軽量化し、口径1-1.5 m 級で重量20-30 kg の超軽量鏡を実現し、イプシロン級の小型ミッションで天文観測を可能にすれば、ミッション提案の可能性が広がる。

同様に、太陽観測など太陽系天体の観測においても、「ひので」で実現した精密望遠鏡の大幅な軽量

化を図り、中型望遠鏡(0.8-1 m 径)のイプシロン級小型ミッションでの実現を可能にすれば、搭載機会が限られるなかで、観測手段の革新と日本が得意とする高解像度観測を連携させ、今までにない特徴のある観測を実施できる。

(3)編隊飛行技術(フォーメーションフライト)

天文分野や 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。いずれの場合にも編隊飛行の要求精度は制御完了時で10%程度である。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 km と L/1000 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10 m 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、宇宙重力波干渉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イオンエンジンの研究も実施されているが、いずれも限定的である。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)干渉計技術

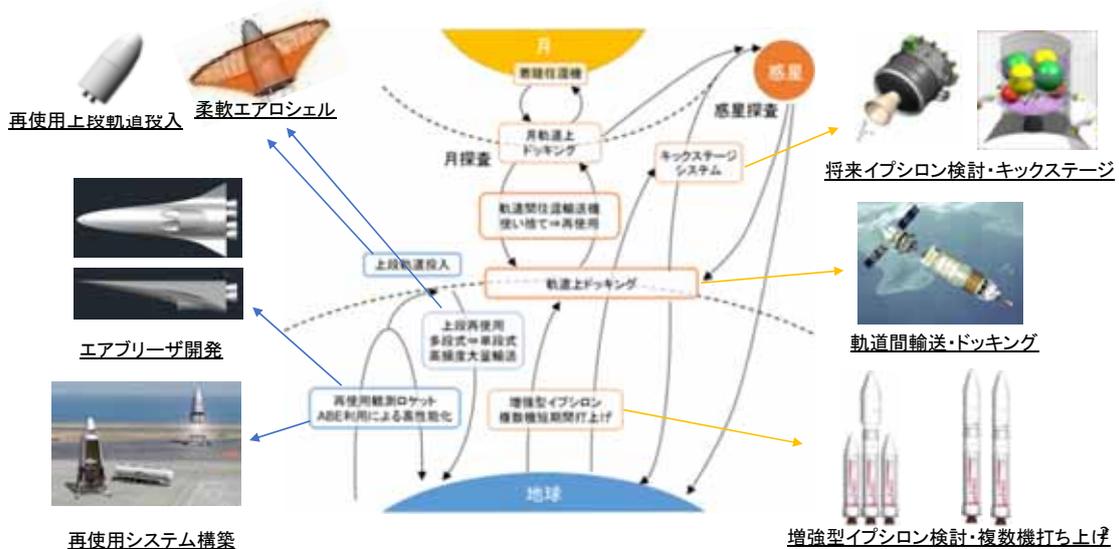
赤外干渉計の基線長は、遠赤外線で1 km 以上(ALMA 相当かそれ以上を目指す)、近・中間赤外線で10-100 m 以上(地上望遠鏡相当かそれ以上を目指す)が必要である。このとき編隊飛行に必要な精度は、遠赤外線で100 mm、中間赤外で10-100 mm、近赤外線で1-10 mm である。これらを実現するための技術としては、先に述べた編隊飛行技術に加え、高周波擾乱の制御技術、高精度な測距技術、長基線赤外線干渉技術、ナール干渉技術が必要である。

重力波干渉計では、基線長として100 km ないしは1000 km が想定されている。距離の絶対精度の要求値は500 m ないし5 km 程度であるが、0.1-10 Hz 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 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渉計技術、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年頃に干渉計ミッションの実施を目指すシナリオが考えられる。

3. 2 宇宙工学

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。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。それは以下に挙げる、宇宙輸送システムの革新、次世代探査・衛星技術、超小型探査機による深宇宙探査の3分野である。これらと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。

- 宇宙輸送系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軌道間輸送ネットワークを実現する。地球周回の小型宇宙科学ミッションを可能にしたイプシロンシステムを進化させた次世代イプシロンにて、高頻度な太陽系探査を実現する。また、ロケット再使用化の世界的潮流を作ってきた再使用ロケットの実証と探査への応用を推進し、地球近傍ならびに太陽系内各天体における軌道間輸送を実現する。二段式の完全再使用型宇宙往還機 TSTO を実用化し、低軌道への輸送コストを現在よりも2桁下げつつ、現在の航空機並に安全かつ効率的な運用を確立する。また、単段式の宇宙往還機 SSTO・有人輸送を実現する。軌道間輸送ネットワークは、チャーター便、定期便などの輸送サービスを実現することで、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なる。



宇宙輸送技術の革新

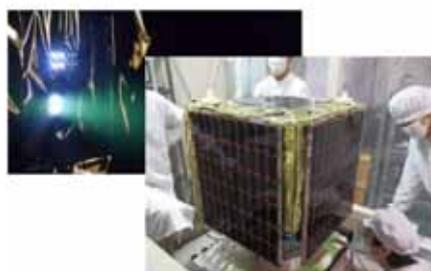
多様な宇宙科学の世界をカバーする軌道間輸送ネットワークの構築

- 太陽系探査・衛星技術においては、「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、2020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。その一方、小惑星以外の天体への日本独自の着陸は実現していないため、SLIM による月面へのピンポイント着陸を実施した後、火星等の重力天体への着陸技術の獲得と、木星・土星圏そしてより遠方の宇宙空間を目指した技術革新が、次世代の目標となる。

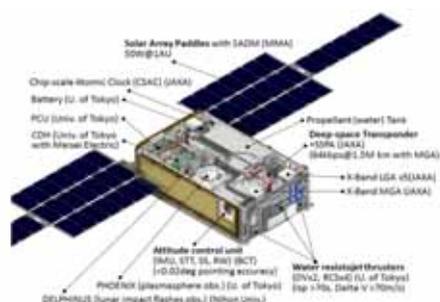


太陽系探査技術

- ポスト PROCYON 時代の超小型高機能探査機術を確立する。
 超小型で高頻度な宇宙探査を常態化させることで、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探査への挑戦を可能とするそのために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する。高機能の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。



世界初の50kg級深宇宙探査機PROCYON



EQUULEUSで狙う深宇宙CubeSatバス

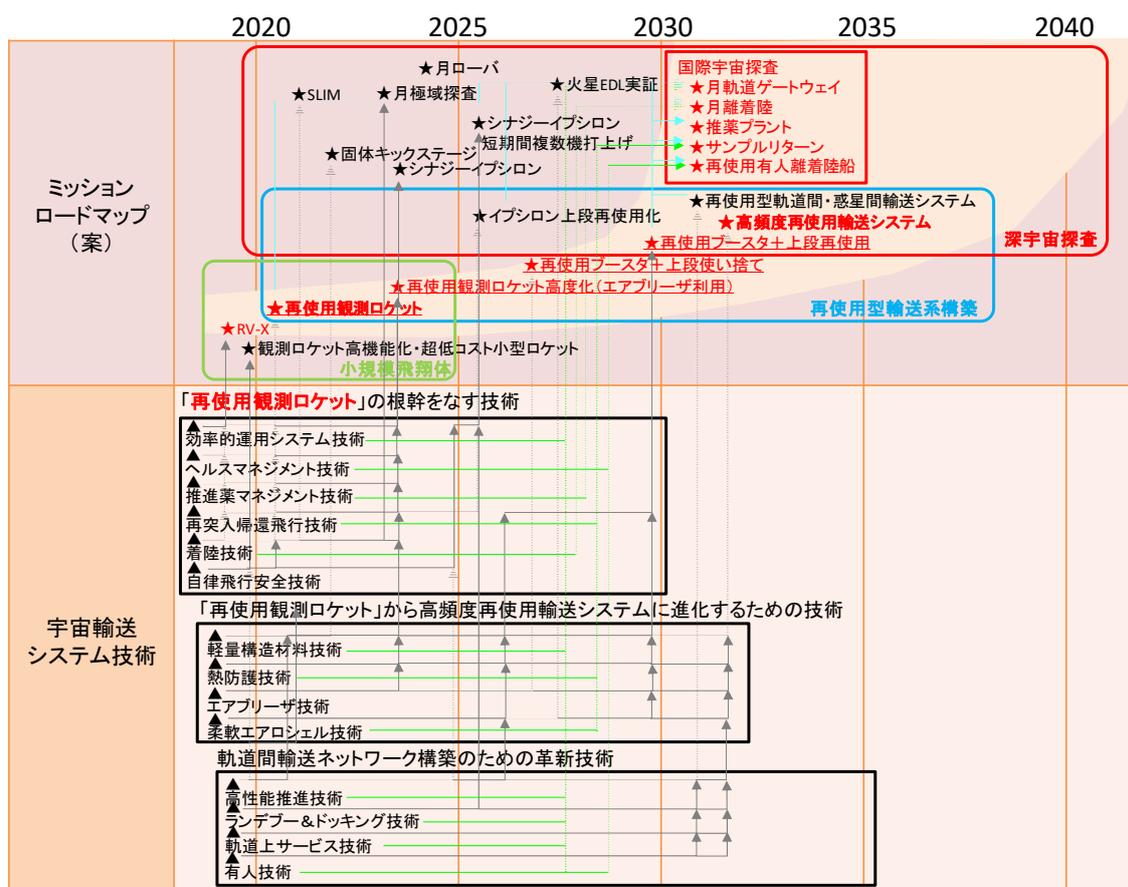
超小型探査機技術

東京大学等と ISAS が連携し、世界に先駆けて超小型衛星の活動領域を地球近傍から深宇宙空間へ拡大してきている。(右図:50kg級 PROCYONと10kg 級の EQUULEUS)

以下には、工学の3分野において重要となる技術について抽出し、ロードマップとともに記載した。

(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。

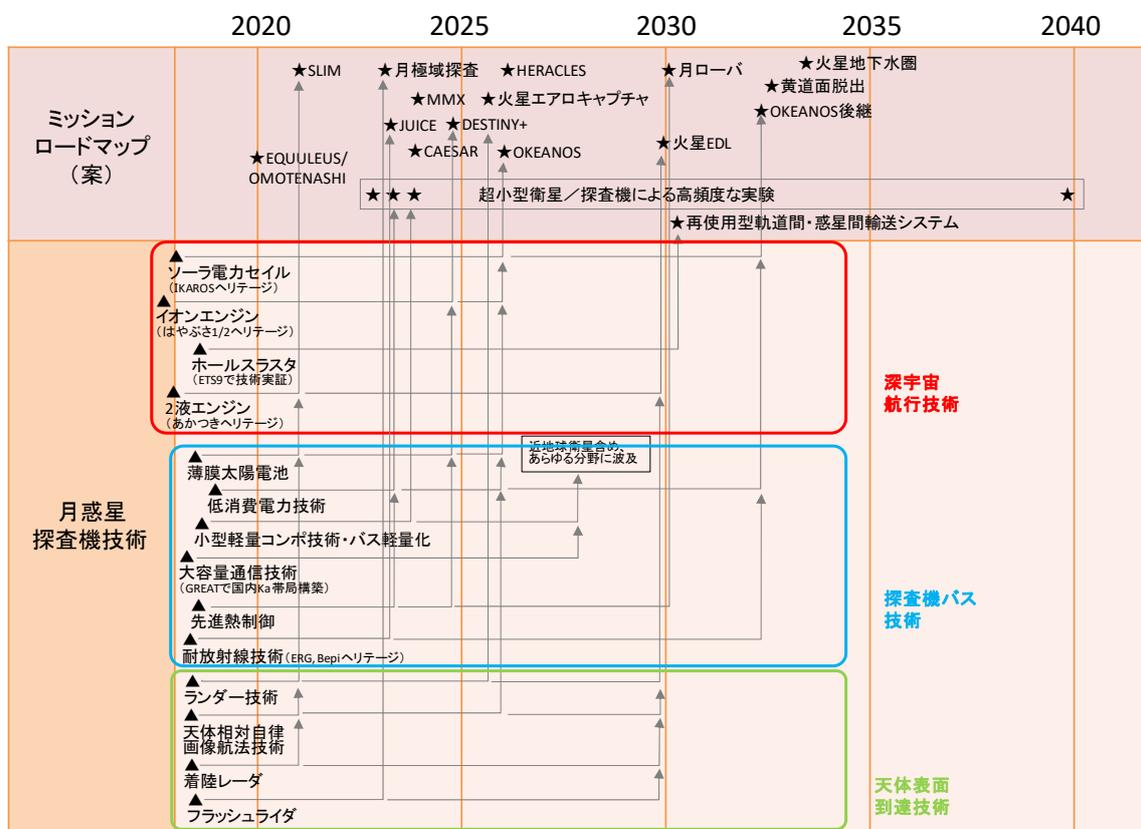


宇宙輸送システム技術のロードマップ

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。

(6)深宇宙航行・探査機バス技術

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と共に、黄道面ダストに影響されない赤外線天文観測が可能となる。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き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、望遠鏡など観測装置の軽量化も重要である。

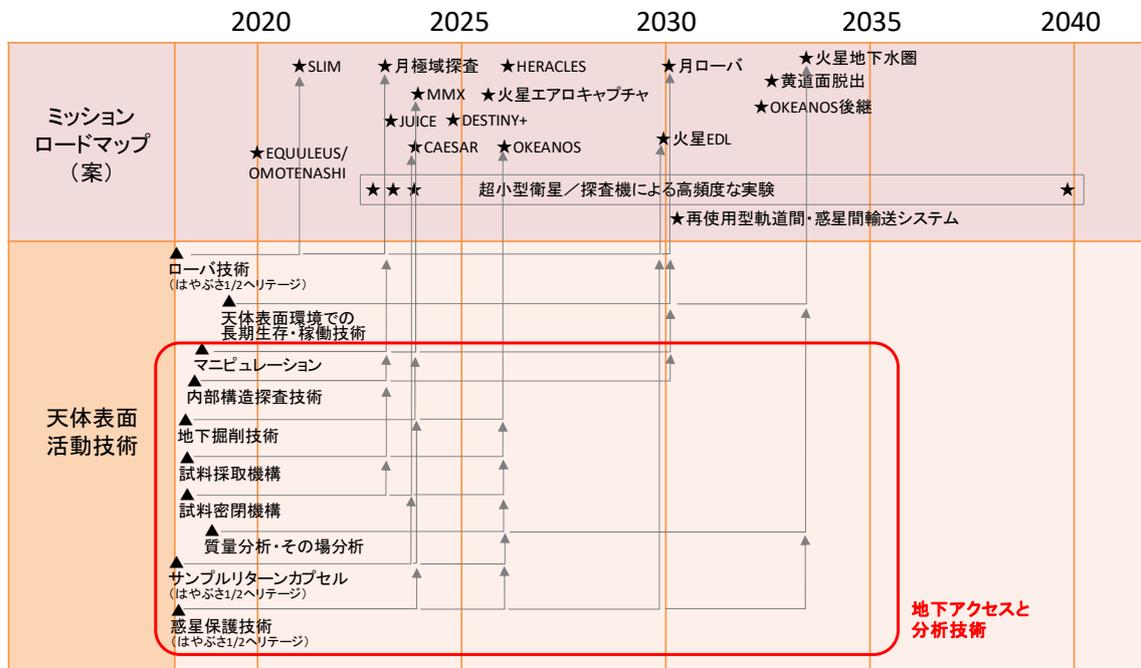


月惑星探査機技術の技術ロードマップ

より遠方の天体に到達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、OKEANOS で実現を目指すソーラー電力セイルや、イオンエンジンの高性能化（高比推力・高推力化）、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などに、高度な軌道決定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、高効率薄膜太陽電池、省電力などの電力技術の高度化が必要である。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。

(7)天体表面到達技術

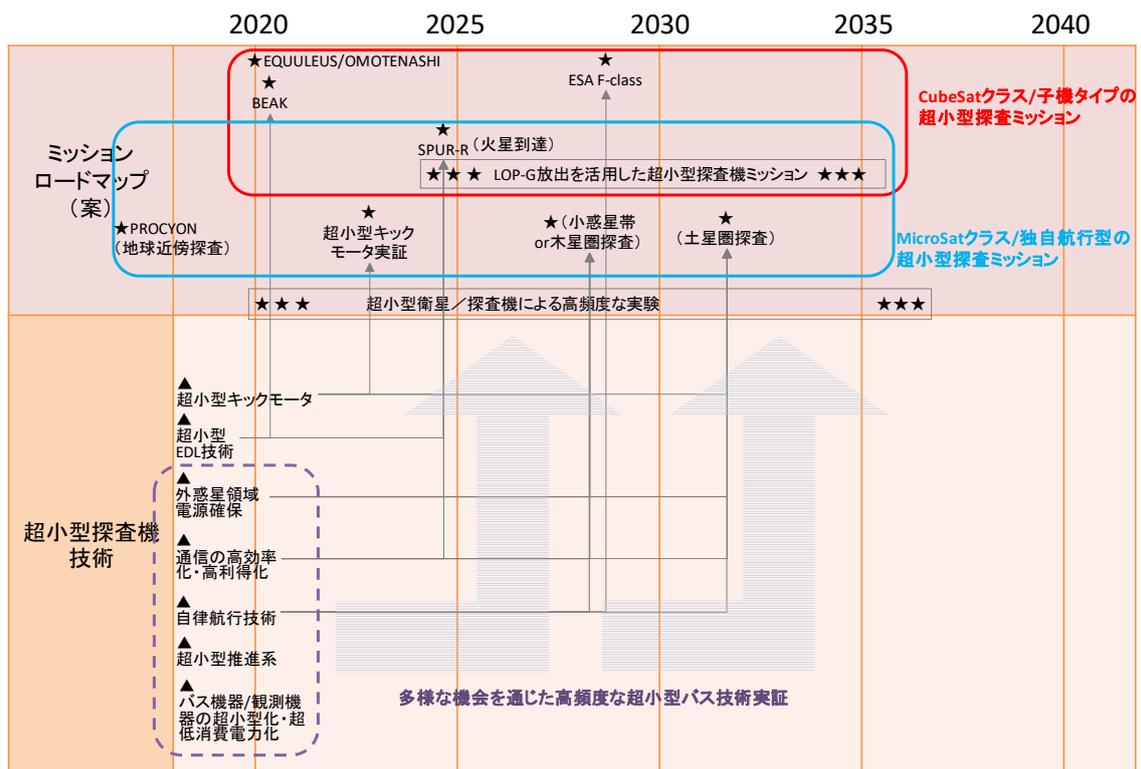
大気を持つ天体へ大質量をエントリさせる技術(エアロキャプチャや展開型エアロシェル等の先進的な手法も含む)に加え、SLIM で先鞭をつける高精度着陸を大気を持つ天体で行う技術を獲得する必要がある。さらに、天体表面環境での熱制御など長期生存・稼働技術と、天体上の各種の移動手段(長距離踏査ローバ等)による極限地形へのアクセス技術を獲得する必要がある。対象は月、小天体、火星、さらに遠方の天体である。火星においては、惑星保護技術も合わせて確立する必要がある。これらの技術を日本はまだ手にしておらず、2020年代後半に最初の EDL 実証を中型クラス以上で実現することがその後の本格火星探査のために重要である。



天体表面活動技術の技術ロードマップ

(8) 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。



超小型探査機技術の技術ロードマップ

3. 3 太陽系科学(太陽系探査・太陽圏科学)

太陽系科学分野において我が国が20年後以降に世界に伍した成果を出し続けるためには、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考える。

- 「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年代までの月着陸探査技術を発展させ、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輸送が実現することからの発展でもある。

- 「より遠くに」～外惑星領域の探査と遠方航行技術

OKEANOS を皮切りに、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電気推進による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。

- 「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。

「より自在に」パスの要は重力天体着陸技術の獲得である。月着陸に関しては SLIM により技術実証がなされるが、その後の科学探査のためにはローバや越夜などの技術獲得が必要であり、中・大型ミッションのプログラムの実施が必須である。火星着陸には空力制御や惑星保護など、月にはない技術的ジャンプがあり、月面で実績を積むだけでは火星表面には到達できない。火星サンプルリターンをマイルストーンとする欧米の火星探査に遅れをとらずに2030年代に独自の科学探査を実現するには、2020年代後半に EDL 実証を実現し、続けてローバを含むアクセス困難地域への着陸探査をプログラムの必要がある。来る有人火星探査時代においても、アクセスが困難な地域の科学探査は人類活動の拡大や生命の起源という根源的な問いへの回答として世界に資するものである。

一方、「より遠くに」パスは先端的な工学実験とセットで未踏天体探査を中核として進めるものであり、宇宙研を主体としたこれまでのような理工連携体制を基本とすることが有効と考えられる。はやぶさ・はやぶさ2・IKAROS・DESTINY+の実績をもとに、これまでの強みをさらに伸ばすという意味でも、宇宙研がここに注力するのは合理的である。ソーラー電力セイルを2020年代半ばに実現し、その実績をもとに、より挑戦的な外惑星領域の探査を2030年代に実現する。このパスの追求で獲得される技術群(高比推力、長寿命、遠距離高速通信・軌道決定、低温動作など)は、スノーライン以遠の探査のみならず、太陽系全域の多様な環境探査と、さらに将来の恒星間探査の創造においても基盤となるものである。

「太陽・惑星圏」パスにおいては、2020年代半ばに本格観測開始が予定される BepiColombo/みお、Parker Solar Probe、Solar Orbiter と相乗効果大きい太陽分光や太陽磁場観測を小型衛星で実現し、太陽圏内部領域(太陽表面～水星～地球)の多角的な探査を進める。さらに観測機器の小型化・軽量化を進め、2030年代には、JUICE が先鞭をつける外惑星の電磁気圏探査、ジオスペースや惑星間空間の多点同時編隊飛行ネットワーク観測、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など、研究の範囲を太陽内部から外惑星まで太陽圏全域に広げる。さらには、X線による磁気圏可視化等の新しい観測手段の実用化も進めていく。また、粒子加速などプラズマ物理現象の素過程に関する直接的な観測も、遠くの天体现象の理解にも寄与するものである。

探査のための重要技術については、3.2宇宙工学で抽出した「深宇宙航行・探査機バス技術」や「天体表面到達技術」等が理工学で共通する重要技術であり、理工で共通する重要技術として宇宙工学の節でまとめて示した。以下は地下アクセスと分析技術について記載した。

(9)地下アクセスと分析技術

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、OKEANOS 着陸機で開発中の高質量分解能質量分析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。外惑星領域の探査に向けては、内部海ブリュ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。

3. 4 戦略的に獲得すべき宇宙科学技術リスト

前節までで抽出された戦略的に開発すべき技術の一覧を以下に示す。

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	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) 宇宙用冷凍機技術の高性能化					
100K-20K冷凍機の大型化 ・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	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8に達しているが、これらは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ソープションは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い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	TRL8 (4K) TRL5 (1K)	4KJTは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、Athena/SPICA/LiteBIRDでの使用が予想され、近々に実証が必要である。ただし、運転の自動化など制御系はまだ改善の余地があるものと思われる。
100mK級冷凍機の開発 ・ADR/希釈冷凍機などの開発	天文学	B	2020年代半ば	4KJTは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、Athena/SPICA/LiteBIRDでの使用が予想され、近々に実証が必要である。ただし、運転の自動化など制御系はまだ改善の余地があるものと思われる。	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Astro-Hなどで利用され、LiteBIRDでも搭載予定である。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あるいは将来のキャン観測衛星のために連続観測が可能で希釈冷凍機等の技術開発を行な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ている。

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	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
(2) 軽量光学系技術					
可視・近赤外線望遠鏡 ・低熱膨張セラミック鏡	天文学・惑星科学	B	2020年代中盤	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）、「あすなる」（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	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	天文学・惑星科学	A,B	2020年代中盤	TRL3	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Al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Al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基板で実現する。(1)は超小型衛星に搭載する超軽量X線望遠鏡として、(2)はsuper-DIOS、(3)はFORCEに向けて開発が進められている。
太陽観測用の光学望遠鏡の超軽量・小型化 ・80cm-1mクラスをイプシロンに搭載可能に ・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年代初め	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、過熱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。

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	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
(3) 編隊飛行技術 (フォーメーションフライト)					
測距技術	赤外干渉計	A	2020年代後半	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	A	2020年代後半	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以内で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?	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、ブルーファズを可動範囲(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。
低擾乱制御技術	重力波干渉計	A	2030年代?	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 $1E-18$ m/sqrt(Hz)程度である必要がある。
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年代初め	TRL4	多数の宇宙機間で相互に通信し、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退避し、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、安全監視と自動退避技術を実証した。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。

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	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
(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	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事が可能な光学系を完成させた。
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	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。

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	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
(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	太陽系探査 地球周回観測 ミッション	B,D	2020年代初め	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モータ 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 有化し低コスト化を図る。また上 段再使用化によるさらなる低コス ト化を図る。
システム設計技術 (最適化/高信頼化 /寿命管理等)	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	TRL3-5	再使用実験機、再使用観測ロケッ ト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	TRL3-5	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 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	TRL3-5	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 ケットなどによるシステムレベ ルでの飛行実証を行う
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	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	TRL3-4	地上構造試験、地上真空熱環境試 験、飛行実証
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	TRL3-4	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 ケットなどによるシステムレベ ルでの飛行実証を行う 地上高エンタルピ風洞試験、地上 真空熱環境試験、飛行実証
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	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
空力制御技術(フ [®] ラス [®] マアクチュ 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	TRL3-4	要素レベルでの研究開発ととも に、実験機によるシステムレベ ルでの飛行実証を行う
高性能推進技術(デ トネーションエンジ 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	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

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	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
(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)	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	TRL3	極低温推進薬長期保存技術研究 (戦略研究) H-11A上段高度化、HTV 技術試験衛星(ETS7) 今後、要素レベルでの研究開発とともに、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、実験機などによるシステムレベルでの飛行実証を行う
ソーラー電力セイル	太陽系探査	A, B	2020年代初め	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)	太陽系探査	B	2020年代初め	TRL3-4 (DESTINY+)	DESTINY+ではやぶさ2の2倍の航行能力を獲得
ホールスラスタの深宇宙適用	太陽系探査	B, C, D	2020年代中頃	TRL4	ETS9向けホールスラスタを開発中
二液推進系エンジン	太陽系探査	B, C, D	2020年代初め	TRL5 (SLIM)	あかつき、SLIMでセラミックスラスタを実証 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)
大電力薄膜太陽電池	太陽系探査	B, C, D	2010年代後半	TRL4-7	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) 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宇宙科学技術プログラム委員会の枠組みで実施。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	一筐体・多機能コンポーネントや、MEMSによるワンチップ化や高密度実装を用いた小型軽量化、ドライバや電力供給部(PSU)の高効率化の試作などの研究開発を実施中(戦略研究)
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。
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年代半ば		現在の標準小型バスは250kg級。バス機器の中には軽量小型の機器の開発が進んでいるものもあるが、組織的な検討は行われていない。 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。

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	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
(7)天体表面到達技術					
天体相対自律画像航法技術	太陽系探査	A, B	2020年代初め	TRL4 (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 (フォボス)
着陸用航法センサ	太陽系探査	A, B, C	2020年代初め	TRL4 (フラッシュライダー)	フラッシュライダーは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。
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	TRL4 (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)。展開型エアロシェ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	TRL8-9 (MINERVA-2) TRL4 (SLIM LEV)	対象天体に合わせて移動機構等を最適化 はやぶさシリーズのMINERVA SLIM搭載予定の小型プローブ (LEV)
先進熱制御技術	太陽系探査	B, C, D	2020年代初め	TRL3-4	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

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	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
(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年代後半	超小型衛星向けブーム展開型セイル実証予定 (Origamisat, 2019)	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。ただし、超小型探査機に適用可能な形では、Origamisatのブーム展開型セイル(2019実証予定)のみ？
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	CubeSat向け1W級OBCは開発済み(打ち上げ待ち)	CubeSat向け1W級OBCをEQUULEUSで開発。2019以降実証予定。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年代前半	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年代後半	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	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(水レジストレット)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	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。2021年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	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(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	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が極めて重要だが、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線パ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)。
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	2025年後半	波動: TRL 5-6 粒子: TRL 2-3	波動: 京都大学、金沢大学において、受信器部、プリアンプ部の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ロケット実験に搭載されるLFASに組み込まれており、宇宙実証実験の準備が整っている。 粒子: 宇宙研において超小型エネルギー分析部のBBMレベルの検討・開発が行われている。

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	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
(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	2020年代中頃	TRL3-4	SELENE-2 2m級マニピュレータ MMXサンブラ、など
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) 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2018年段階でTRL5-6 (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 (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) 2020年代初め (2) 2030年代初め	(1) MMXで円筒コアサンブラ開発中 (2018年段階でTRL3) (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 (ミミス方式) 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	2020年代初め	(1) はやぶさ2で宇宙実証 (2019年でTRL9) (2) OKEANOSでニューマチックドリル開発中 (2018年段階で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年代初め	SELENE-R/ヘラクレスに向けて開発中	
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年代初め (2) 2020年代初め	(1) 弾丸射出&スクープ型ははやぶさ2で宇宙実証 (2018年でTRL9)、ガス噴射型はOKEANOS着陸機で開発中 (2018年段階TRL5)、(2) 超高速衝突微粒子はたんばぼで宇宙実証 (2016年でTRL9)、低速衝突微粒子はCORSAIR彗星核SR計画でBBM開発 (2018年段階でTRL3)	(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：たんばぼFM開発 (~2013年)、海洋天体プリューム微粒子サンブラBBM開発実験 (2015年~)、低速衝突微粒子：CORSAIR-Coma Dust Sampler BBM開発 (2013~2018年)
試料密閉機構 (重力天体)	月・火星着陸探査	A	2020年代初め	SELENE-R/ヘラクレスに向けて開発中	
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年代半ば (2) 2020年代後半	(1) はやぶさ2サンブラでFM宇宙実証 (2020年でTRL9) (2) OKEANOS着陸機サンブラ用試料密閉容器BBM (2018年段階でTRL4) & 海洋天体プリューム微粒子用密閉分析容器BBMを開発中 (2018年段階でTRL2) (3) 米CEASER用地球帰還カプセルBBMを開発中 (2018年段階で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 (2015年~)、海洋天体プリューム微粒子サンブラBBM開発実験 (2018年~) (3) CEASER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	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
(9)地下アクセスと分析技術					
質量分析等その場物質分析技術 (1)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 (2)生命活動兆候検出用のその場観測装置 (3)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年代初め (2)2020年代半ば (3)2020年代後半	(1)OKEANOS着陸機でその場分析用MULTUM質量分析装置BBMを開発中(2018年段階でTRL4) (2)海洋天体ブリューム微粒子サンプラと軌道上分析装置BBMを開発中(2018年段階でTRL3) (3)火星着陸探査用生命検出顕微鏡(LDM)BBMを開発中(2018年段階でTRL4)	(1)OKEANOS着陸機用MULTUM-BBM試料採取&分析実験(2015年~) (2)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~)&国際海洋天体探査に機器参加して、早期から研鑽を積む(2020年代半ば) (3)LDM-BBM模擬火星土壌試料分析試験(2015年~)
サンプル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)火星の特別な場所に着陸機を活動可能にする滅菌・汚染管理技術 (3)火星&海洋天体への衝突を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)2020年代半ば (2)2030年代初め (3)2020年代後半	(1)SLIMで大気なし重力天体のピンポイント着陸のFM実証(2021年にTRL9)、地上風洞・高層大気での模擬火星大気飛翔実証(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FM実証(2018年段階でTRL3) (3)はやぶさ2で火星衝突回避軌道計算でCOSPARカテゴリ承認を取得(2014年段階でTRL9)、OKEANOSで外惑星領域小天体への近傍運用(2018年段階でTRL3)	(1)SLIMでFM開発(~2019年)、EDLミッションでFM開発(~2020年代半ば?) (2)OKEANOSでFM開発(2020年代初め) (3)はやぶさ2で宇宙実証(~2015年)、OKEANOSでFM開発(2020年代初め)
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	2020年代半ば	(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(2018年段階でTRL2) (2)はやぶさ2で採取試料の「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(2010年でTRL9)、はやぶさ2で同左実証(2020年で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・同試料の長期保存技術は、海洋探査等より技術移転(2018年段階でTRL2)	(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~)&国際火星着陸探査や国際海洋天体探査に機器参加して、早期から研鑽を積む(2020年代半ば)、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(~2020年)、MMXでFM開発(2020年代初め)、JAMSTEC等近隣分野機関との連携(2012年~)