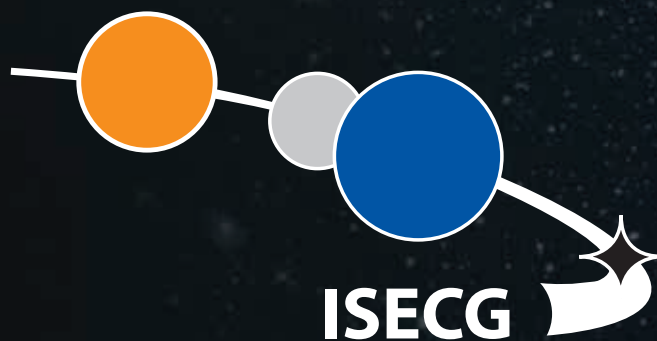
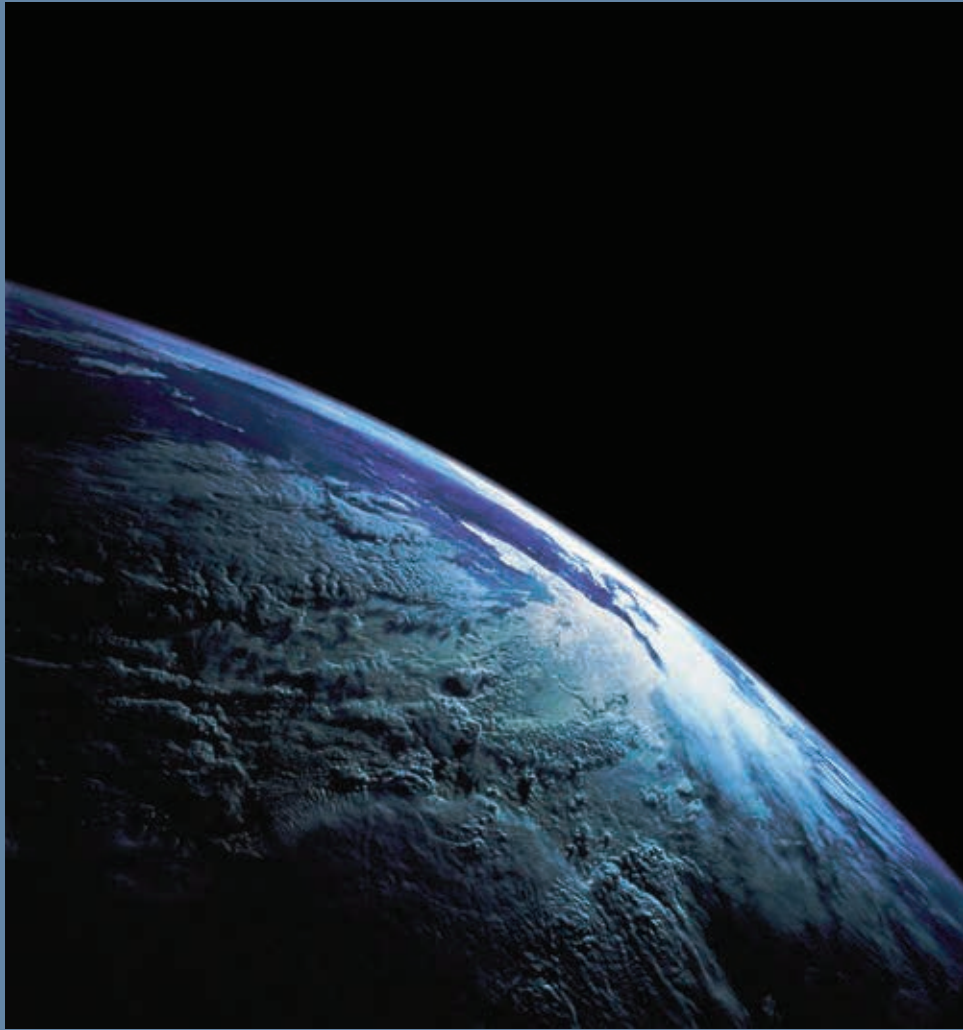


国際宇宙探査 ロードマップ

2013年8月



国際宇宙探査協働グループ



「地表は、宇宙という大海の岸辺である。
私たちはそこから知識の多くを学んでいる。
近年、私たちはようやく大洋に向けて足を踏み出したが
つま先か、せいぜい足首を濡らした程度に過ぎない。
海の水が私たちを誘っている。海が私たちを呼んでいる。」

— カール・セーガン博士

国際宇宙探査 ロードマップ

国際宇宙探査協働グループ(ISECG)に参加している宇宙機関により、国際宇宙探査ロードマップ作成作業が続いている。このロードマップは、「グローバル探査戦略：国際協働のための共通の認識（2007年5月）」において確立された、太陽系の有人－無人協働宇宙探査ビジョンに基礎を置いている。国際宇宙探査ロードマップは、国際宇宙ステーション（ISS）に始まり、月、地球近傍小惑星および火星へとつながる国際協力宇宙探査ミッションに関する国際調整結果を反映したものである。有人宇宙探査はその困難さが故に、国際的努力によってこそ多大な成功が得られると宇宙機関は認識し、また有人宇宙探査を推し進めることは、地球上の人々に対して、重要な社会的、知的および経済的利益をもたらすと考えている。この文書は、宇宙機関による宇宙探査ロードマップ作成作業の状況を表している。この検討結果をより広いコミュニティと共有し、今後待ち受ける困難に対応するための革新的な考えや解決策を得られるよう、宇宙機関は努めていく。



国際宇宙探査ロードマップ

第2版での変更点

2011年9月に公開された国際宇宙探査ロードマップの初版に基づき、将来、人間の生活と仕事の場となる可能性を秘めた天体を目指した宇宙探査について世界の宇宙探査の利害関係者が国内的・国際的な協議を重ねてきた。その話し合いを通じて得られたアイデアや見直しは、宇宙機関の検討にフィードバックされ、今回の第2版に含まれる変更点につながった。

ロードマップ初版では、火星有人探査を最終目標とする2つの可能な道筋——「次は小惑星」および「次は月」——を示した。それぞれの道筋は、ミッション・シナリオ構想としてまとめられ、これに基づき調整を行った。この調整結果を元に、2013年のロードマップ第2版では一つの基準ミッション・シナリオにまとめるとともに、火星有人探査に向けて少しずつ複雑となっていく月や小惑星探査ミッションの実施には、必要な主要技術を段階的に開発していくことが重要であることを示した。第2版のロードマップでは、初期の探査能力構築により、持続的な有人宇宙探査に必要な国際的な協力関係の構築に貢献すると同時に、各宇宙機関及び国際共通の目的と目標に応える月近傍の多様なミッションを如何に可能とし得るかを示している。

参加宇宙機関は、地球低軌道以遠への有人宇宙探査の準備を続けている。第4章では、ISS利用、無人探査、先進技術開発、次世代システム開発、および地上類似環境実験の5分野に関する、最近の成果の説明を加えて充実させた。さらに第6の分野として、飛行士の健康およびパフォーマンスのリスク軽減に関する記述を加えた。



イタリア宇宙機関



フランス国立
宇宙研究センター



カナダ宇宙庁



ドイツ航空宇宙センター



欧州宇宙機関



インド宇宙研究機関



宇宙航空研究開発機構



韓国航空宇宙研究所



米国航空宇宙局



ウクライナ国立宇宙機関



ロシア連邦宇宙局

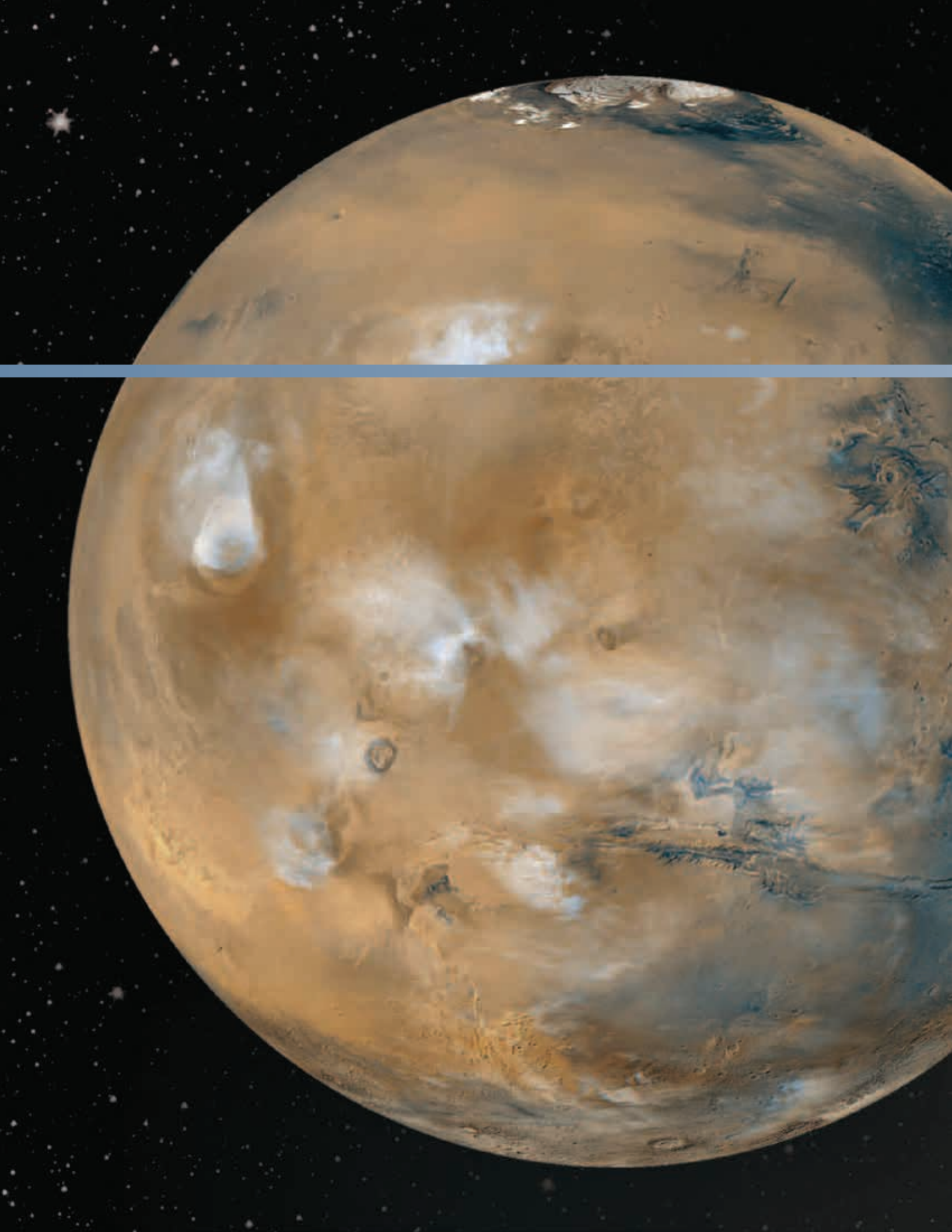


英国宇宙庁



目次

エグゼクティブサマリー	1
第1章： はじめに	7
第2章： 宇宙探査の共通目的と目標	9
第3章： 長期的な有人探査戦略	13
第4章： 有人探査に向けた準備活動	25
第5章： 結論	41





エグゼクティブ サマリー

ISECG参加宇宙機関は、将来人間の生活と仕事の場となる可能性を秘めている天体への有人・無人探査の計画を進めており、この国際宇宙探査ロードマップはそれらの活動をまとめたものである。人類が、持続的で、現実的な予算で、成果が見える形で火星表面探査を可能にすることが長期目標であり、我々はその長期目標に向けて当面の活動計画を立てていく。また、この目標によりシステム開発や技術投資の内容が特徴づけられている。有人火星探査へのロードマップは、人類の存在領域を拡げ、月や地球近傍小惑星を含む多くの天体の探査を可能にする。

国際宇宙探査ロードマップは、1) 共通目的と目標、2) 長期の有人探査戦略、および 3) 探査準備活動の調整、の3つの分野での国際調整結果をまとめたものである。各機関に共通する探査目的と目標を理解し、可能な長期探査シナリオの協働検討に参加することにより、各宇宙機関は、それぞれの短期的探査計画立案や、将来ミッションにおける国際協力検討に役立てることができる。

国際宇宙探査ロードマップ

国際宇宙探査ロードマップは、ISSに始まり、人類の存在領域を太陽系へと拡大し、有人火星探査を最終目標とする、共通の長期有人探査戦略をまとめたものである。また、このロードマップでは、その戦略実現の第一歩として(1) ISSの探査に向けた利用、(2) 有人ミッションと無人ミッションの相乗効果拡大、(3) より遠方へ行くための能力と技術を発展させる発見目的の月近傍ミッション、に焦点を当てている。これらの第一歩を行うことにより、深宇宙および火星系への持続的なミッションが可能になるであろう。

国際宇宙ステーション

ISSはその特殊な位置を活用して、研究や技術実証の機会を提供している。さらには、宇宙へ人類が進出するための重要な技術を発展させ、有人宇宙飛行のコストを下げることで探査の基盤ともなっている。

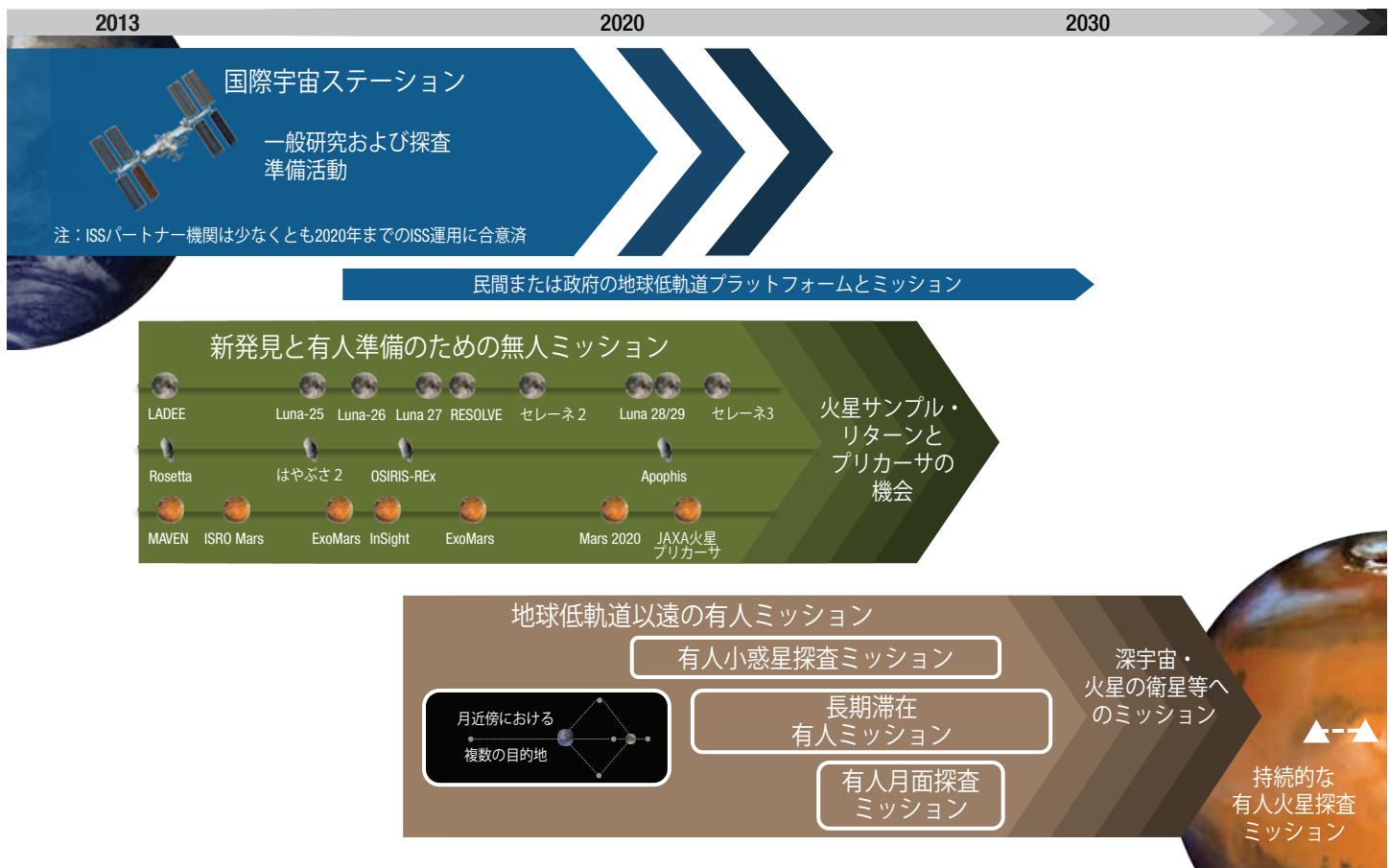
無人探査ミッションによる発見と準備

無人探査と有人探査との相乗効果を高めることは、宇宙探査の目標・目的達成に向けた各ミッションの貢献度を上げることになるであろう。無人探査は新しい発見をもたらし、月、小惑星および火星についての知見を助け、後に続く有人探査をより安全でより効率的にする、有人探査の先駆者となるであろう。

地球低軌道以遠の有人探査

月近傍および月面上の有人探査により、国際パートナーが月や地球近傍小惑星の有人探査を行いつつ、将来の火星探査ミッションに必要な技術を発展させることができるであろう。火星ミッションには、高い信頼性の輸送技術、居住技術およびその他の重要技術が必要であり、これらの技術は月近傍および月面で発展させることができる。深宇宙ミッションは、新しい知識を元に、新しい技術によって強化されたものとして、今後具体的なミッションとなっていくであろう。

国際宇宙探査ロードマップ



共通の目的と目標

国際宇宙探査ロードマップは、各機関の優先度を尊重しつつ、それらに共通性を反映した一連の目的とこれらを支える目標に重点をおいてまとめられている。また、いずれの探査目的と目標も、地上の人々に利益をもたらす大きな可能性を示している。以下に示す共通の目的と目標は初版とほぼ同じで、科学探査と有人探査における目的と目標の相乗効果を示している。



ISSのクリス・ハッドフィールド船長が、ISSで行う研究活動の重要性を説明している。



2014年打上予定のJAXA はやぶさ2の機体製造が始まった。



ロボット操作は、惑星面探査への挑戦が如何に世界中の学生の心を引きつけるかの良い例である。



火星レウル渓谷地域のESAマーズエクスプレス画像。遠い過去に流水によって形成されたと思われる、総延長約1,500kmの川のような構造を示している。

探査技術と能力の開発

先進技術、高信頼システム、および地球環境外での効率的な運用方法の開発・試験を通じて、地球低軌道以遠の探査目的地で活動するために必要な知識、技術、およびインフラを開発する。

一般市民の探査への参加

一般市民が双方向的に宇宙探査に参加する機会を提供する。

地球の安全性の向上

地球への小惑星衝突と軌道上の宇宙ゴミに関する国際協力による管理システムを構築し、地球の安全性を向上させる。

人類の存在領域の拡大

地球低軌道以遠の様々な目的地の探査を行いながら飛行士の人数を増やし、滞在期間を延長し、自立レベルを強化する。

有人探査を可能にする科学の研究

宇宙環境が人の健康や探査機に及ぼす影響を明らかにして、太陽系における将来の探査ミッションのリスクを軽減し、効率を向上させる。

宇宙科学、地球科学、および応用科学の研究

太陽系の様々な目的地での科学調査を行うとともに、その目的地に固有な環境での応用研究を実施する。

生命の探索

地球外生命が存在するか、または存在していたかを判断し、それらの生命を維持し、または維持していた環境を把握する。

経済拡大への刺激

民間企業からの技術、システム、ハードウェア、およびサービスの提供を支援または奨励することで、宇宙活動に基づいた新規市場を創出することになる。この活動により、経済、技術、および生活の質に関する利益を人々に還元する。

長期有人探査戦略

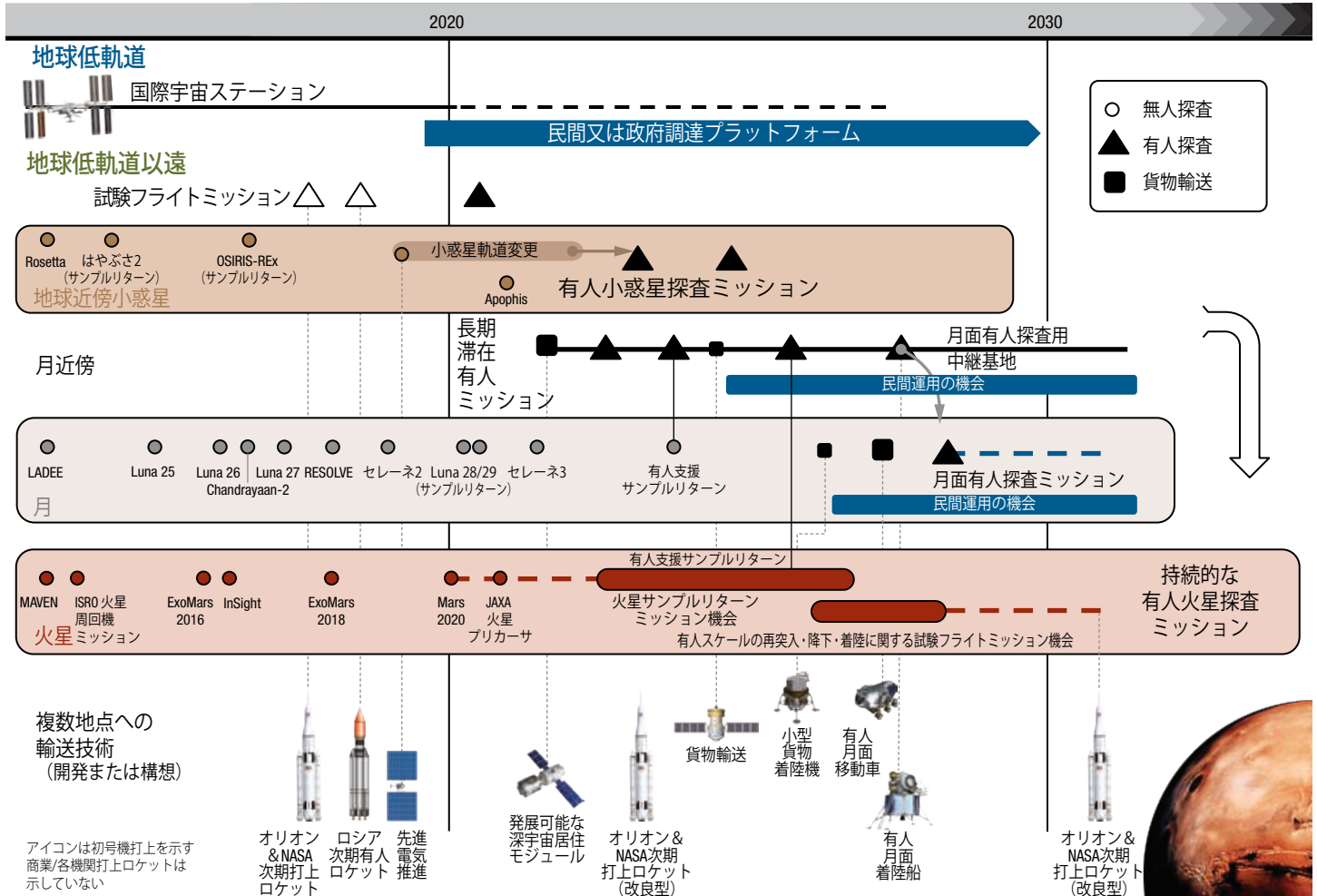
宇宙機関は、火星へ至る様々なシナリオを検討し、地球低軌道以遠の有人探査に必要な技術の研究を続けている。ISECGのミッション・シナリオは、有人火星探査に関心のある宇宙機関がそれぞれの状況で優先するミッションや研究を実施することで、火星探査への重要な貢献に備えることを可能にしつつ、共通の目的と目標をもって進めていけるよう国際調整した結果をまとめたものである。すべての国が、このロードマップに描かれたすべての要素あるいはミッションに参加する必要はないであろう。多くの宇宙機関がその技術能力と専門知識で貢献すれば、持続的な火星有人探査ミッションは可能であろう。さらには、民間サービスと官民協力により長期的な持続性も高まるかもしれない。

ISECGミッション・シナリオでは、開発が進められている、あるいは概念検討されている探査システムを用いて、2030年

以後の有人火星探査に向けての準備となるように月近傍や月面上のミッションを定義している。月近傍での長期滞在有人ミッションとアクセスを容易にした小惑星への探査ミッションにより、様々な発見が可能になるとともに、深宇宙への長期ミッションが必須とする輸送、居住、支援ロボットおよびその他の重要システムの技術実証ができるようになるであろう。また、月面有人ミッションにより、月科学の最優先研究目標を追求しつつ、惑星探査技術・能力の重要な技術実証ができるであろう。

このミッション・シナリオでは、探査共通目的・目標を達成しつつ、有人ミッションと無人ミッションの相乗効果を高める構想が進展するよう、無人と有人探査の一体化を進めた。ISECGミッション・シナリオは、研究活動やその他の探査事前準備活動の情報を提供し、宇宙機関の計画検討の参考となるものである。

ISECGミッション・シナリオ



有人探査準備活動

全世界の技術者と科学者は、人類の活動領域を宇宙へ広げるため、必要不可欠な多くの準備活動に取り組んでいる。共通ロードマップの策定により、各機関はその短期投資を適切に調整し、協働して活動するようになり、投資効率を最大限にし、各機関の目的と目標が早期に実現することを目指すことが可能となる。以下の分野において重要な活動が進められており、このロードマップではそれらの調整と協力の機会が示されている。

ISSの探査への活用

ISSは将来の探査ミッションの準備をするための優れたプラットフォームである。探査技術、人の健康の研究および運用シミュレーションの分野で新しい研究が計画され、その多くでISS搭載運用実験が始まっている。探査に必要な性能を目標に、質量低減、低電力化、および高信頼化などのISSを支える重要技術も改良されていくであろう。

無人探査

先行無人探査ミッションは、有人探査を安全で効率的に行うための戦略的知識の不足を補い、後に続く有人探査の投資に対する最大限の成果を確保するために不可欠である。科学と有人探査目標のための有人探査と無人探査の相乗効果を高める活動は優先的に進められる。

先進技術の開発

いかなる機関も、単独で地球低軌道以遠の有人ミッションを実施するための主要な技術課題すべてに十分な投資をすることは不可能である。技術開発と実証への各国の投資を適切に活用する機会を作ることが、ロードマップ作成に参加した宇宙機関の課題であった。

新世代の宇宙システムとインフラの開発

地球低軌道以遠への有人探査には、既存技術を基にして今後開発される技術を取り入れた次世代技術とシステムを必要とするであろう。次世代の有人輸送システムの初期試験飛行準備が着々と進められる一方で、他の重要技術の研究が宇宙機関によって続けられている。

探査目的地を模擬した地上類似環境実験

地上での類似環境における実験は、探査システムの設計とミッションコンセプトの改良を可能にし、地球低軌道以遠の探査の準備に役立っている。各機関はそれらの実験からの教訓や今後の地上実験計画を共有しつつ、これらの実験の成果を最大限に活用しようとしている。

宇宙飛行士の健康管理とパフォーマンスリスクの管理

長期滞在ミッションおよび惑星面活動はクルーの健康とパフォーマンスに多大なリスクをもたらす。各機関はこれらの影響とその対処療法や生物医学的診断などのリスク緩和のための技術の可能性を研究しているが、多くは今後の課題として残されている。



2014年試験飛行に向けて準備試験中のNASAオリオン宇宙船



ASIは火星着陸地点環境の特性測定機器システムDREAMS（火星表面ダスト特性、リスク評価、環境解析器）を開発している。

結論

国際宇宙探査ロードマップは、将来の探査ミッションに向けた準備活動が引き続き進められていることを示した。月、小惑星および火星の有人探査は、新しい知識を発見し、人々を啓発し、イノベーションを励起する、との共通の理由で国々を結集させ、人類の未来を確固たるものとするであろう。より多くの国家が宇宙探査活動に参加してくるにつれ、それぞれの目的を達成するためには協働することが重要であることに気づいてきた。この文書は、火星有人探査での重要な役割に関心ある国々が徐々にそれぞれの技術を発展させることが可能になるような道筋に沿った国際ロードマップである。国際宇宙探査ロードマップは、宇宙を探査するという挑戦課題に取り組むには、政府・民間を問わずすべての利害関係者の最善の努力が必要であろうという総意を表している。

そのような努力に向けて、宇宙機関の主要所見を下記のようにまとめた：

1. 数十年間にわたって持続的な有人宇宙探査事業を構築するために、各宇宙機関のリーダーは、宇宙探査が国民へ明確な成果をもたらすように注力しなければならない。
2. 各宇宙機関は、ISS、月近傍、月面、あるいは無人での国際協力ミッションが将来の国際火星ミッションのシミュレーションや準備として活用され、結果として複数のパートナーが将来の有人探査に主要技術で貢献できるようになることを期待している。
3. 宇宙探査の共通目標達成における宇宙飛行士の存在意義を高めるために、有人支援サンプル・リターンや遠隔操作のような新しいミッション構想がさらに検討されるべきである。
4. 無人科学ミッションにより地球低軌道以遠の有人探査の準備に必要なデータを得ることができる。無人探査で得られた計測データが科学の進展および有人探査準備の両方に役立っていることは、科学と探査の両コミュニティによって一般的に認められている。
5. 各機関は、長期滞在探査ミッションにおけるクルーの健康とパフォーマンスのリスクに対し、リスク対策に必要な重量／体積リソースの削減とリスクを許容範囲にする努力を優先して、その軽減対策の国際協力を推進すべきである。

国際宇宙探査ロードマップは、宇宙探査に関して利害関係を有する有人宇宙飛行、科学、教育、およびその他のコミュニティとの対話を進めるためのものであり、それにより利害関係者の最優先目標・目的を満たすよう発展させていくものである。ISECGミッション・シナリオ構想に基づく国際協力活動により、宇宙探査計画が強化され、また有人システムと無人システムが互いに補完しあう技術によって、人類にとってこの非常に野心的な宇宙探査の挑戦が可能になるであろう。また、このロードマップは、国際協力による有人宇宙探査、無人宇宙探査への政府支援を強固にし、かつ宇宙機関と政府間合意への技術的なベースラインとなるであろう。



NASAミコード組立施設（ルイジアナ）の円形ドーム溶接ツールによって、12枚のパネルからSLS第1段ステージが組立てられる。

第1章 はじめに



2011年9月の国際宇宙探査ロードマップ初版公開以来、各機関は宇宙探査目標に向かって前進を続けている。各機関は、無人探査機を打上げ、あるいは無人探査機開発を開始し、ISS上での新しい実験を行い、新しい宇宙探査システムや要素技術の開発を進めている。一方で実行可能な計画を設定するためには多大な仕事が残されている。しかし、ロードマップを更新することによって、参加宇宙機関は、将来、人の生活と仕事の場となる可能性を秘めた探査目的地への有人－無人協調探査ビジョンの実現に向けたさまざまな活動が進んでいることを示し続けられることを期待している。

このロードマップに関する利害関係者との意見交換は、国際的に、あるいは個々の宇宙機関によって進められ、多くの革新的な考えや建設的意見が得られた。このロードマップ最新版はこれらの意見を取り込んだものである。

人類による太陽系探査

有人火星ミッションを含めた持続的な有人宇宙探査のビジョンの達成には、長期にわたる政治的約束と人的、物的、資金的リソースを要するであろう。しかし、歴史は、安全で持続的な有人宇宙飛行への挑戦に取り組むことにより、宇宙の分野よりはるかに広い分野に応用できる成果が得られることを繰り返し示している。また有人探査だけでなく無人探査から多くのベネフィットがもたらされる。それらのベネフィットは探査機打上までの過程におけるさまざまな活動からも生まれる。全ての宇宙探査活動からもたらされる成果の着実な実現とより幅広い普及を確実にすることが重要である。

有人火星表面探査には複雑な技術的課題と有人飛行特有の医学的課題などへの挑戦が伴うが、進展も続いている。火星への道筋はISSから始まる。技術実証、健康管理研究、および運用シミュレーションのような探査準備活動が進められている。ISSを支える居住サブシステムや他の主要サブシステムを改良していることは、地球低軌道以遠への有人探査に伴うリスクを低減することに寄与している。

アポロ以来となる地球低軌道以遠のミッションを可能にする次世代宇宙輸送技術により、地球低軌道より運用が困難な月近傍ミッションが可能となり、それは効率的な運用方法を学ぶ良い機会になるだろう。月近傍ミッションは、持続的な有人宇宙探査を可能にする国際協力関係を強化し拡大する。

ISECGミッション・シナリオは、火星探査ミッションを最終目標としつつまずは月と地球近傍小惑星の探査を進展させるという、有人探査技術の段階的な発展を特徴としている。特に、月面探査を可能にする技術によって、宇宙機関の火星表面探査への技術習熟度が高まる。月面探査のために開発された技術やその改良により、政策としてもしくは商業利用からその後も月面の有人滞在は継続されるかもしれない。

ISECGミッション・シナリオは、探査への挑戦に向けての構想と革新的なアイデアについての議論を進めるたたき台である。ミッション・シナリオは技術的に実現可能で、プログラムの的にも実施可能と考えられており、共有された目標・目的に向けた感動的で刺激的なミッションを可能にする様々な技術能力開発の機会をもたらすものである。

50年以上前に始まった宇宙探査は、地球周回軌道における、主に通信、測位および地球観測衛星に関する商業活動の成立を可能にしてきた。近年、政府需要、懸賞金付きコンテスト、あるいは新たな公共サービスへ対応するために、民間企業が宇宙輸送や探査システムに投資を続けている。地球低軌道の先の商機を求めて、いくつかのベンチャー企業が設立されている。国際宇宙探査ロードマップでは、持続的な探査によって新サービスが提供され、市場開拓が活発に促進されると認識している。ちょうど地球周回軌道が重要な経済圏として確立したように、将来の探査目的地にも同様の可能性がある。ISSへの貨物輸送ミッションの成功は、民間サービスの将来の活用につながる官民パートナーシップ確立の実現可能性を実証するものである。

国際宇宙探査ロードマップは、宇宙探査における将来の役割分担への準備や、利害関係者の意見を求める際の、宇宙機関の重要な資料となる。このロードマップは、各宇宙機関の提案・計画が国際的な動向と調和していることを利害関係者に対して示すとともに、各宇宙機関の探査に向けた準備活動を促進している。

有人宇宙飛行のコストを軽減する要求に応えるため、各宇宙機関は宇宙システム開発・運用の手法を改良し続けている。ISSパートナーは、ISSを運営し、ISSへ往復するコストを低減させる新しい試みを追求している。これらの新しい試みは、地球低軌道以遠の探査にも役立つ技術革新をもたらすであろう。さらに、研究と技術の革新は不可欠である。探査課題への革新的解決策を見つけ、最善の計画を実現可能にする活動と協力関係を追求することによって成功がもたらされるだろう。

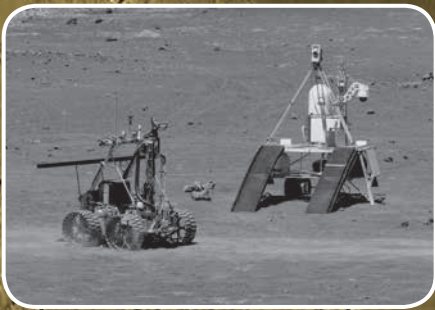
所見：

- ➔ 数十年間にわたって持続的な有人宇宙探査事業を構築するために、各宇宙機関のリーダーは、宇宙探査が国民へ明確な成果をもたらすように注力しなければならない。

第2章 宇宙探査の 共通の目的と目標



国際宇宙探査ロードマップは、参加機関が期待する成果の明確な理解に基づいて作成されるべきである。宇宙探査の目的とその目標を明確にし、宇宙機関が達成しようとしている内容を、ミッション・シナリオに反映させることは重要である。



国際宇宙探査ロードマップは、参加宇宙機関が共同で定義した一連の宇宙探査に関する共通目的とその目標が発点となっている。目的と目標は宇宙機関における優先順位の変化に伴って反復的に設定されるものであり、国際宇宙探査ロードマップ初版の公開後も、地球低軌道以遠の個々のミッションの具体的目標を定める基礎となるよう、これらの目的について広く意見交換が行われた。

これらの共通目的と目標は、科学と探査の本質的に相互的な特性を反映し、さらに有人や無人の宇宙探査ミッションの相乗効果を期待するものでもある。将来の有人探査を計画する際には、科学の最優先目的について理解し取り扱うことが必須だろう。

以下に、アルファベット順にリストした共通目的を示す。

- **探査技術と能力の開発：**先進技術、高信頼システム、および地球環境外での効率的運用コンセプトの開発・試験により、地球低軌道より遠い探査目的地で生活と仕事をするために必要な知識、機能、およびインフラを開発する。また、この目的の追求は、副次的製品、新たな素材や製造工程、および世界の主要課題に対応できる様々な技術を生み出すことにつながる。
- **一般市民の探査への参加：**宇宙機関は、その活動を支えている一般市民に対し、知識を広め、発見の興奮を分かち合うことにより探査の価値を直接還元する責任がある。探査に対する参加型アプローチは、探査の価値の提供を可能にし、探査ミッションに一般市民が貢献する機会を最大限に高めるものである。またこの目的の追求は、一般市民（特に若者）に啓発と刺激を与え、社会の文化的発展に資する機会を生み出すことにもつながる。



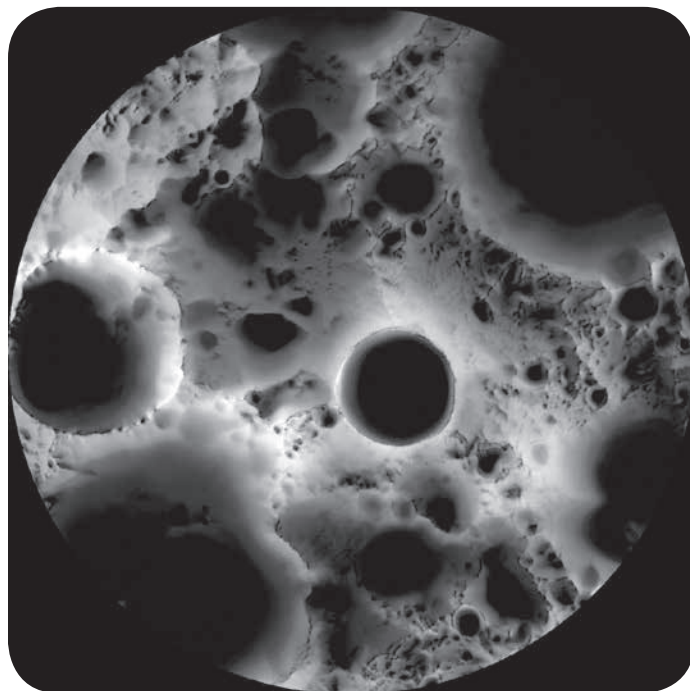
カザフスタン・コスタナイからロシア・チェリャビンスク地区へ向かうハイウェー上で、ダッシュボード・カメラのビデオ映像に記録されていた隕石による飛行機雲。2013年2月15日金曜日（AP通信/Nasha gazeta, www.ng.kz）

- **地球の安全性の向上：**隕石からの地球保護と軌道上宇宙ゴミの管理システムを共同で研究し、惑星地球の安全性を向上させる。この目的の追求は、現在の地球軌道上宇宙施設への損害リスクを軽減するとともに、将来の予測不能な小惑星衝突という大惨事のリスクを軽減する。
- **人類の存在領域の拡大：**地球低軌道より遠い様々な目的地の探査を行い、その目的地に行ける人数、目的地での滞在期間、および自給自足レベルを継続的に拡大する。地球低軌道を超えた人類の存在領域の拡大と維持継続を進めることにより、人類が宇宙で生活と仕事を営み、太陽系資源を宇宙と地球のために活用し、最終的に他の惑星に定住することが可能になる。この目的の追求は、人類の活動範囲を拡大し、さらなる宇宙の活用への道を開き、宇宙における我々の存在と立場に関する考え方を新たにすることにつながる。

流れの中の堆積物の様相を示す斜交層理のある頁岩露頭を撮影したキュリオシティ・マストカメラ画像

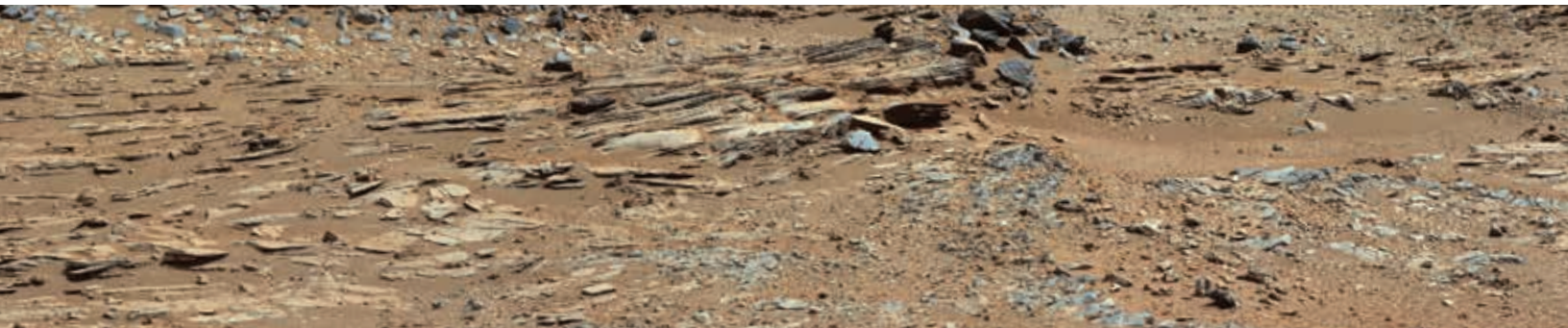


- 有人探査を可能にする科学の研究：**宇宙環境が人の健康と探査システムに及ぼす影響を明らかにして、太陽系における将来のミッションのリスクを軽減し、パフォーマンスを向上させる。これは有人探査に不可欠であり、太陽系全体への人類の進出を可能にする。また、この目的の追求は、地上の医療革新にもつながる。
- 宇宙科学、地球科学、および応用科学の研究：**太陽系の探査目的地の科学研究を行い、その独自環境での応用研究を実施する。この目的の追求は、社会に貴重な知見を提供し、母なる地球への理解を深めることにつながる。
- 生命の探索：**地球外生命が存在するか、または存在していたかを判断し、それらの生命を維持する環境を知る。生命の探索は宇宙探査の中心的な目的である。この目的の追求により、我々が宇宙で唯一の生物であるか否かを知ろうとする人間の文明論的探求を継続し、我々の起源と進化に関する極めて根源的な疑問に対する答えが得られる。地球外生命の存在の有無に関する課題は哲学的小および科学的に極めて重要な問題である。
- 経済拡大への刺激：**企業からの技術、システム、ハードウェア、およびサービスの提供を支援または奨励し、宇宙活動に基づいた新規市場を創出することにより、全人類に経済、技術、および生活の質に関する利益を還元する。この目的の追求は、新たな産業を生み出し、ロボット工学、エネルギーシステムなどの分野における革新を加速させ、ハイテク部門の雇用機会を創出することにつながる。これにより民間サービスが創設され、より効果的で時宜を得た波及効果が現れる。宇宙活動が政府の研究活動から探査、そして利用に発展していくにつれ、新たな経済的可能性は地球低軌道を超えて、月や太陽系のその他の場所に拡大するかもしれない。



このモザイク画像は月南極地域の多数のイメージを組み合わせることにより作成された。白い領域は、灰色の領域より日照時間が長い。黒い領域の多くは永久に日陰で、恐らく揮発性の堆積物を含んでいる。

各機関の有人飛行への意欲を維持および向上させることができるような目的と目標が、探査戦略の出発点となるだろう。宇宙機関は各国の探査目的・目標を絞り込んでいく中で、それらを共有し、共通点を見い出し、国際宇宙探査ロードマップにその共通点を反映させて行く。



主な探査目的・目標

目的	目標
探査技術と能力の開発	クルーの健康とパフォーマンスを維持する対策／手法および放射線の軽減技術／方策の試験を行う。
	発電／電力貯蔵システムの実証・試験を行う。
	高効率の惑星表面移動システム、船外活動、生命維持、および居住技術の開発と試験を行う。
	ロボットによる自律的探査および宇宙飛行士の探査を支援するロボットの実証を行う。
	天体の資源を採取、処理、利用する手法、技術、システムの開発・妥当性確認を行う。
	打上および宇宙空間での先進的な推進技術の実証を行う。
	極低温流体制御を含む熱制御システムを開発する。
	基本的な作業を最も効果的に遂行する方法を学び、運用ルールを開発する。
	先進的な大気圏突入・降下・着陸技術の試験・実証を行う。
	自動ランデブー／ドッキング、軌道上組立、および衛星サービス技術の試験を行う。
	科学探査を支援する技術の開発・実証を行う。
	宇宙通信／航法システムを開発する。
一般市民の探査への参加	双方向のコミュニケーションツールを使用して、実況データに基づく仮想体験を提供する。
	アマチュア／市民科学者に対して、探査関連の知識収集への協力を求める。
地球の安全性の向上	地球近傍小惑星の潜在的な衝突の脅威を明確にする。
	小惑星と地球の衝突のリスクを軽減する技術試験を行う。
	地球周辺の軌道上にある宇宙ゴミを管理する。
人類の存在領域の拡大	新たな目的地を探査する。
	全てのパートナー国の宇宙飛行士が探査に参加できるようその飛行機会を増やす。
	宇宙での滞在にかかる自給自足レベルを高める。
有人探査を可能にする科学の研究	宇宙環境における人体の健康を評価し、健康リスクを軽減する手法を開発する。
	宇宙環境における放射線量を監視および予測する。
	探査目的地の地質、地形、および環境条件の特徴を明らかにする。
	探査目的地で入手可能な資源の特徴を明らかにする。
	探査天体表面およびその地下環境、および大気環境が探査システムに及ぼす影響を評価する。
宇宙科学、地球科学、および応用科学の研究	宇宙からの地球観測、太陽物理および宇宙物理に関する観測を実施する。
	探査天体の科学データを収集する。
	太陽系進化に関する科学データを収集する。
	応用研究を実施する。
生命の探索	過去または現在における生命の存在の証拠を発見する。
	過去または現在において太陽系天体に生命が存在できた又は存在できる可能性を探る。
経済拡大への刺激	探査アーキテクチャへの民間輸送システムの参入の機会を提供する。
	探査アーキテクチャに民間の惑星表面や軌道上の探査システムが参入できる機会を提供する。
	探査目的地における商品および発見された資源の市場化を含むサービスの可能性を評価する。

第3章 長期有人探査戦略



ISECGの参加宇宙機関は、ISSに始まり、太陽系に人類の存在領域を広げ、有人火星探査を目標とした長期有人探査戦略を設定した。長期的に持続的な方法で人間を火星に送ることは、近い将来における有人宇宙探査の最も困難だがやりがいのある目的になることは議論の余地のないことである。これらのミッションでは、新しい技術と我々が現在有している技術の大幅な革新を必要とするだろう。



火星有人探査を持続的なプログラムにするためには、リスクの削減、先進技術の試験、新しい有人宇宙探査技術の実証を、段階的に進めていくことが必要である。科学、技術実証、および市民参加などの探査目的を最大限に満たしつつ、火星への1ステップとなるようにそれぞれのミッションを定義していくことが重要である。



戦略からロードマップへ：ミッション・シナリオ構想

ISECGミッション・シナリオには、共通の戦略を実現するための以下のような当面の計画が反映されている：

1) ISSの最大限の利用、2) 有人探査と無人探査の相乗効果を増大する持続的な努力、および3) 月面や地球近傍小惑星上での技術的・科学的発見を可能にしつつ、火星探査に必要な能力と技術を発展させる月近傍での技術的・科学的発見を主目的とする探査。このシナリオは、関心を有する宇宙機関がそれぞれの優先事項を実施しつつ、火星探査への重要な貢献に備えることを可能にし、共通の探査目的・目標を達成するよう国際的に調整した結果を反映している。

このシナリオでは、それぞれの目的地での科学的・技術的発見に取り組み、より複雑となっていくミッションを実行するために必要な技術の段階的な開発と実証を示したものとなっている。月近傍および月面上の活

動は、小惑星および月の探査の様々な目標達成を可能にし、また有人火星探査に向けた準備のレベルを著しく高められる。進行中及び計画された無人と有人ミッションは火星への有人ミッションの準備に重要である。

以下に示す、ミッション・シナリオ検討に当たっての原則には、持続的な有人探査の特徴が出ている。原則は相互の関連性が深く、個々の原則ではなく、これらの原則の組み合わせにより持続的なミッション・シナリオができ上がっている。例えば、予算の成立性という原則により、新技術の開発は段階的に進めることとし、また、主要探査システムの冗長性を実現する必要性と時期については慎重に検討を進めた。探査目標の達成度によって予算が増減するため、この原則は探査の成果にも依存する。世界の既存の技術を基に現実的な範囲で技術開発の計画を組むことで真の国際宇宙探査計画となる。

ミッション・シナリオの原則：

現実的な予算的成立性 — 予算の制約を考慮に入れる

複雑である探査プログラムの総予算は長期に渡って現実的な範囲に維持されなければならない。探査プログラムを開始する際、およびプログラム実施の全期間において、コストは重要な考慮事項である。コストを下げるため、先進技術の革新と融合を進めなければならない。各機関の参加計画には、コストおよび将来の資金調達見込みに関する実現性が伴わなければならない。

探査成果の創出 — 公共の利益を創出し、探査目的を達成する

探査目標・目的に対応する持続的な有人宇宙探査は、探査のごく初期から探査の全期間に渡って、利害関係者や公共へ成果をもたらすことが求められる。

国際間パートナーシップ — 様々なパートナーに対して早期から継続した機会を提供する

幅広い国際協力は、より複雑となっていく探査ミッションの実現に重要なだけでなく、探査成果を創出する上でも重要な役割を果たす。ミッション・シナリオは、宇宙機関の宇宙探査への熱意を維持し発展させつつ、大規模宇宙機関のみならず小規模宇宙機関の能力と長期的展望を基に構成されねばならない。パートナー間の様々なレベルでの相互依存とともに、ミッション、能力、技術のすべてのレベルで協力関係が確立されていくだろう。これらの協力関係は、失敗、遅れあるいは計画上の問題に対しても、確実にプログラムを回復させられるように設定されるべきであろう。さらに、新しいパートナーの参加機会も、協力関係全体を確固としたものとするために有効であろう。

段階的な技術開発 — 段階的な技術開発により複雑化していくミッションに対応

長期目標として火星有人探査を見通した、地球低軌道以遠の持続的な有人探査は、既存技術と段階的な性能向上に基づいて構築されていくことが必要である。技術的挑戦には、新技術が追求され用いられるであろう。探査ミッションへの挑戦により、リスクを乗り越えるための重要技術の開発と実証が可能となる。

有人ミッションと無人ミッションの連携 — 有人ミッションと無人ミッションの相乗効果を最大限に高める

より多様な目標を効果的で、低コストで、安全に行えるようにするため、有人システムと無人システムのユニークで相補的な技術を組み合わせる。プリカーサミッションは、将来の探査目的地の戦略的知識を収集し、重要技術を実証することで、有人ミッションに備えるだろう。どの目的地であれ、クルー活動を支援し、補助するためのロボットの利用により、有人探査ミッションの効率と成果が向上するだろう。

ロバスト性 — プログラム上および技術上の課題に対応できる柔軟性の確保

ロバストな有人探査計画は、大惨事や、パートナー構成の変化や、利用可能な資金調達の調整や、あるいは探査目標・目的の変化などによる、想定外の変化や危機的状況に対しても、十分柔軟に対処できるだろう。ロバストな計画であるためには、主要技術の異種システムによる冗長性構築を可能などから初期の段階から進めるべきであろう。

ISECG ミッション・シナリオ

ISECG ミッション・シナリオ構想は、火星へ至る道筋を辿りながら探査の目標を達成していくための今後25年間のミッションをまとめたものである。月近傍へ移動させて接近を容易にした小惑星へのミッション、あるいは発展型深宇宙居住施設からなる月近傍ミッションは、新たな発見をもたらす、深宇宙長期ミッションに必須のシステム技術実証を可能にする。月面有人ミッションにより、月科学の最優先課題を追求するとともに、惑星探査技術能力の実証を進めることができる。

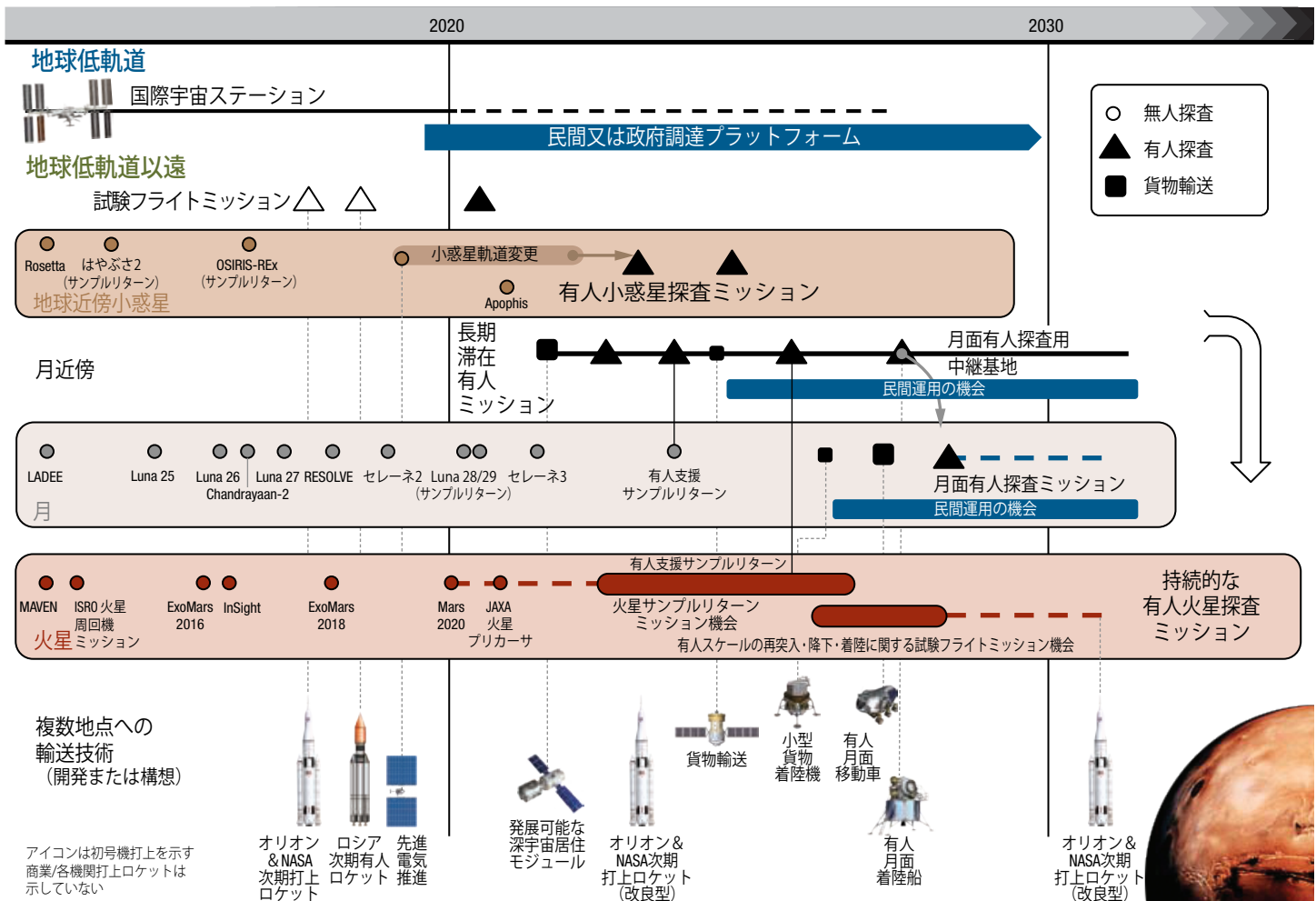
国際調整の結果、シナリオは有人探査と無人探査を統合的に実施するものとなっている。クルーが存在することにより、人間のその場での判断能力や適応能力、付随するリソースが活用できることで、より幅広い科学と探査の目標が達成される。有人支援サンプル・リターンと遠

隔操作は、より大きな成果の可能性のある宇宙探査の新しい統合的な手法である。火星サンプル・リターンは固体惑星科学コミュニティの優先的課題であるが、最終的な有人火星表面探査の準備にも役立つだろう。有人-無人探査の計画提案者は、有人宇宙探査を進めて行く中で、人間がいることでサンプル・リターンがどう改善されるかについての議論を始めている。

火星表面の有人探査には、大気圏突入、降下および着陸技術の進歩が必要だろう。有人規模の火星着陸テストは、科学と技術実証の両方の目的を満たす機会となるような構想で考えられている。

地球低軌道における民間企業の役割の拡大が、地球低軌道以遠のミッションへも民間企業活動が同様に拡張していく可能性につながっている。

ISECG ミッション・シナリオ



将来の探査アーキテクチャの主要システム

各宇宙機関は、火星へ至る様々なシナリオを検討し、地球低軌道以遠の複数の探査目的地への有人探査に必要な技術研究を続けている。複数の機関が主要技術で貢献すれば、持続的な火星探査が可能になるだろう。各宇宙機関は、それぞれの得意分野により国家としての目的に見合う貢献をしようと努力している。探査システムは、ISSや他のさまざまな宇宙活動のために開発された宇宙機がベースになるだろう。

現在開発中の探査用の輸送システムは、月近傍のミッションを可能にし、月面および深宇宙ミッションのようなその後のミッションにも発展して対応するよう設計されている。居住、電力、活動支援、作業および移動のような他の能力は、長期に渡って必要なもので、それぞれの探査ミッションに応じて段階的に発展させていくことができる。

アイコン	システム	概要
	NASAオリオン	宇宙飛行士を探査目的地に運び、地球に帰還させる有人宇宙船。
	NASA次期打上ロケット（SLS）	地球低軌道以遠へ貨物やクルーを輸送できる能力を備えた打ち上げロケット。有人火星ミッションまで対応できるよう、次世代型のブースタや上段でアップグレードすることが考えられている。
	極低温推進システム（CPS）	極低温液体酸素・水素を推進薬として用いる軌道間推進システム。SLS発展計画の構成要素。月近傍、月面、または火星へのミッション発展機能となる。CPSには、極低温推進薬の長期保管機能が必要である。
	ロスコスモス次期打上ロケット	地球低軌道以遠へ貨物やクルーを輸送できる能力を備えた打ち上げロケット。次期打上ロケットおよび次世代有人宇宙船によってロシアの有人宇宙システムを構成する。
	ロスコスモス次世代有人宇宙船	宇宙飛行士を探査目的地に運び、地球に帰還させる有人宇宙船。
	発展型深宇宙居住モジュール	最終的には有人火星ミッションに必要な宇宙滞在能力、船外活動能力、および中継能力を持つように発展する一時滞在型有人居住施設。
	作業支援システム	クルーおよびロボットが宇宙システムで作業し、より大きなシステムを組み立てることを可能にするシステムと道具類。作業支援システムは、オリオンや発展型深宇宙居住モジュールの能力を強化する。
	貨物補給システム	月近傍の軌道上インフラストラクチャへの補給のため与圧および曝露ペイロードを運ぶ補給船システム。
	小型貨物着陸船	月面探査のため月面へ無人で貨物輸送・着陸する補給船システム。
	有人月着陸船	有人仕様の月着陸船。再使用型も想定され、クルーと貨物を月面に運ぶ2段階あるいはそれ以上の多段構成も考えられている。
	月面サブシステム	クルーによる月面探査を効果的に実施するためのサブシステム。有人月面移動車、居住モジュールおよび支援サブシステムなどを含む。
	次世代軌道間輸送機	小惑星および火星の有人深宇宙探査を可能にする、大電力電気推進や原子力推進などの新型推進技術による軌道間輸送機。

ミッション・テーマ

ISECGミッション・シナリオは3つの異なるミッション・テーマからなる。それぞれのテーマは、開発中および構想段階の技術を用いて実施される可能性のある一連のミッションで構成される。各テーマはそれぞれの目的に合ったそれぞれの理由を持っているが、一方、深宇宙と火星探査ミッションに必要な国際パートナー技術分担への重要な一歩ともなっている。これらのテーマはさらにクルーの存在を最大限活用して、科学の優先的テーマに取り組み、革新的な方法で市民参加を進めるものである。

3テーマを以下に示す。

1. 地球近傍小惑星探査—月近傍で有人小惑星探査を行えるよう、小惑星軌道変換を無人で行い、次世代電気推進、有人輸送および探査運用の技術実証を行う。このミッション・テーマはNASA提案に対応するもので、国際協力への呼びかけがなされている。
2. 長期滞在有人ミッション—深宇宙探査技術の発展と、有人—無人共同による月面探査の革新的手法開発のための、月近傍での長期滞在有人ミッション。このミッション・テーマは近々に達成可能なステップであり、月と深宇宙を目指す将来の探査ミッションに向けた技術を直接発展させることを目指して定義されている。このミッション定義は、ISECG各宇宙機関代表により共同して進められている。

3. 有人月面探査—月面有人滞在を活用し、居住、可動性などの惑星探査技術を進め、月探査の優先課題を実施する月面ミッション。このミッション・テーマは、探査目的地の1つであり、多くの宇宙機関は、月面有人ミッションを火星有人ミッション準備の必須のステップと考えている。月ミッションは、月を有人惑星探査に向けた次のステップと見る機関にとって好ましいと考えられており、NASAはそのようなミッションに参加するかもしれない。この数年、月ミッションは、個々にあるいは共同で研究されている。

まだISSが運営され利用できる間に、地球低軌道以遠のミッションを始めることが重要である。ISSと地球低軌道以遠ミッションの間の不連続性を回避すれば、必要な技術能力および専門知識を維持できるとともに、将来ミッション実現に向けてISS協力関係を支えることにもなる。ISSへ継続的にアクセスすることで、技術実証、人の健康とパフォーマンスリスクの緩和、および運用シミュレーションなどの探査準備活動を持続することができる。



この図は、現在ISSを支えているシステムと技術がどのように、より遠い宇宙へ人を連れて行くために必要なシステムと技術の基礎となるかを示している。ISSに搭乗中の宇宙飛行士を支える居住および他の主要システムは、探査ミッション要求条件を満足するよう改良されていくだろう。ISSを支えているクルーと貨物の輸送技術は、月近傍ミッションに必要とされる同様の技術を実現する際の強力な基盤となる。月近傍と月面ミッションの実現に必要な技術を現状技術から段階的に改良していくことで、遠い宇宙へ行くために必要な技術を国際協働グループが習熟していくだろう。

地球近傍小惑星探査

このミッション構想には、地球近傍の小型小惑星を捕捉し、軌道を変更し、初期SLS性能によりオリオンでも到達可能となるような月近傍の安定軌道に誘導する無人ミッションが必要である。直径10メートル以下の小惑星がターゲットとなるであろう。このサイズの物体は地球の脅威とならない。軌道変更された小惑星が安定軌道に到達した後は、宇宙飛行士（および無人探査機）がその小惑星に行って探査することができる。探査候補は変わりやすいので、探査やこのミッションにより実証されるその他の宇宙応用技術による成果を最大限にすることを目標にした別のミッション構想も研究されている。

ミッション活動

小惑星を軌道変換する無人ミッションは、目標小惑星まで飛行し、ランデブーし、捕捉する。これらの技術は、潜在的に危険な小惑星あるいは制御できない大型スペース・デブリのような非協力目標への今後のミッションにも十分応用可能かもしれない。小惑星が安定月軌道に到達した後は、オリオン搭乗の宇宙飛行士が出かけて探査することができる。ドッキングや引っ掛けアンカーあるいは同種の方法によって、宇宙飛行士を小惑星近傍に留め、予定のタスクを遂行させる。宇宙飛行士は船外活動し、小惑星の接近観察を行い、測定し、地球へのリターン・サンプル収集を行うだろう。ミッション活動として、以下のものが考えられている。

- 小惑星構成の解明。
- 何らかの資源の識別と、それらの抽出可能性の評価。
- 地球の研究施設へ持ち帰るサンプルを人の評価能力を用いて選別し、将来の有人支援サンプル・リターンミッションに向けた、サンプル取得、採取、収納操作、およびクルー持ち帰り操作の技術実証。

10,000を超える地球近傍小惑星が発見されている。そのうちのいくつかのものはこの種のミッションの候補小惑星と考えられ、これらの小惑星を識別しその性質を明らかに

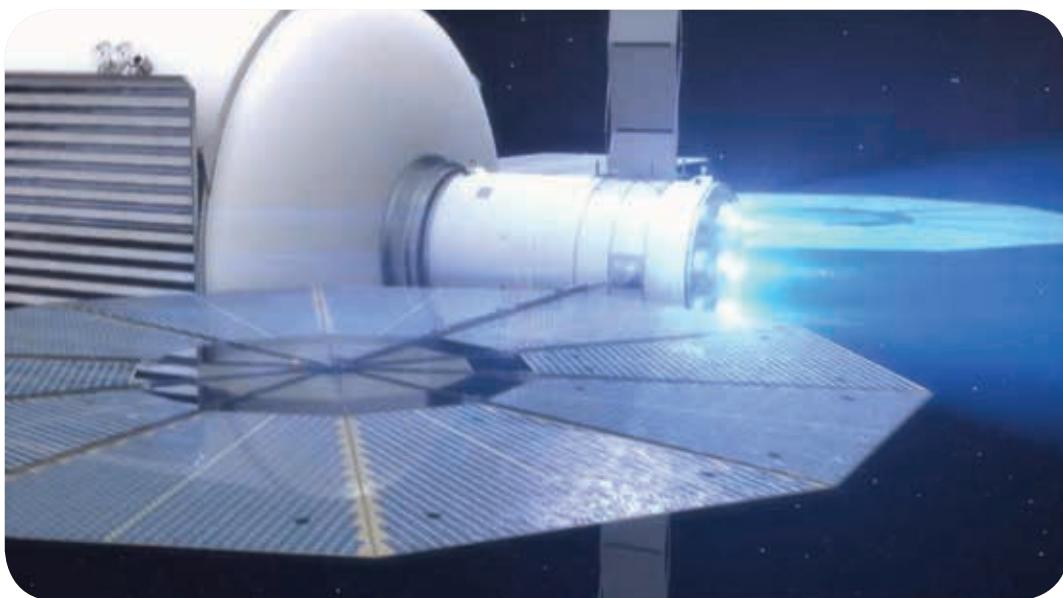
する世界的な活動が広がっている。候補小惑星の特性として、その軌道、質量、自転周期および小惑星の型についての情報が必要である。これらの特性値によってミッション自体と飛行計画も決まるだろう。地上施設と利用可能な観測衛星により、目標候補小惑星を解明し、目標小惑星の特性値が要求範囲内にあると十分に確信できるまで、その不確実性を減少できると考えられている。

このミッション構想は、安全で低コストな火星探査に不可欠と考えられる大電力太陽電気推進技術を発展させる。このミッションは大型太陽電池機構と大電力電気推進を技術実証する。有人小惑星探査はオリオン宇宙船と無人宇宙機の技術的積み重ねで実現すると考えられるので、このミッションは有人探査アーキテクチャに太陽電力システムを組み込む良い機会ともなるであろう。

火星ミッションへの準備

地球近傍小惑星ミッションでは以下の主要技術が実証されるだろう：

- 次期打上システム、オリオン
- 30-50kW級太陽電気推進システム
- 船外活動、ランデブー、接近運用、ドッキングあるいはアンカー係留、深宇宙誘導および通信



提案されている太陽電気推進システムには、今日の最先端技術の約2倍の発電能力を備える大規模太陽電池が必要である。

長期滞在有人ミッション

現在国際宇宙ステーション上で使用されている居住能力を発展させることが、将来の深宇宙ミッションを可能にするために必要だろう。このミッション構想セットは、地球低軌道以遠に向けた生命維持装置と他の居住システムを統合した発展型深宇宙居住モジュールの月近傍への配備を前提としている。有人支援型居住モジュールによるいくつかの長期滞在ミッションが考えられている。月近傍でのクルーの存在により、22ページに概説するような有人－無人協調構想による革新的月探査が可能になるだろう。

ミッション活動

ロシアの有人宇宙システムおよびNASAオリオンの両方を使用した、一連の有人ミッション構想が考えられている。主要なミッション活動には次のものが含まれる：

- 中継ステージ運用を含めた深宇宙有人飛行運用・技術の発展
- 有人支援月サンプル・リターンなど、人の滞在を活用できる優先度の高い科学の実施
- 深宇宙環境を必要とする技術およびサブシステムの試験
- 深宇宙環境での人の健康およびパフォーマンスの特徴解明

1回のSLS打上で発展型深宇宙居住モジュールを地球－月ラグランジュ点2に展開できるであろう。次世代太陽電気推進システムにより、科学または探査目的を満たすような月近傍の他の位置へ深宇宙居住モジュールを移設できるであろう。発展型深宇宙居住モジュールの初期構成は初期ミッション目的およびSLS性能に依存するだろう。特定の科学機器、作業システム、追加のドッキングポート、あるいは完全閉ループ生命維持装置などの機器類は、ミッション要求条件が明らかになった時に居住モジュールに追加できる。クルーは居住モジュールに最長90日間滞在するであろう。90日間滞在は、生命維持装置のテスト、クルー健康維持研究の実施、補給体制縮小を行うための初期目標として設定されている。実際のミッション期間は、追加再補給ミッションコストと有人長期滞在による成果のバランスを考慮して、それぞれのミッション目的に基づいて決定されるだろう。

月面着陸ミッションに向けて発展型深宇宙居住モジュールは機能が追加され、中継基地としても役立つよう開発されるだろう。月面への中継基地として使用することにより、革新的な着陸船構想（再使用型着陸船のような）や、国際輸送と民間輸送の統合も容易になる。さらに、このアプローチにより、火星着陸ミッションのある部分の模擬も行える。これによって、有人火星ミッションで重要な役割を果たすことを考えているパートナーが、月探査を行いつつ、それぞれの技術と能力を発展させ、有人火星ミッションに直結したアーキテクチャ構想の実証もできるようになる。

火星ミッションへの準備

深宇宙環境での長期滞在ミッションにより以下のことができるであろう：

- 相対的に安全な地球周辺軌道から離れた探査目的地への宇宙旅行に先立ち、SLS、オリオン、ロシアの次世代有人輸送技術および生命維持装置などの深宇宙探査技術のリスクが許容水準に達していることの技術実証
- 自律的クルー運用技術の実証
- 縮小補給運用体制の実証
- 複雑な深宇宙中継運用経験の蓄積
- 長期ミッションのための主要技術と放射線防御方策の発展
- 火星運用構想の環境模擬実験として有人－無人の対話型運用の技術実証
- 有人宇宙船に太陽電気推進を用いる経験の獲得



発展型深宇宙居住モジュールの構想図

有人月面探査

このテーマは、発展型深宇宙居住モジュールからのアクセスによる有人月面探査構想である。ただし、中継基地としての発展型深宇宙居住モジュールの最適位置は現段階ではまだ決まっていない。月周回低軌道、月周回高軌道、あるいはラグランジェ点のいずれも、それぞれの利点と制約のある中継点となるだろう。主要な月科学と火星探査準備の目標を満たしつつ、火星探査ミッションへの技術的な成熟度を高めるという「出口戦略」に基づき一連のミッションが構築される。しかし、参加宇宙機関は、月科学あるいは他の探査活動が明確になった場合にそれらの追加ミッションも、有人月面探査の基本技術能力の範囲で実施できると考えている。

ミッション活動

月面有人ミッションの主な活動には以下のものが含まれるであろう：

- ・次世代惑星表面エネルギー技術の試験
- ・有人月面滞在を活用でき、かつ科学コミュニティの最優先課題に対応する探査の実施
- ・低重力環境での人の健康およびパフォーマンスの研究
- ・長距離移動構想の技術実証
- ・惑星表面探査における人-ロボット協調構想の探求
- ・無人探査で技術実証された高精度着陸技術の利用
- ・月資源利用に関する知識ベースの拡張
- ・長期滞在に向けた着陸地点の探査

近年の、高分解能画像や化学組成データなどの無人探査成果と、現代の分析技術によるアポロ試料（と月隕石）解析結果は、太陽系の生成とその進化について、月探査で多くのことが明らかになることを示している。この事は、月面に人が戻ることを活用して月探査を進めることへの強い科学的根拠となっている。

このミッション・シナリオでは、1か月まで滞在期間を延長できる移動型長期滞在ミッション構想を想定している。クルーは年1回、関心のある着陸地点に着陸し、周辺地域を詳細に探査するであろう。長期滞在を可能にする施設が月面に送られるとともに、ミッション目的を達成する能力はそれに応じて大いに増加されるだろう。火星ミッションシミュレーションは、発展型深宇宙居住モジュールでの長い宇宙滞在の後に月面にクルーを送り込む形態で行えるであろう。

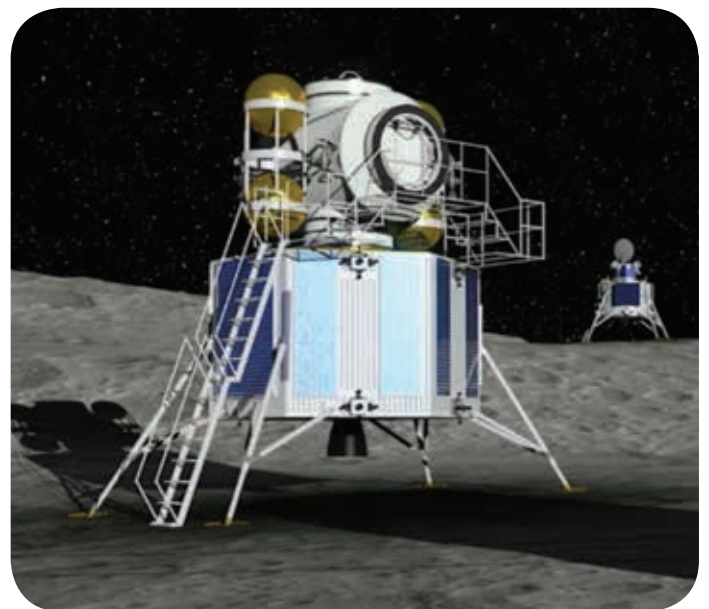
このミッション・シナリオは月資源の利用可能性には依存しないが、資源の無人調査・抽出技術実証ミッションの成果は、月資源利用の有望性に関する将来の決定の役に立つとともに、月面あるいは他の有人探査のやり方を変えるかも知れない。

今後十年間に多数の月無人探査が計画され、月面への貨物輸送サービスが民間で可能になることもあり得るだろうと考えられており、それらもミッション・シナリオに含まれている。

火星探査ミッションへの準備

有人月面探査は以下のことをできるだろう：

- ・地球帰還宇宙船による中継運用の技術実証。
- ・クルー移動と居住システムの機能拡張の技術実証。
- ・次世代電力システムの技術実証。
- ・深宇宙環境と部分重力環境を組み合わせた場合の、人の健康およびパフォーマンスの解明。
- ・惑星表面探査の運用構想とクルー自律機能強化の技術実証。
- ・現地資源利用関連の構想を発展させる機会を提供する可能性。



月面上の有人仕様月着陸機（欧州構想）

有人火星ミッションリスクの軽減

ISECGミッション・シナリオは、そのシナリオの途中で科学的発見を可能にしつつ、将来の火星ミッション準備に重要な役割を果たせるような地球低軌道以遠の第一歩を定義することに特化したものである。以下に示す火星探査ミッションリスク削減表は、有人ミッションのリスクを許容水準にまで減らすための解決策が必要な主要分野を抽出したものである。この表は、これまで参加宇宙機関や外部グループによって行われた火星ミッションアーキテクチャの研究成果からまとめられたものである。表では、火星表面への有人ミッションを可能にする技術、機能あるいは運用の成熟度を技術実証する機会とそれによるリスク削減の評価を表している。技術成熟レベルは3つの大項目に分類された：

- 類似環境での最大限の実証—有人火星ミッションに必要なレベルの技術成熟度を達成
- 類似環境で十分なリスク軽減—有人火星ミッションと同一の技術レベルまでは達成できないが、リスクは十分に軽減されたレベルを達成
- 実現可能性の初期確認／部分確認—能力、技術あるい

は運用方法は成熟しているものの、類似環境での実証がされていない、もしくは部分的な実証レベルを達成

表は、ISECGミッション・シナリオがどのようにリスク削減を徐々に進められるかを、トップレベルで示すものである。月近傍ミッションでは、殆どの火星ミッションリスクを著しく削減するための、環境条件が得られ重要要素技術が技術実証できる。例えば、一連の長期滞在有人ミッションは輸送および居住に係るリスクを削減できるだろう。小惑星有人ミッションは、有人輸送および船外活動技術に対する信頼を高める。月面ミッションでは、惑星面運用に特有の居住、移動およびその他のリスクに取り組める。月面活動の成果を活用すれば、深宇宙および火星への持続的なミッションは可能となるであろう。もし火星周回また火星フライバイあるいは火星の月へのミッションが行われれば、そのミッションによって火星大気と火星表面に関わる主要リスク以外は効果的に解決されるであろう。また、有人火星探査に向けたリスク対応には有人ミッションが不可欠だが、中／大規模無人火星着陸ミッションにより、残る火星大気と火星表面に関わるリスクにも十分対処できるであろう。

● 類似環境での最大限の実証 ● 類似環境で十分なリスク軽減 ◎ 実現可能性の初期的確認／部分的確認段階	地球	ISS／ 地球低軌道	月近傍（地球－月 ラグランジェ点 （EML）、月軌道）	月面	火星 近傍	火星表面 （無人探査）
地球低軌道以遠有人輸送			●	●	●	
重量級打上			◎	●	●	
補給量削減・運用技術		◎	●	●	●	
自律クルー運用	◎	◎	●	●	●	
深宇宙組立・中継運用技術			●		●	
火星からの離陸技術	◎			◎		◎
宇宙放射線防御／遮蔽		◎	●	●	●	
生命維持と居住システム		●	●	●	●	
突入、降下&着陸システム	◎			◎		●
火星での電力エネルギー管理	◎			●		●
火星表面移動	◎			●		●
人－ロボット協調	◎	●	●	●	●	●
火星現地資源利用	◎			◎		●
長期ミッション搭乗員健康	◎	●	●	●	●	
深宇宙運用技術	◎	◎	●		●	

注：この表では主要技術は複数機関から提供されるとしている

所見：

- ➔ 各宇宙機関は、ISS、月近傍、月面、あるいは無人での国際協力ミッションが将来の国際火星ミッションのシミュレーションや準備として活用され、結果として複数のパートナーが将来の有人探査に主要技術で貢献できるようにすることを期待している。

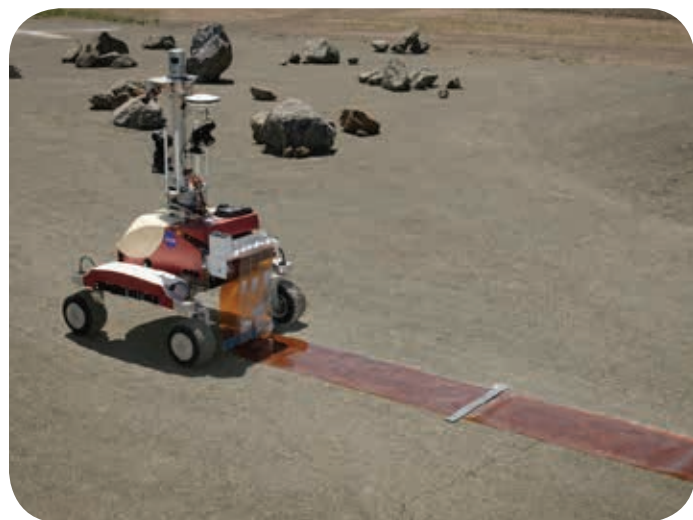
有人探査と無人探査の協調

ISECGミッション・シナリオに表わされたアーキテクチャ構想は、有人探査と無人探査の協調をさらに拡張するアイデアを検討する機会となる。以下に示す新しいミッション構想はさらなる検討に値する。

有人支援サンプル・リターン

有人支援サンプル・リターン構想は、幅広い探査目標の実現と月、深宇宙および火星の有人ミッションを可能にする第1歩として月近傍有人ミッションが行われるという仮定に基づいている。クルーが存在することで、以下のように探査コミュニティに対するサンプルの価値を高められるだろう：

- より大型でより多様なサンプルにより科学的成果を高める。
- サンプル操作をクルーに委ねることによって無人探査に伴う複雑さを軽減する。
- 人が介在することにより、ミッションの堅牢性と信頼度を改善する。
- 宇宙飛行士が関与することで市民参加のよりよい機会となり、より広いコミュニティへ月科学の重要性をデモンストレーションできる。
- 国際協力の機会を広げる。



クリス・キャンディ宇宙飛行士がエームス研究センターの類似環境模擬施設に置かれた、高精度惑星ローバをISSから操作した。ISSでは遠隔操作概念の改良に有効な技術データ収集のため、このような技術実証実験を進めている。

有人機のサンプル収集および回収に関連する能力は、無人機に必要なハードウェアや複雑さを最小化できるはずである。

遠隔操作

遠隔操作とは、軌道上宇宙船や適当なラグランジュ点など、惑星面に比較的接近しているクルーにより、惑星面上のロボット機器類を遠隔操作することと定義できる。遠隔操作は、この技術が有効なある種の探査タスクにおいて、人間とロボットの共同作業により探査能力を著しく強化することができる機能である。そのようなタスクには次のような特徴がある：

- 高速移動
- 短時間のミッション期間
- 短時間決定が必要な集中作業または繊細作業
- 自律性や冗長性が低い惑星面機器
- クルー介在による偶発モード／故障の解析



惑星面のテレロボット操作に遠隔操作技術を応用している構想図

所見：

- ➔ 宇宙探査の共通目標達成における宇宙飛行士の存在意義を高めるために、有人支援サンプル・リターンや遠隔操作のような新しいミッション構想がさらに検討されるべきである。

現地資源利用

地球低軌道以遠での人類の存在の維持には、現地資源利用が著しい効果をあげるだろう。現地資源利用により、地球から必要な補給物資をすべて持って来るコストと煩雑さを抑制できるであろう。現地資源利用の最も有望な用途は、生命維持システムあるいは推進薬である。現地資源利用を効果的なコストで安全に行うために必要な技術や能力は、論文構想段階からシステム開発段階を経て、現在では地上類似環境で試験される段階に至っているが、さらなる研究や実験が必要である。

火星資源利用では、火星大気から集めた二酸化炭素を処理して、火星表面から周回軌道への上昇のためのロケット推進薬（酸素および恐らく燃料も）を供給することが第1に考えられてきた。火星着陸機のローバと同じく周回科学衛星も、火星全面に渡って、様々な集積度、深さ、形態で発見された水に、将来利用の見込みがあるかもしれないことを確認している。例えば、火星偵察衛星（MRO）は、あるクレーターの底で水氷が存在することを確認した。また、フェニックス着陸船は、高緯度地帯で表層直下に汚れた氷を確認した。

月には大気がないが、月のレゴリスに酸素が含まれていることは知られている。さまざまな抽出技術が提案され研究室や野外で実証されてきた。さらに、月の偵察衛星（LRO）、かぐや、Chandrayaanそして月クレータ観測衛星（LCROSS）は、月の極地域で揮発成分の存在と分布に関する情報をもたらしている。既存のデータは、極地でより高いレベルの水素の存在を示し、また、LCROSSはクレータの永久陰のある場所で水とその他の揮発成分を識別した。しかしながら、レゴリス中の揮発成分の正確な濃度も、正確な分布（表面の近くで広く利用可能かどうか、あるいは永久陰地帯で大規模に存在するか）も知られていない。

妥当なコストで安全に月の揮発性物質を使用することができるか否かについて理解するためには、揮発性物質の性質および分布と、それらを妥当なコストで処理することができるかどうかを理解することが必要である。第一歩は月面無人探査で調査することである。計画中の無人ミッションのいくつかは調査ミッションと考えられる。現地資源利用技術実証ミッションの前には、月極地域の永久陰地帯に入ることができるローバ走行ミッションにより追加情報を必要とするかもしれない。

地球近傍天体の50パーセントは含水鉱物を含んでおり、潤渇彗星（例えばP／ウィルソン＝ハリントン）の場合には表面下に水氷貯蔵層があるなど、潜在的な資源目標であると考えられている。妥当なコストでこれらの揮発性物質を使用することができるかどうかはまだ明らかではない。小惑星や彗星のような小型天体には顕著な重力場がないため、ISSは小惑星の資源抽出・処理構想の技術実証の場として良い場所かもしれない。第2段階は、地上望遠鏡と宇宙望遠鏡によって発見され特徴が明らかになった小惑星上での、小規模な技術実証であろう。

これらの初期段階で有望となれば、月または小惑星への有人探査により、大型資源回収・収集装置の無人設置に向けた観察、評価および課題解明の有意義なデータが得られるであろう。

月、小惑星、火星では、氷とその他の揮発性物質の形態や集積度が異なるのと同様、土壌も物理的、鉱物的、化学的に異なるが、処理技術には共通性があり、現地資源を使用するコストおよびリスクを下げられるであろう。月と小惑星へ開発中の無人ミッションは、試掘・処理する技術と装置に関して将来の火星資源利用の可能性に有効な情報となるであろう。



月極地域の揮発性物質を試掘するRESOLVEペイロード構想

相互運用性を高める標準規格

ミッションの複雑さが増し、諸機関間の関係が強くなるにつれ、ミッション目的遂行の主要部分に技術を提供しあう、機関間の協力が一般的になった。このことは有人探査、無人探査活動のどちらにも起きている。大型国際共同探査ミッションでは、アーキテクチャ、ミッション、インフラストラクチャ、およびシステムのそれぞれで、異なるレベルの相互依存関係を、各機関が受け入れ管理することが必要になるだろう。地球低軌道以遠の有人探査の性質上、現在の経験を越えてアーキテクチャを横断した相互運用を増すような、一定レベルの相互依存を受け入れ、関与して行くことが必須だろう。

宇宙システムの将来の相互運用性を促進する努力は大変重要である。国際標準規格および共通インターフェースなどを手始めに相互運用性を高めることにより、異なるシステムと国々が太陽系の探査で協働することを確実にするだろう。これは、複雑な探査ミッションのコストおよびリスクを低下させるための実証済みの方式である。

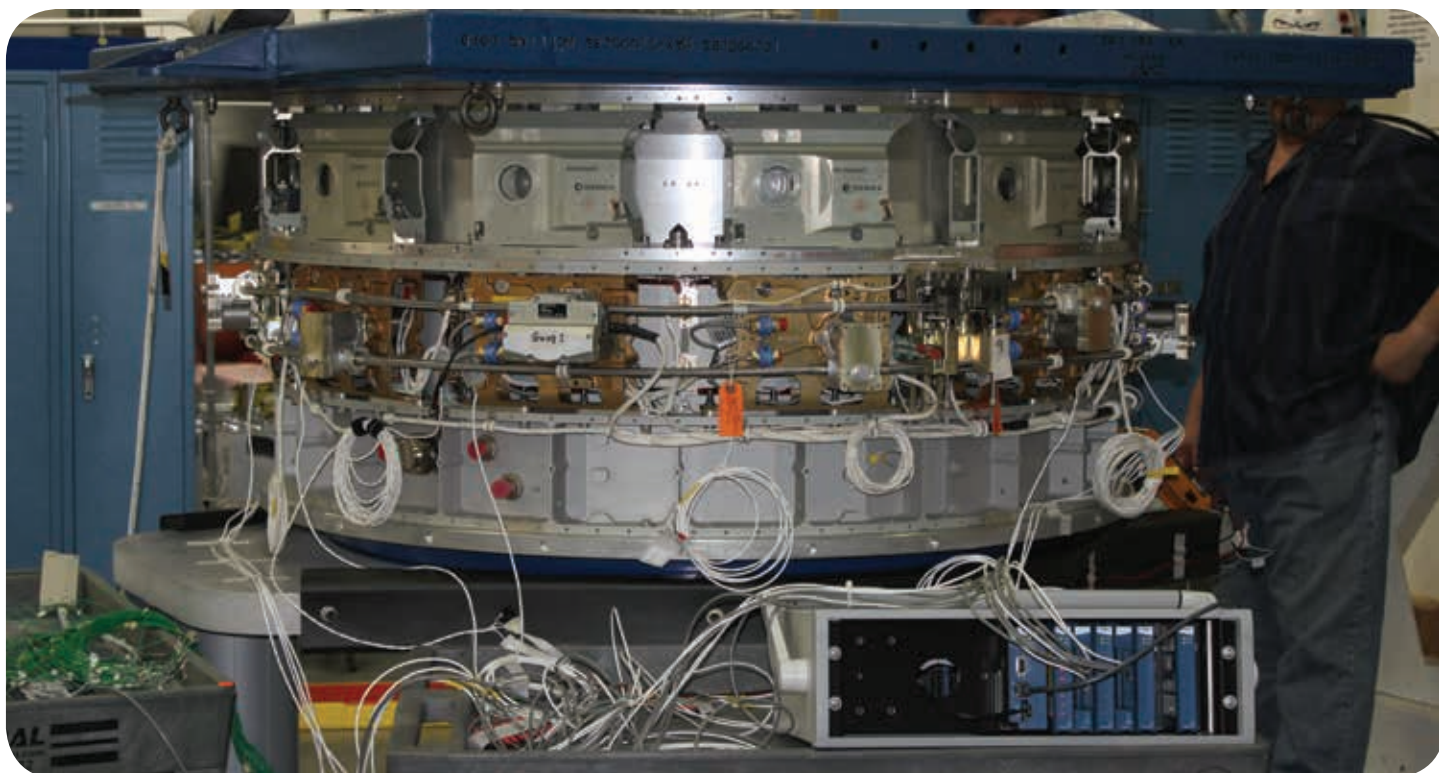
宇宙機関間運用諮問グループ（IOAG）、宇宙用周波数調整グループ（SFCG）および宇宙データシステム諮問委員会（CCSDS）に参加する機関は、データ通信およびミッション運用アーキテクチャの確立、宇宙通信用

の周波数調整と、現在および今後予想される最新テクノロジーを利用するための相互支援用技術基準の確立などを共同して進めている。

これらの作業のほとんどは既に進行中である。これらのチームは、将来の探査ミッションであり得る要求に応えられるサービス・カタログおよび技術標準を開発してきた。これらのサービスと標準は高度に相互ネットワーク化されたミッション運用を可能にし、複雑な有人宇宙探査ミッションの中へ新しいパートナーを参加させることを容易にするだろう。これらの国際組織に関するより詳しい情報はそれぞれ以下のURLで入手可能：

www.ioag.org、www.sfcgonline.org、www.ccsds.org

通信と運用の標準化に加えて、搭載システム用標準も同様に重要である。例えば、国際ドッキングシステム標準、搭載データ・インターフェース基準などの動きは搭載システム相互運用に必須である。そのような標準に関する作業は継続している。これらの基準を適用することで、多くの国によって開発された宇宙機により、ISECGミッション・シナリオで示されたようなミッションを行い、よりロバスタな宇宙探査活動を進めることができる。



ここに示された、プロトタイプ試験中のNASAドッキングシステムは、国際ドッキングシステム標準と互換性をもっている。2015年に2つのISSポートにこのシステムが装備され、宇宙船が結合する。

第4章 有人探査準備活動



世界の技術者と科学者は、人類の活動領域を宇宙へ広げ惑星火星を探査するため、必要不可欠な準備活動に取り組んでいる。投資効率を最大限にし、各機関の目標・目的の早期実現を可能にするため、各機関は国際宇宙探査ロードマップを参考にその準備活動を調整することができる。

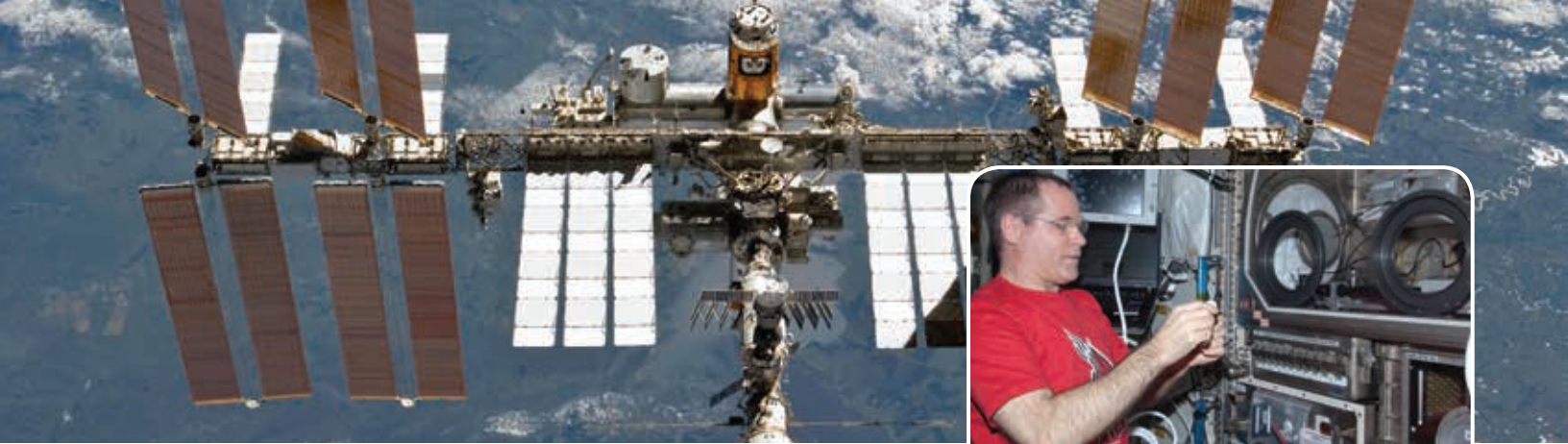


近い将来の調整と協力の機会を求め、また直接及び間接の成果を地上の人々にもたらせるよう、以下の分野において重要な活動が進められている。

- ・ ISSの探査への活用
- ・ 無人探査：有人探査にかけがえのない貢献
- ・ 先進技術の開発
- ・ 新世代の宇宙システムとインフラ
- ・ 探査目的地を模擬した地上類似環境実験
- ・ 宇宙探査のための健康管理とパフォーマンスリスクの管理



Photo credit: AMASE/K.O. Storvik



ISSの探査への活用

少なくとも2020年までのISS運用決定により、ISSパートナー機関は、多くの教育活動と事業のみならず、生命および物理学研究、地球観測と宇宙天文、技術実証、などを含めた、広範な利用活動をISS上で続けている。これらの分野の基礎・応用研究活動は科学知識全体に寄与し、人類に多大な成果をもたらしている。さらに、ISSパートナー機関は地球低軌道以遠のミッションの準備活動を進めている。

探査ミッションは地球からはるかな遠距離で行うため、より長期の宇宙飛行士滞在が必要で、新しいリスクを招いている。ISSはこれらの課題に取り組む絶好の場である。以下に示すように、ISS上の探査関連活動は、4つの主要分野に分けることができる。

探査関連活動

● 探査技術実証

探査ミッション向けの技術を完成させ、あるいは技術開発を促進させるような次世代有望技術の軌道上技術実証あるいは有効性確認。

● 主要システムの成熟化

信頼度向上、軽量化、及び低電力化のように、今日のISSを支えている技術のさらなる発展の促進。

● 人の健康およびパフォーマンスの最適化

人の健康とパフォーマンスへのリスクを理解し軽減する研究。

● 運用模擬

探査ミッションに伴う運用課題の理解の促進。



ケビン・フォード宇宙飛行士はInSPACE-3を用いて、宇宙および地球で機械システムの安全性および性能を改善する可能性のある、新種のスマート材料（機能性材料）の研究を行った。

最近の主な成果

- ▶ ロボットによる無人燃料補給の第1フェーズ実験が実施され、宇宙船の修理、燃料補給、機能向上の基盤技術として必要な人とロボットの連携作業の実証に成功した。次フェーズの試験が数年以内に計画されている。



- ▶ CNESおよび共同研究機関（DLRがCARDIOLABをROS-COSMOSがCARDIOMEDを担当）によって開発された循環器系モニタ装置は、宇宙飛行士の主要生理的パラメーターのモニターに使用されている。その結果は長期有人探査ミッション中の循環器系の機能障害を防ぐのに役立つ。さらに、CNESは中国の有人モジュール天宮（TianGong）での実験により心循環系研究を展開している。



- ▶ CSAの微小流動技術研究では、微重力環境での超小型血流血球計の試験をしている。血流血球計は、成分の定量化と生理学および細胞活動のモニタリングを可能にして、血液および体液の流れに注目するために使用される。宇宙飛行中のリアルタイム医療とモニタリングに使えるより小型でより安全な装置を目指している。



研究分野

クルーの健康およびパフォーマンス

ISSの有人研究では、最適なクルーの健康およびパフォーマンスを最適に保つための方策を考案し実証することを目指している。研究では、リスクについてのよりよい理解とこれらのリスクへの新しい対処方法の開発が進められている。宇宙飛行における循環器系、筋骨格、神経学/行動科学の諸課題に対する対処方法は重要である。さらに、宇宙でも地上でも人の健康における食事および栄養の影響について、栄養学上の対応策は不可欠である。最近の結果では、適切なビタミンDをとることが帰還宇宙飛行士の骨の維持・健康に役立つことが示されている。他の研究で、将来の長期探査ミッションで問題になる可能性がある宇宙滞在中の視力変化を引き起こす潜在要因も識別されつつある。

1年の有人ミッション

4人の宇宙飛行士がロシアのMIR宇宙ステーションに搭乗し宇宙で1年以上を過ごした。中でも438日間の最長ミッションは、1994-1995年にヴァレリ・ポリャコフ宇宙飛行士によって行われた。それ以来、居住システムおよび生理反応分野は著しく進歩した。骨と筋肉の減少への対応として実施されている様々な効果的な対策により、人体に対する微小重力による衰弱効果への対応策はかなり進歩してきた。健康とパフォーマンス影響が生じる境界点を確認するため、ISSでは、2名のクルーについてその滞在を通常の6か月から12ヶ月に延長する実験を2015年に行うこととなっている。この1年ミッションにより、骨格、筋肉および良好な健康状態を維持するための身体的対策の有効性が確認され、また現代の分析技術により様々な問題点も明らかにされるだろう。

クルー自律運用

火星ミッションでは、ISSの運用・利用では必要ないレベルのクルー自律運用が必要である。長い通信遅れ（最大20分）のため、搭乗員を訓練し、地上管制センターの定常的な支援無しで複雑な宇宙船を操作できるツールを提供することが必要になるだろう。ISS上での研究が既に始まっており、通信遅れとクルー自律度を上げた場合に考慮すべき事項が明らかになり始めた。

生命維持

水と酸素の補給がほとんどあるいは全く無しで長期間宇宙で生活することは、宇宙探査に必要な基本機能である。その実証が可能な唯一のプラットフォームであるISSでの日々の運用を通じて、その技術が成熟しつつある。これは、ガスと液体を扱う技術が重力環境に大きく依存しているからである。運用上の有効性を向上し、システム重量、消耗品、所要電力を現状技術より減らすため、ISSでは現在の生命維持装置を定期的に改良している。

二酸化炭素除去アミンスィングベッドのような、探査ミッションのための新技術プロトタイプもISS上で運用されている。アミンスィングベッド技術はオリオンでの採用を目標にしている。

宇宙用電力・エネルギー

大気の影響がなく、且つ、適切な熱的・動的負荷の条件下で性能確認を行うため、宇宙での太陽電池技術実証は重要である。流体、特に2相流体を用いて作動するような燃料電池およびシステムは微重力環境中の試験で成果が得られる。

新しい太陽電池セルがISS上で既に技術実証され、現在、ISS補給船上での新しい太陽電池パドルの技術実証が検討されている。運用状態が流体の制御に大きく依存する次世代再生燃料電池技術も、微小重力中での性能評価のためISSで技術実証することが構想されている。



ESAの先進閉ループ生命維持システム実験は、長期ミッション期間中の空気補給への宇宙飛行士作業を減らすための実験例である。



次世代ISS電池

人-ロボットの連携

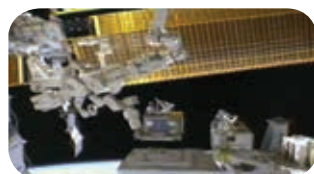
有人宇宙船内外で使用されるロボットおよび遠隔ロボットシステムは、人とロボット間の相互作用がある場合も無い場合も、ミッション目的を実現するために、人、ロボットそれぞれが自らの役割を果たす運用コンセプトの具体例を示すものとなる。Robonaut (ロボット・クルー) は、通常であれば時間がかかってクルーの研究活動を阻害するような、定型的なISS保守タスクを行うことから始めた。ISSで計画されている短遅延時間のロボット遠隔操作技術実証は、惑星面上のロボットを惑星軌道にいるクルーが制御し、高度な探査活動を行うことの利点を明らかにするだろう。



ISS上での人-ロボット協同作業

次世代通信、誘導

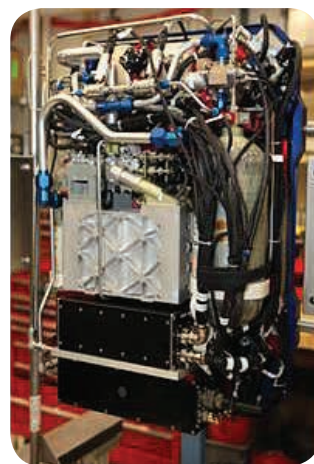
通信、航法、およびドッキング/バーシングの自動化関連技術は、プログレス、HTV、ESA-ATV、およびドラゴンなどのISS補給機により非常に成熟してきた。しかし、深宇宙での航法およびドッキングのダイナミクスは地球低軌道とは全く異なるものであり、この技術は今後大きく発展するだろう。これらの新しい技術のうちのいくつかはISSでテストすることができるが、その他の技術の習熟には地球低軌道以遠のミッションが必要だろう。いくつかの航法システムがISSでの技術実証に向けて評価中である。ネットワークの遅延耐性システムは、計画されたプロトコルを用いて、ISS上で既に実証実験中である。



ISS上の宇宙通信および航法誘導テストベッドは、無線通信と全地球測位システムの研究を進展させる。

新型宇宙服

船外活動システムの改良、着脱管理および耐環境（ほこり、バック・グラウンド・ノイズ）の技術実証はISSで既に行なわれている。次世代宇宙服サブシステムは今後数年以内にISSに配備されるだろう。



ISS搭載予定の携帯型生命維持装置試作機

大気圏突入・降下システム

ISSに到着した宇宙機は、ISSでのミッション後に地球大気圏に再突入する。ISSから小型衛星を放出し、大気に再突入させるいくつかの方法もある。これらの機会は、技術を実証し、かつ大気圏突入環境の知見を向上させるために利用できる。



再突入分解レコーダー (REBR)

いくつかの実証実験では、大気中でばらばらになる宇宙機内で大気圏環境データを記録し、この突入環境に対する新たな知見をもたらした。将来の宇宙船のために検討されているアブレーション材料も、ISSから帰還する無人機で試験され、実証実験での搭乗員リスクを低減している。

材料、構造および組立技術

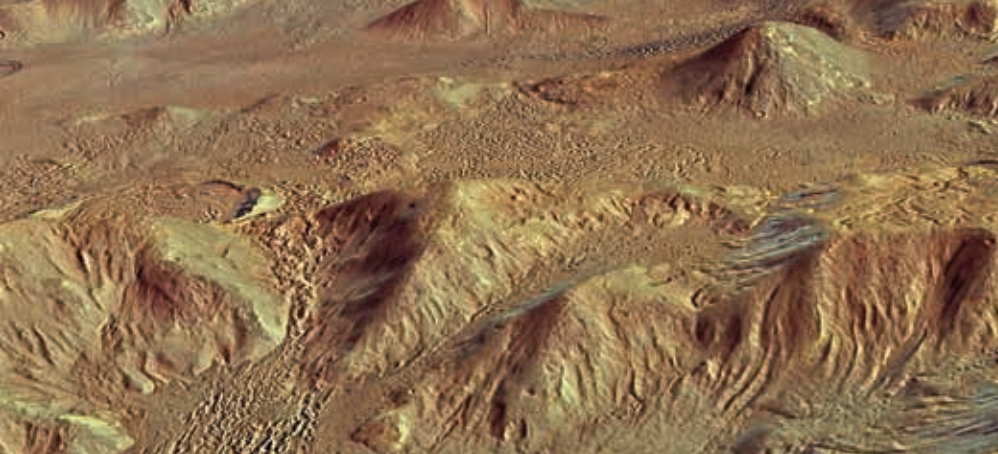
長期探査ミッションでは、宇宙での紫外線、熱および放射線環境に曝されるため、これらの厳しい条件に耐えられる材料を宇宙船に使わなければならない。ISSは、これらの材料を評価できる長期持続プラットフォームとなれる。最初の膨張式居住モジュールの宇宙での有人試験は2015年に行われるだろう。この実証実験では、ISS環境での放射線と微小隕石の下で、この膨張式モジュールの構造の健全性と気密性を評価することになるだろう。



コロンバス・モジュールの外部に取り付けられた欧州曝露技術プラットフォーム



ISSのパートナーは、非ISSパートナー国によるISS利用が可能になるよう努力している。80の国々からの研究者が、様々な研究を行なうためにISSの利点を活用している。ISSパートナー機関は、将来の探査ミッションの準備を進めるためにISSを使用する提案を歓迎している。



NASA火星ローバキュリオシティのジョン・クレイン岩石における自画像、2013年5月

無人探査: 有人探査にかけがえのない貢献

アポロ計画以来、無人ミッションは有人探査ミッションの先駆者を務めてきた。レンジャーに始まり、サーベイヤー、およびルナ・オービターで集めたデータは、境界条件を定め、月への最初の有人探査に向けた環境情報となった。宇宙機関は、人間が到達可能な目的地へ多くの無人ミッションを計画している。そのほとんどすべては国際協力により実施されている。これらの無人ミッションの多くは科学目的で進められたが、あるものは有人に向けたプリカーサミッションとして開始された。いずれの場合も集められた情報は、科学および有人探査目標を達成するのに役立っている。さまざまな科学ミッションが計画段階であるが、これらは有人探査のための情報収集や将来の有人探査に必要な技術の実証を行う機会を増やしている。この流れを進めるために、戦略的知識ギャップ (Strategic Knowledge Gap) が参加宇宙機関によって定義され議論されている。31ページにはその要約が示されている。

ロードマップ作成に関係した宇宙機関が計画中である有人探査目的地への無人ミッションは30ページにまとめられている。



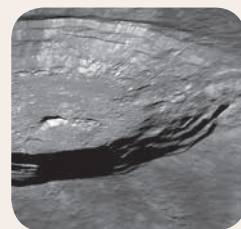
製作中のはやぶさ2フライトモデル

所見:

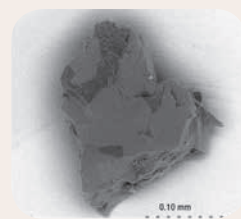
- ➔ 無人科学ミッションにより地球低軌道以遠の有人探査の準備に必要なデータを得ることができる。無人探査で得られた計測データが科学の進展および有人探査準備の両方に役立っていることは、科学と探査の両コミュニティによって一般的に認められている。

最近の主な成果

- ▶ NASAのLRO月周回機で継続中の観測により、高分解能画像、詳細地形、温度分布図、およびその他の最新リモートセンシングデータが得られ、有人宇宙飛行に関するハザードや利用可能資源の位置など、月環境についての劇的に包括的な理解が得られている。



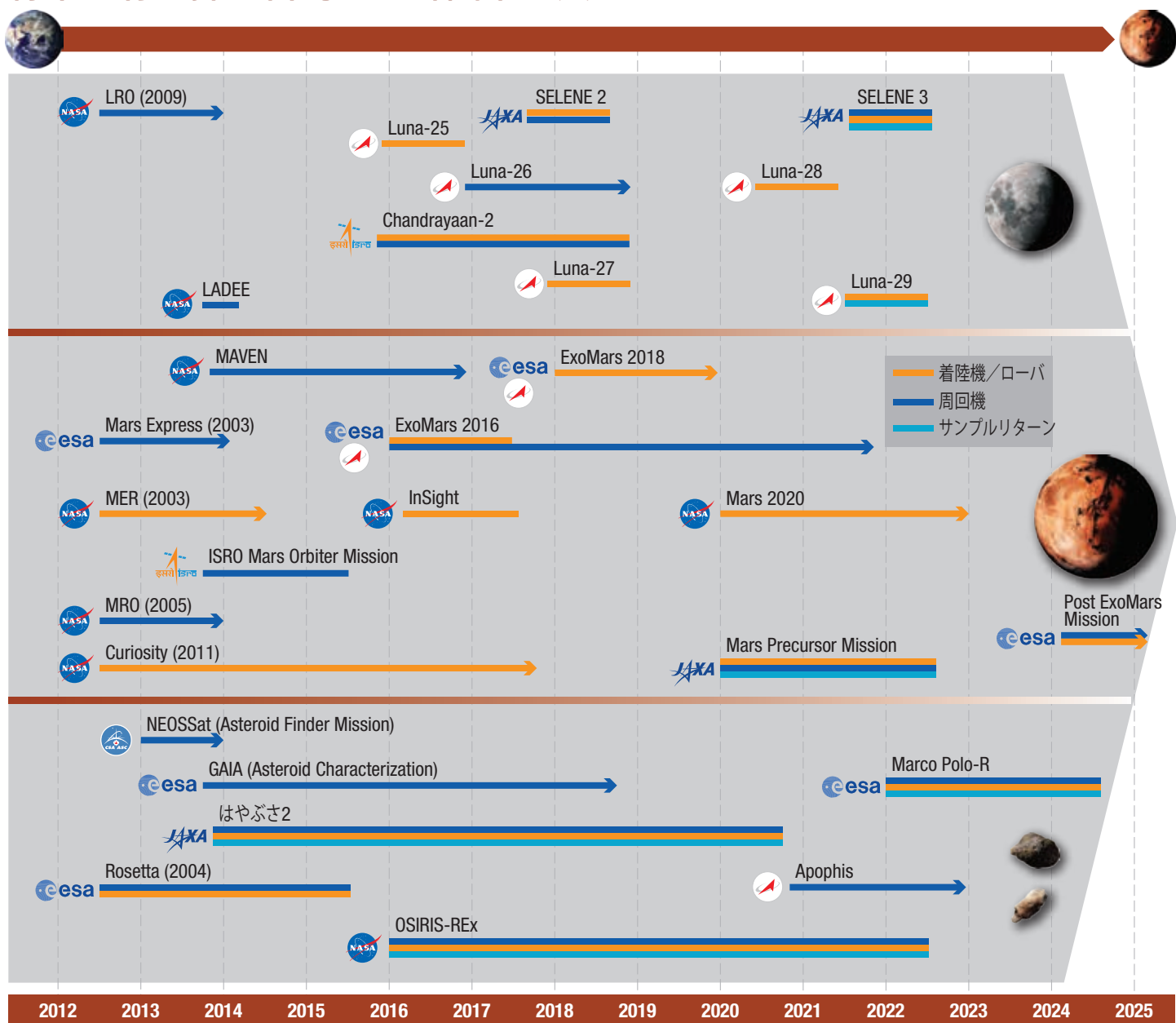
- ▶ JAXAのはやぶさ探査機は小惑星イトカワの特質を明らかにし、初めて小惑星から地球に直接持ち帰ったサンプルの徹底的な分析を可能にし、小惑星の分光測定と地球で見つかった隕石の化学分析の間の定量的関係を明らかにした。



- ▶ NASAのキュリオシティ火星探査機により、突入・降下間の火星の大気の特徴データ、および火星の表面の宇宙放射線の最初の測定データが得られた。



将来の有人探査目的地へ計画中の無人ミッション



ほとんどの無人ミッションはなんらかの形での国際協力によって行なわれている。国際協力の形には、宇宙機の共同開発や機器提供などがある。右のテーブルは、無人ミッションの国際協力の例であり、宇宙機を開発する主機関と、科学機器提供で貢献する機関が示されている。

ミッション	主開発機関	機器提供機関
Curiosity	NASA	CNES、CSA、DLR、ロスコスモス、スペイン
ExoMars	ESA、ロスコスモス	ASI、ベルギー宇宙機関、CNES、DLR、NASA、スペイン、スイス宇宙局、英国宇宙庁
はやぶさ2	JAXA	CNES、DLR
InSight	NASA	CNES、DLR、英国宇宙庁、スイス、スペイン
OSIRIS-REx	NASA	CSA

戦略的知識ギャップ：定義と評価

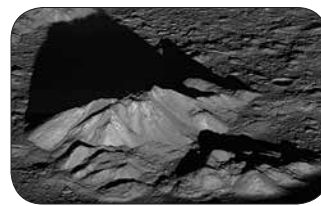
将来の有人探査の準備をするため、システム担当やミッション計画担当者は、目的地の環境を把握したり、ハザードを識別したり、資源を評価したりすることができるデータを求めている。最近や現在運用中、もしくは将来の科学ミッションは、これらのデータが得られる非常に貴重な機会である。これらのデータから得られる知識は、将来の着陸地点の選定や新システムの設計に役立ち、有人探査に伴うハザードを軽減させるだろう。地上での研究によってもある程度のデータを得ることはできるが、多くのデータはリモート・センシング、探査目的地でのその場測定あるいはサンプル・リターンなど、宇宙でしか獲得することができない。

有人ミッション計画担当者に必要な情報の多くは科学コミュニティにも同じように興味があるので、将来の有人探査目的地に関する戦略的知識ギャップ (SKG) を抽出するにあたって、ISECG参加宇宙機関は科学コミュニティなど関連するグループと検討作業を進めている。NASA、ESA課題チームおよびJAXA専門家からなる主要な独立分析／評価グループとの協議により、各探査目的地の知識分野ごとにグループ化された形で、SKGのリストがまとめられた。

そのリストは、クルー／ミッションのハザードへの関連性、ミッション・シナリオとの関連性、および複数の目的地への適用性有無に照らし合わせて優先度づけされている。

以下の表は、月、小惑星および火星のSKGの例である。表には、ギャップがどのように分類され、ギャップを埋めるのに利用可能な情報が示されている。SKGの詳細リストは別途まとめられているが、項目レベルのSKGリストはISECGウェブサイトで見ることができる。リストには、ギャップとその優先度が記述されている。さらに、リストにはギャップを埋めるための計測項目も示されている。また、リストには、運用中もしくは計画中の無人ミッションや地上活動がギャップを埋めるかどうかの識別、また、それでも埋まらないギャップに必要な追加の計測ミッションが識別されている。

無人ミッションの主目的が科学的探査であっても有人探査準備であってもそれぞれのコミュニティへの成果を著しく増加させる。SKG分析は、世界のステークホルダの宇宙探査への投資価値を増加させるための、今後踏むべき調整ステップを明確にしていこう。また、将来の無人ミッションと地上活動の目的の明確化にも寄与する。

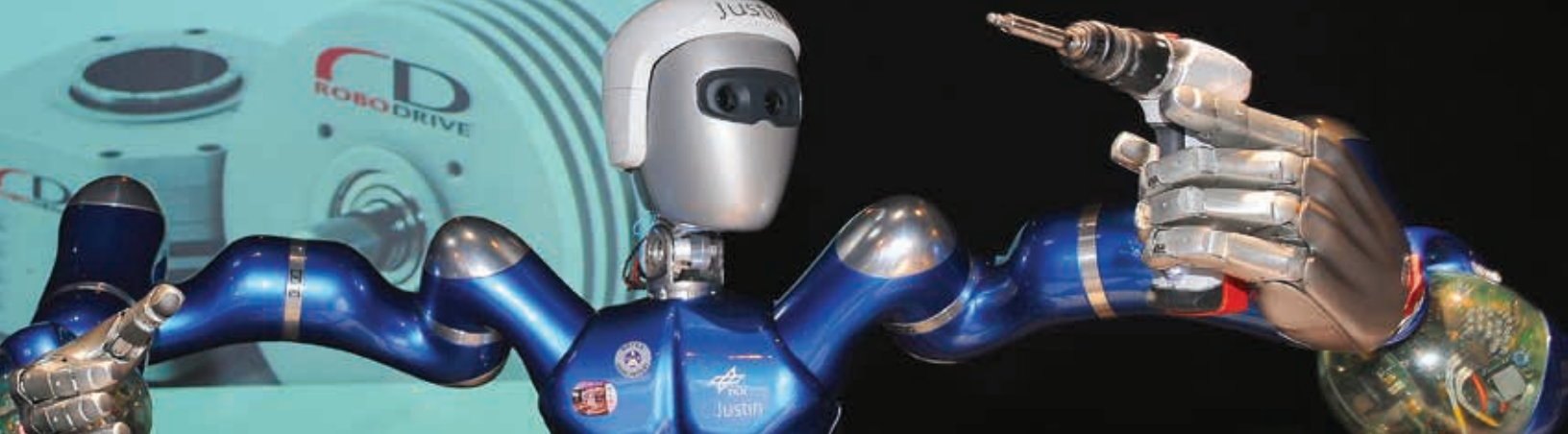


NASA-LRO月周回機によって撮影されたティコクレータの中央丘での日の出時の様子

ISECGは、有人探査のSKGを識別する多国間作業をリードしたマイケル・ワーゴ博士(NASA)へ追悼の意を表す。宇宙探査に向けた彼の才能と熱意は世界中の多くの人に惜しまれるだろう。

探査目的地	知識分野	戦略的知識ギャップ： 内容と優先度	計測目標	SKGに関するミッション又は地上活動	追加すべき計測： R = 無人探査 SR = サンプル リターン G = 地上活動
月	資源可能性	月面土壌含有の揮発物質： 成分／量／分布／水分量／ 月面土壌に含有された水素 類および他の揮発性物質	永久陰クレータ地域又は LRO等のリモートセンシ ングデータから判明した他 の地点の揮発性物質特性・ 分布のその場計測	ロスコスモスLuna- 25/Luna-27/Luna- 28、29 NASA-CSA RESOLVE	R、SR
地球近 傍小惑星 (NEO)	有人探査 目標小惑星	NEO成分／物理特性： 自転状態	異なる地点 (地上望遠鏡) と宇宙望遠鏡からの光度 曲線とレーダ観測	例：ゴールドストーン 天文台 (米)、美星天文 台 (日本)、デピディ 天文台 (仏)	G、R
火星	大気	大気モデル： 火星大気モデルは十分な観 測データに欠けるため確立 しておらず、突入・降下・着陸 を含むミッション計画におけ る信頼度は限定的	密度、圧力、温度、風向、お よび軌道情報	NASA ヴァイキン グ、パスファイン ダ、MGS、MER、フェニ ックス、MRO、MSL ESAマーズエクスプレ ス ESA-ロスコスモス ExoMars 2016,2018	G、R

¹ www.globalspaceexploration.org



器用なツール操作デモを行う、DLRのヒト型ロボット（ジャスティン）

先進技術の開発

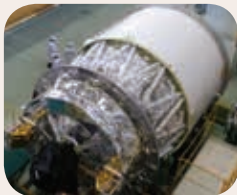
宇宙開発関係国は、過去50年にわたって大きな挑戦を乗り越えて主要宇宙技術を発展させてきたが、持続的な将来の探査ミッションを可能にするためにはさらなる技術進歩が必要である。これを達成するために、参加宇宙機関の探査技術開発活動の概要が情報共有され議論されている。他の機関の活動および優先事項についての共通理解を得ることは、それぞれの機関の研究投資分野に対する機関決定の参考になる。特定の技術領域に関する情報を共有することによって、共同研究の機会が見い出されるであろう。

中間目的地の探査を含めた、持続的な火星探査ミッションは、重要課題として識別されたいくつかの技術を必要とするだろう。そのような技術が33ページにまとめられている。重要技術課題について進行中の技術開発活動を評価すれば、開発ギャップを識別できる可能性がある。開発ギャップとは、参加機関による開発活動の現状計画からは、期待される時間枠の中での要求性能への到達が困難な技術のことである。これらの知見は、関心ある機関間の共同作業を促進する機会となるかもしれない。



カナダ宇宙機関による次世代大型ロボットマニピュレータは、伸縮ブームを特色とし、オリオンのような将来の探査船の厳しい収納要求と打上条件を満足するだろう。

最近の主な成果

- ▶ 2012年ドイツで組織された極限環境の無人探査研究連合は、地上あるいは惑星上の極めてアクセスが困難な地形での運用を支援する技術を識別、開発および試験するために、月面ロボットシステムと地球の深海探査の専門技術を共有することを目指している。
- ▶ JAXAは、再着火型高性能エクスパンダーブリードサイクル・エンジン、高効率推進剤利用、先進タンク断熱材を含む、次世代極低温推進上段の主要技術を開発している。
- ▶ NASAは、より大きなペイロードを最終的に火星へ着陸させる手段として、膨張式熱防護技術の実現可能性を実証するための弾道飛行試験を成功裡に行なった。この技術により、科学および有人探査ミッションの両方に対して着陸ミッション能力を向上させることができるであろう。

技術領域²毎の重要技術課題

軌道間推進技術 (TA02)	生命維持と居住システム (TA06)
- 液体酸素／メタン極低温推進システム (火星着陸船) - 先進軌道間極低温燃料貯蔵と液化 - 電気推進と発電 - 熱核推進 (NTP) エンジン	- 閉ループ・高信頼性生命維持装置 - 防火、火災検知と消火 (低圧) - 月・火星環境対応を含む、深宇宙用船外活動 (EVA) スーツ - 移動式先進EVA (スーツ・ポート)
宇宙発電およびエネルギー貯蔵 (TA03)	長期滞在における健康管理 (TA06)
- 高強度で自立展開式の宇宙用太陽電池 - 電気推進と惑星表面ミッション用原子力発電 - 再生型燃料電池 - 高エネルギー比で長寿命な蓄電池	- 宇宙飛行医療、健康管理と行動パフォーマンス - 微小重力の生物医学的対応策 - 人間工学と居住性 - 宇宙放射線保護／遮蔽
ロボティクス、テレロボティクス、および自律システム (TA04)	目的地で使用する有人探査システム (TA07)
- ロボットシステムの時間遅れ遠隔制御 - 宇宙服着用クルー近傍で動作するロボットシステム - 自律宇宙船、クルー、および地上ミッション管制自動化システム - 自動化／自律ランデブー・ドッキングと、目標相対航法	- 微小重力惑星表面運用 (地球近傍小惑星) のためのアンカー技術と船外活動ツール - 惑星表面移動 - 月・火星での現地資源利用 (ISRU) - 粉塵除去
	突入、降下、および着陸システム (TA09)
	- 突入、降下、および着陸 (EDL) - 火星探査級のミッション - 高精度着陸とリスク回避
通信および航法 (TA05)	熱制御管理システム (TA14)
- 高速データ双方向通信 - 標準化された高速多地点近傍通信 - 深宇宙での自律航法	- 低温下での動作機構 (月極地域) - 頑強なアブレータ式の熱防護 - 耐熱システム (火星や月からの再突入速度)

上記の表で示される重要技術課題の多くは、世界中の宇宙機関によって研究されている。以下で取り上げる重要技術領域は、適切な資金投資により、探査ミッションの斬新なやり方と著しい技術進展を生み出すだろう：

1. 電気推進用と惑星表面用途向け原子力電源

150kg/kWeの発電質量比となる、惑星上での40kWe級原子力発電システムは月と火星での探査と科学活動を強力に向上させるであろう。このような電力システムは、次世代電気推進宇宙機の実現性も強化するであろう。15kg/kWe以下の発電質量比となる1MWe以上の超大電力電気推進宇宙機は、地球低軌道以遠の探査目的地に効率的に貨物とクルーを運ぶことができる。

2. 高速、適応型、相互接続型の近傍通信

この技術は、状況認識のための複数宇宙機間の高速 (双方向20Mbps以上) 通信を可能とし、無線通信周波数条件を検知して自律的に周波数を調整するための近傍無線を可能とする。さらに、この技術は、ある宇宙機が他の宇宙機に情報を格納し、転送し、中継／回送することができて、さらに通信が可能な場合には地上局から宇宙機無線通信を再設定することもできる。

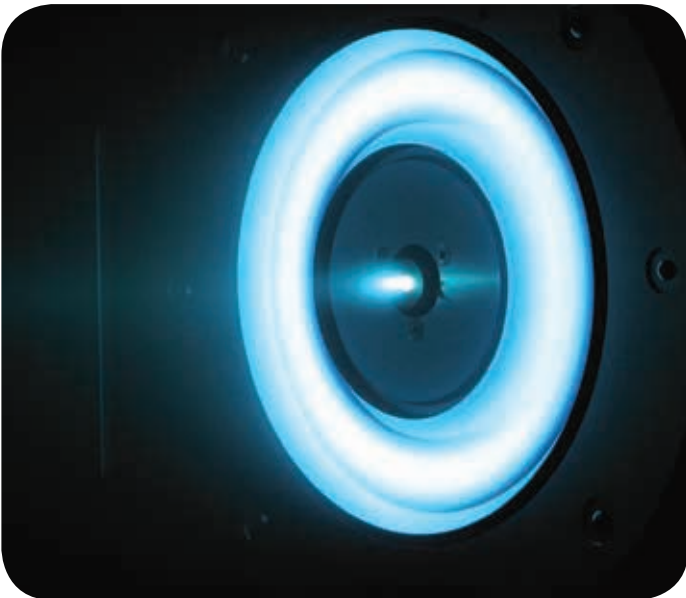
²技術領域の定義は www.nasa.gov に掲載。

3. 月・惑星表面ミッション用低温動作機構

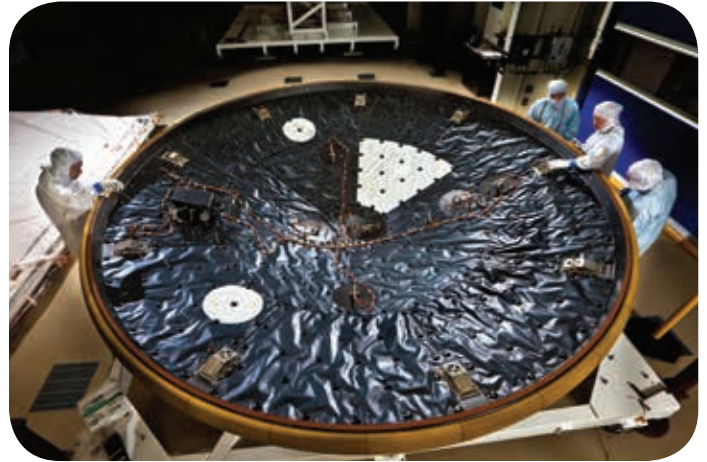
将来の深宇宙ミッションは、長期に亘って、極低温、超高真空のような困難な挑戦的環境に耐える、安全で信頼できる機械システムを必要とするだろう。外惑星と深宇宙無人探査ミッションに必要な、長寿命の極低温アクチュエーターが主要技術課題である。そのような信頼度要求を満たすためには、モータ、ギアボックス、位置/速度センサーおよびモータ制御電子回路などからなる、組立が容易で長寿命設計のモジュール構造アクチュエーターが、粉塵まみれの小惑星や月環境中の40Kから400Kの温度範囲で、何年も作動する必要があるだろう。



2台の探索車が、地上の模擬環境下で高信頼自律移動ソフトウェアの技術実証をしている。(左側がK-REX、右がアルテミスJr./カナダ宇宙機関)



NASAは、長期間ミッションでの信頼できる運用を目指して、大電力電気推進システムを開発している。

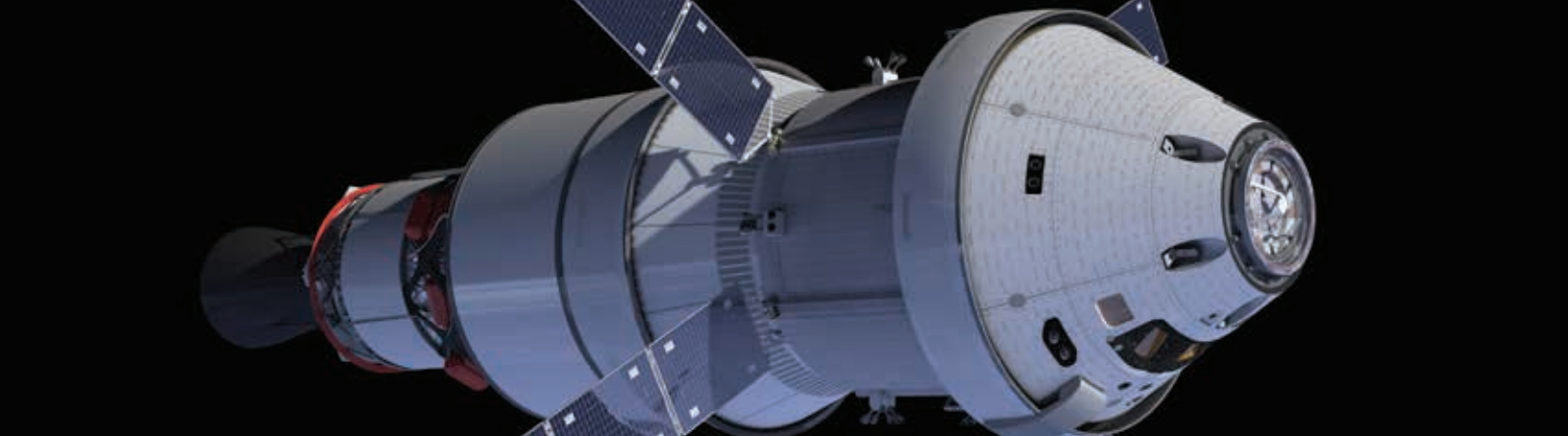


火星の突入・降下間の気圧と温度を測定する機器が、キュリオシティミッションで初めて搭載された。この知識は将来の火星熱遮蔽設計の改良につながるだろう。

同様の分析により、参加宇宙機関の過半（6機関あるいはそれ以上の）が予算計画を有する分野として、以下の分野が抽出された：

- 自動／自律ランデブー・ドッキング、近傍運用、目標相対航法
- ロボットシステムの時間遅れ遠隔制御
- 微小重力惑星表面運用のためのアンカー技術と船外活動ツール
- 長期宇宙飛行の医療手法
- 長期宇宙飛行時の飛行士の健康管理とパフォーマンス
- 長期宇宙飛行に対する微重力影響の生物医学的対応策
- 宇宙放射線防護
- 飛行中の環境モニタリング
- 惑星面の移動
- 熱制御

この予備的分析ではISECGコミュニティの技術開発計画を全面的かつ徹底的には評価していないが、要求される重要技術レベルと宇宙機関の開発計画との整合性を評価することは可能である。また、この予備分析に基づき、特定領域について研究者レベルでの議論を行えば、さらに詳細が明らかになり、機関間の調整が可能となるであろう。



新世代の宇宙システムとインフラ

地球低軌道以遠の有人探査には新世代の技術が必要となる。これらの将来システムは今後開発される技術と統合され、既存の技術に加え、現在運用中のシステムから学んだ教訓と得られた経験を踏まえたものになるであろう。地球からの惑星間の補給ミッションは、クルーからの急な要請に対して直ちに対応できないこと、また、短時間で地球に帰還するのが不可能であることから、新しいシステムは特に信頼性と安全性が高いものでなくてはならない。有人探査を支えるのに必要な主要輸送システムの開発が進められている。

NASAオリオン宇宙船

オリオンは、長期の深宇宙ミッションに宇宙飛行士を輸送し、地球に帰還させることができるNASAの探査用有人宇宙船である。次期打上ロケット（SLS）によるオリオンの初飛行は2017年に予定されている。オリオンは、打上アポートシステム、クルーモジュールおよびサービスモジュールの3つのモジュールから成っている。

打上アポートシステムは、クルーモジュールの上のタワーに設置され、打上および軌道上昇中の緊急事態発生時に、数ミリ秒以内に起動しクルーモジュールを切り離し安全領域に避難させる。

クルーモジュールは、クルーに安全な居住空間を提供し、消耗品と研究備品を格納し、クルー移動のドッキングポートともなる、輸送カプセルである。オリオンではクルーモジュールだけが、各ミッション終了後に地球へ戻る。

サービスモジュールは、オリオン宇宙船の燃料貯蔵と推進機能を担い、軌道変換、姿勢制御、および高高度上昇アポート能力を持っている。さらに、サービスモジュールのシステムは、居住環境に必要な水、酸素および窒素を供給し、電力を生成・蓄電し、宇宙船システムと機器の温度を維持する。地球大気に再突入する寸前まで、サービスモジュールはミッ

最近の主な成果

- ▶ NASAオリオンのハードウェアは、2014年の終わりに計画されている新宇宙船の最初の軌道上テストに向けて組み立てられている。



- ▶ NASAミコード組立施設では、次期打上ロケットの第1段部分の組立準備がすすめられている。垂直溶接センターによって大型第1段の円筒部分が製造・組立される。



- ▶ NASAは、ケネディー宇宙センターに、次期打上ロケット（SLS）およびオリオン飛行システムの、準備、組立、試験、打上、回収を行うための射場設備を整備している。



- ▶ ESAは、国際ドッキングシステム標準に完全準拠した、国際バーシング・ドッキング機構（IBDM）開発モデルの作業を進めている。IBDMは、衝撃荷重を軽減したドッキングを可能にするため、低質量/慣性の物体を含めた広範囲な目標へのドッキングを可能にする。IBDM部品を既存のドッキング装置に組み込んで、その汎用性を強化することも考えられている。



ションの全期間でクルーモジュールに連結されている。欧州宇宙機関は2017年に予定されている、オリオンの無人探査ミッション1にサービスモジュールを供給する予定である。

国内各地で作成された宇宙船サブシステムおよびコンポーネントはすべて、ケネディー宇宙センターに集められつつある。それらの部材は2014年の第1回探査飛行試験用のNASAオリオン宇宙船へ組み込まれる。飛行試験で得られたデータは設計に反映され、既存のコンピューターモデルの有効性を確認し、宇宙システム開発への革新的な新しい進め方を推進し、後続するオリオン飛行の全体的ミッションリスクとコストを減らすだろう。

NASA次期打上ロケットシステム

次期打上ロケットシステム（SLS）とは将来の探査ミッションを可能にする重量級打上ロケットである。有人仕様打上ロケットとして、地球低軌道以遠の目的地へオリオンとクルーを運ぶことができる。発展型SLSでは、居住モジュール、軌道間輸送機、着陸機、無人宇宙船、および将来のミッションに必要な他の機能を打上げることができるだろう。無人の探査ミッションと科学ミッションに対しては、SLSの大きな搭載容積によりシンプルな設計が可能となるとともに、探査機をより短時間で探査目的地へ輸送する速度を与えることができるだろう。

2017年の70トン級SLSの初飛行ではオリオン宇宙船の無人飛行試験を行う予定である。2021年には、オリオンとクルーを月遷移軌道に投入する予定である。70トンロケットは、4機の液酸液水エンジンを備えた第1段、2機の5セグメント固体ロケットブースター、および極低温上段で構成される。

SLSは、70トンの打上能力から130トン構成まで発展することになっている。2017年打上の初期能力開発ばかりでなく、ロケット大型化の作業は既に始まっている。例えば、ハードウェア・リスク削減は液体ロケットと固体先進ブースターの両方で進められている。さらに、NASAは、SLSがこれまでにない最も強力な打上ロケットへ発展する際に、さらなるミッションを可能にするような、次世代極低温上段のオプションも研究もしている。

ロスコスモス輸送システム

ロシアの新型有人宇宙輸送システムが開発中である。新システムはソユーズ宇宙船の成果を広範囲に取り込んで開発され、宇宙飛行士を月近傍へ連れて行き、地球に帰還させることができるとされている。そのシステムは、次世代有人

宇宙船と次世代有人打上ロケットで構成される。新有人宇宙機の初飛行は2018年頃に構想されている。新打上ロケットは、発展して地球低軌道に50トン以上を打ち上げられるようになるだろう。

有人宇宙機は、地球低軌道以遠へのクルー輸送および活動支援を行うだろう。宇宙居住モジュールあるいは関連施設に結合され、期間を延長して滞在することも可能である。

次世代打上ロケットはロシアの新ポストチヌイ宇宙基地から発射されるだろう。この宇宙基地は2015年にソユーズ・ロケットの最初の打ち上げで運用可能になると計画されている。



NASA SLSの構想図



オリオンとSLSの上段構想図

将来的に探査ミッションを可能にするには、多くの宇宙機関からの重要な貢献を必要とするだろう。NASAとRoscosmosが次世代探査システムを開発している間、他の宇宙機関は探査ミッション・シナリオとその中での各機関の役割について、それぞれの意思決定に関わる検討をすすめている。ISECGミッション・シナリオはこれらの検討に役立つ情報となっている。



コンコルディア：有人探査類似環境模擬に用いられた南極
仏一伊基地

探査目的地を模擬した 地上類似環境実験

地球低軌道以遠の探査の準備を促進するため、探査ミッションを模擬できる様々な類似環境サイトや施設が、現在、世界の宇宙機関において利用されている。各機関は、これらの活動を最大限利用するため、地上類似環境実験の実施方針と学習経験などの成果を定期的に情報交換している。

この国際宇宙探査ロードマップで構想されたような将来ミッションには、新しい技術、方法および運用手法が必要で、それらは、1) 想定環境の中で、システムが期待したように機能するか、あるいは予期せぬ動作をしないかの確認、2) 様々なシステムと運用方法の組み合わせでの性能比較、3) 飛行士、地上支援要員、技術者および管理者の訓練のために、模擬環境で徹底的にテストされる必要がある。

さらに、類似環境実験活動は、過去および進行中のミッションのデータ解釈を行う科学コミュニティにとっても非常に有用である。このような技術的な役割に加えて、最近の経験が示すように実際のミッションが起こる前に、類似環境模擬の面白く刺激的なミッション模擬に、一般市民を参加させることにも用いることができるだろう。

類似環境実験では、科学、技術、あるいは運用上の疑問点への試験を行うことができる。地上類似環境実験は、非常に特化し、厳密に制御された単一目的試験から、ミッションの異なるフェーズを模擬できるよう設計された多面的な科学・技術・運用の総合的試験までさまざまな範囲で行うことができる。地上類似環境実験には、問題のシステムや活動をテストするため、ミッション環境のある面を模擬できるような、物理的な場所か設備が必要である。

国際宇宙探査ロードマップ初版の公開以来、地球低軌道以遠の将来ミッションの技術レベル向上の大切なステップとして、各機関は多くの地上類似環境実験を成功裏に行っている。それらの例には以下のものがある：

技術開発類似環境試験：全ての機関が、近々のロボット活動に応用できる技術開発を進めている。例えば、JAXAは、東京の近くの伊豆大島の地質学的に月か火星に似ている砂漠で、小型無人探査車の野外試験を行い、レーザー測距イメージャー、レーザー照射蒸発分光計、および自律運用のような新しい装置を試験した。（写真参照）将来の宇宙探査技術開発の官民パートナーシップの主要メンバーとして、ASIは火星地形模擬施設および火星突入、降下、着陸施設を開発した。これらのASI施設は模擬火星環境でのローバと着陸機の試験に用いられている。



火山地帯のJAXA小型ローバデモ実験

他惑星で人の生存を維持するための重要システムの地上試験が行われ、無人実証への準備が進んでいる。将来の惑星面探査に役立つ類似環境模擬試験として、NASA、CSA、スミソニアンおよびマインツ大学（ドイツ）から成るチームが、現地資源活用技術・運用の模擬と試験を、ハワイで10日間に渡って行った。2012年に行なわれた本試験では、RESOLVE（レゴリス、環境科学、酸素および月の揮発性物質抽出）試作機の試験も行った。NASAのRESOLVE装置一式とCSAのアルテミスJr.ローバ上のカナダのドリルと航法誘導機器を実験パッケージとして、月極地域の準永久陰領域で氷と揮発性物質を、見つけ、観察し、分布図を作ることを目指している。このシミュレーションは、地球から輸送される補給を減らすために現地原材料を使用し、より持続的なミッションに向けた準備となるものである。

探査ミッション運用シミュレーション：2011年から2012年の一連のシミュレーションで、NASAの研究・技術調査チームは、ロボット装置、EVA飛行士および小型宇宙探査機搭乗の宇宙飛行士、のいくつかの異なる組み合わせで、小型の地球近傍小惑星を探査する手法の有効性を比較した。さらに、これらのシミュレーションでは、4人クルーのメンバーにとって、EVAスーツ着用か、探査船内部か、あるいは深宇宙居住モジュール内かのいずれが最も有利な場所かの評価も行った。チームは、異なる遠隔地（NASA JSCおよびESA ESTEC）から従来通りの支援機能を提供する地上ミッション管制員への通信時間遅れの影響を評価した。これらのシミュレーションで、優先度の高いタスクを遂行する際には、EVAクルーが最も効果的であることが実証された。

これらの技術開発だけではなく、将来ミッションの作業性を増しリスクを軽減するキーとなる人的要因に関わる知識の向上を図るための地上類似環境実験も行っている。以下いくつかの例として：

人的要因とパフォーマンスのシミュレーション：3人のロシア人、2人のヨーロッパ人および1人の中国人からなる6人のクルーが、モスクワのロシア生物医学研究所で有人火星探査ミッションの520日間のシミュレーションMars500を行った。この研究の目的は、実際の火星ミッションに備えて、データ、知識および経験を集めることであった。2010年6月にチャンバーに閉じ込められた6人のクルーメンバーは、通常の有人宇宙ミッションで起きる程度の、模擬管制センターおよび家族及び友人との音声接触の他は、お互いの個人的接触があるのみであった。惑星間ミッションをシミュレートするよう、一方向で最大20分の時間遅れが管制センターとの通信に組み込まれた。また、クルーはISSで使用されているのと同じ食事を与えられた。研究成果は、長期間そのような閉鎖環境に住んだ場合の主要な心理学・生理学効果を決定するのに役立った。

ASI、CNESおよびESAは、フランス極地研究所（ポール・エミール・ヴィクター研究所）およびイタリア南極観測プログラムと協同で、有人探査類似環境としてコンコルディア基地の特殊な環境（隔離、幽閉、気候、低酸素）を使用した、医学、生理学および心理学における、様々な人の健康およびパフォーマンスに関わる研究を支援している。

CNES、DLRおよびESAは、弾道飛行航空機を用いて、月重力、火星重力および微小重力の実験を支援している

（下記の写真参照）。これらの実験では、人の健康とパフォーマンスを中心に、広範囲の研究課題に取り組んでいる。人的要因に関する技術開発と研究だけでなく、各機関は、さらに惑星科学を理解し分析するため、科学とその手法に着目した類似環境模擬活動も行っている。

科学操作と手法に関する類似環境模擬試験：CSAは一連の類似環境ミッションシリーズを行っている。1) カナダ北極（アクセルハイバーク島）と廃坑（アスベストス、ケベック）の天然泉での、無人メタン検出試験を行った。2) 水中微生物の多重プラットフォーム探査では、新しい画像技術と通信技術の実証実験を行った。（パビリオン湖、ブリティッシュコロンビア；NASA共同で）3) カナダの隕石衝突クレータを利用して、サンプル・リターン選別において、どのように有人―無人技術を組み合わせれば良いかを調べた。（ミスタスティン、サドベリー）

各宇宙機関は、ここで紹介したような類似環境模擬実験を継続的に進めて、地球低軌道以遠のミッションに



月と火星環境をシミュレートするために、部分重力弾道飛行が、CNES、DLRおよびESA共同で最近行われた。

必要な新技術を段階的アプローチ（まず地上で技術と運用を開発し、次に類似環境模擬活動で構想を証明し、無人ミッションでの有効性実証と続き、最後に有人宇宙探査アーキテクチャに取り入れる）で実現しようと考えている。

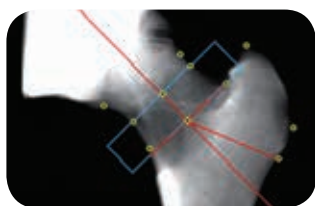


宇宙探査のための健康管理とパフォーマンスリスクの管理

クルーの健康およびパフォーマンスは地球低軌道以遠の有人探査の成功にクリティカルである。長期ミッションと惑星での活動は多大なリスクをもたらすので、宇宙飛行士を健康で活動的に保つためには、これらのリスクを知って軽減しなければならない。主なリスク要因は放射線と微小重力に長期間さらされることである。さらに、自律的な早期診断、怪我治療および病気治療ができるような搭載機能が重要である。

これらの課題に取り組むために、各機関は積極的に、研究所、類似環境、あるいはISS上で研究を進めている。やらなければならない課題が多数残されているので、各機関は、探査ミッションからの要求に適時に応えられるよう、ますます協力を深めている。リスクとその有効な軽減方法について共通に理解することにより、各機関のリスク軽減の研究とハードウェア開発への努力を効果的にしており、この分野での国際協力は大変重要である。

クルーの健康とパフォーマンスは基本的で主要な関心事なので、クルーが健康にきちんと活動できることを確保しつつ、有人宇宙ミッション期間を延長できるよう、ISSパートナー機関は積極的にISSでの研究を活用している。健康リスクは地球低軌道以遠への探査ミッション計画立案に関する決定を左右する重要事項である。これらは次ページに一覧表としてまとめてある。図表は、複数の探査ミッション・シナリオに関係するこれらのリスクの現状を交通信号の赤・黄・緑を使って視覚的に記述したものである。



腰のCT画像により、ISS滞在中の腰骨格（破砕リスク査定）の変化をモニターする。



JAXA宇宙飛行士星出彰彦が、ISS搭載の新型負荷運動器を使っている。



DLRの短腕有人セントリヒュージにより、人間生理学とパフォーマンスへの重力影響に関する過重力研究が進められている。

- ・赤（受容不可）：当該ミッション・シナリオにおいて、現在、規定された健康と作業基準を超過している特質（重要性、可能性、不確実性）が1つ以上あるリスク。
- ・黄（受容可能）：その特質（重要性、可能性、不確実性）のすべてがよく理解されているリスクで、既存の基準を満たすが、完全には制御されておらず、結果としてより高いリスク状態を「受容」させてしまうもの。リスク状態の低減は重要であるが、このリスクがミッションを排除するとは考えられていない。
- ・緑（制御可能）：その特質（重要性、可能性、不確実性）のすべてがよく理解されているリスクで、リスクを制御するための軽減方策が認められているもの。コンパクトで信頼できる負荷運動器のような最適化された軽減方策を追求することはまだ有用である。

探査における主要な健康管理とパフォーマンスリスク	ミッション制限 無し 実行	ミッション制限 無し 但しリスク増加 実行	ミッション制限 中止	ミッション			
				ISS (6ヶ月)	月 (6ヶ月)	深宇宙 (1年)	火星 (3年)
筋骨格：初期骨粗鬆症発症への長期健康リスク 筋肉強度と有酸素能力低下によるミッションリスク							
感覚運動：知覚変化／機能障害によるミッションリスク							
視覚症候群：微重力に引き起こされた視力障害および高い頭蓋内圧によるミッション中および長期間にわたる健康上のリスク							
栄養摂取：食物の適切な量、質および多様性を提供できないため生じる行動・栄養面の不健康によるミッションリスク							
自律医療処置：船内運動、診断、治療および搭乗医師の存在/不在など、十分な医療処置をミッション期間中に提供できないことによる、ミッション及び長期健康リスク							
行動科学とパフォーマンス：ミッション中および長期間にわたる行動科学上のリスク							
放射線：放射線被ばくによる発癌および組織疾病変性の長期的リスク－大部分は地上研究で対応可能							
有毒性：潜在的な有毒物質（ほこり、化学薬品、病原菌）の適切なモニタリング、警報システムあるいは理解を持たずに有毒環境に晒されることによるミッションリスク							
自律危機対応：生命維持装置故障および他の緊急事態（火事、減圧、有毒大気など）におけるクルー救助シナリオなどに伴う医学的リスク							
低重力：月、小惑星、火星における船内／外作業順応に伴う長期リスク（前庭と行動機能障害）および飛行後機能回復訓練（リハビリテーション）							

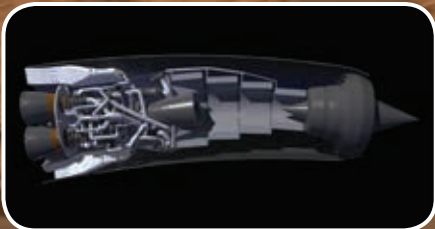
識別されたリスク分野はすべて、国際パートナー全体で精力的かつ独立に研究活動が行われている。ISSによって得られる機会を最大限に利用するために、国際活動としてすべての利用可能資産を使用してこれらのリスクに取り組むことが、国際探査への準備を確実にする最良の方法であることに、ISSパートナーは合意した。国際宇宙ライフサイエンス・ワーキンググループのような既存のワーキンググループが、国際的な調整努力を確実にするために活用されている。各機関は、運用に関わる医療・生物医学科学データを共有し、技術と方法論を標準化し、ISS搭載の機器と被験者クルーを共有する努力を積み重ねている。これらの努力は進行中で、成功への鍵である。

研究活動だけでなく、ISSでは対応方策と軽減方策の有効性確認も行うことが可能である。ISSで用いられている対応方策は、健康とパフォーマンスリスクの管理に幅広く有効である。しかし、探査ミッションの成功に向けて、さらなる進歩がなされなければならない。

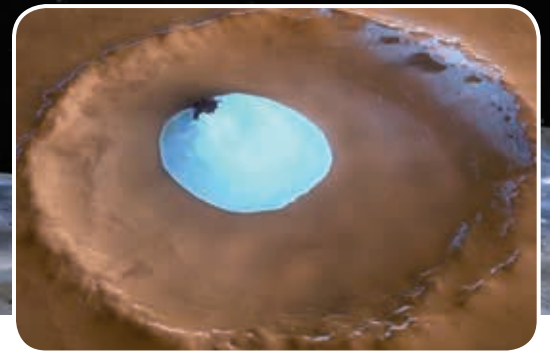
所見：

- ➔ 各機関は、長期滞在探査ミッションにおけるクルーの健康とパフォーマンスのリスクに対し、リスク対策に必要な重量／体積リソースの削減とリスクを許容範囲にする努力を優先して、その軽減対策の国際協力を推進すべきである。

第5章 結論



国際宇宙探査ロードマップは、最終目標を火星とした太陽系有人探査の道筋を定めるための国際的な試みをまとめたものである。これら挑戦的なミッションは国際協力により可能になるだけでなくその成功確率も高まるであろう。今後も加盟宇宙機関が協力して探査ミッション・シナリオを発展させ、そのための準備作業についての調整結果をまとめていくことにより、本ロードマップは引き続き更新されて行くであろう。



火星の水氷

宇宙探査はその当初から人類のために多大な成果をもたらし続けている。獲得された知識は、科学と技術を革新し、新製品、新サービスをもたらし続けている。地球上の人々に対する文化的、思想的なインパクトは、私たちの好奇心を刺激し宇宙における存在意義を考えさせる。挑戦的課題を乗り越え探査のために必要な技術を得ることによって、共通の課題や機会に取り組む能力を各国にもたらすだろう。

国際宇宙探査ロードマップの検討継続と国際協力の発展には、参加宇宙機関の政策と計画の調整だけでなく、計画を成功裏に実行するための政府間の取り決めに関しても十分に話し合う必要がある。特定のミッション・シナリオを実施するか否かは、ISECGの決定事項ではなく、探査アーキテクチャやミッションデザインなどについて幅広く国際調整した結果をベースに、各国の政策決定と様々なレベルでの国際的調整に従うことになるであろう。数年以内には、多くの国によって最も効果的に持続的な有人宇宙探査を実行するための国家政策と法的枠組みが作られることになるであろう。

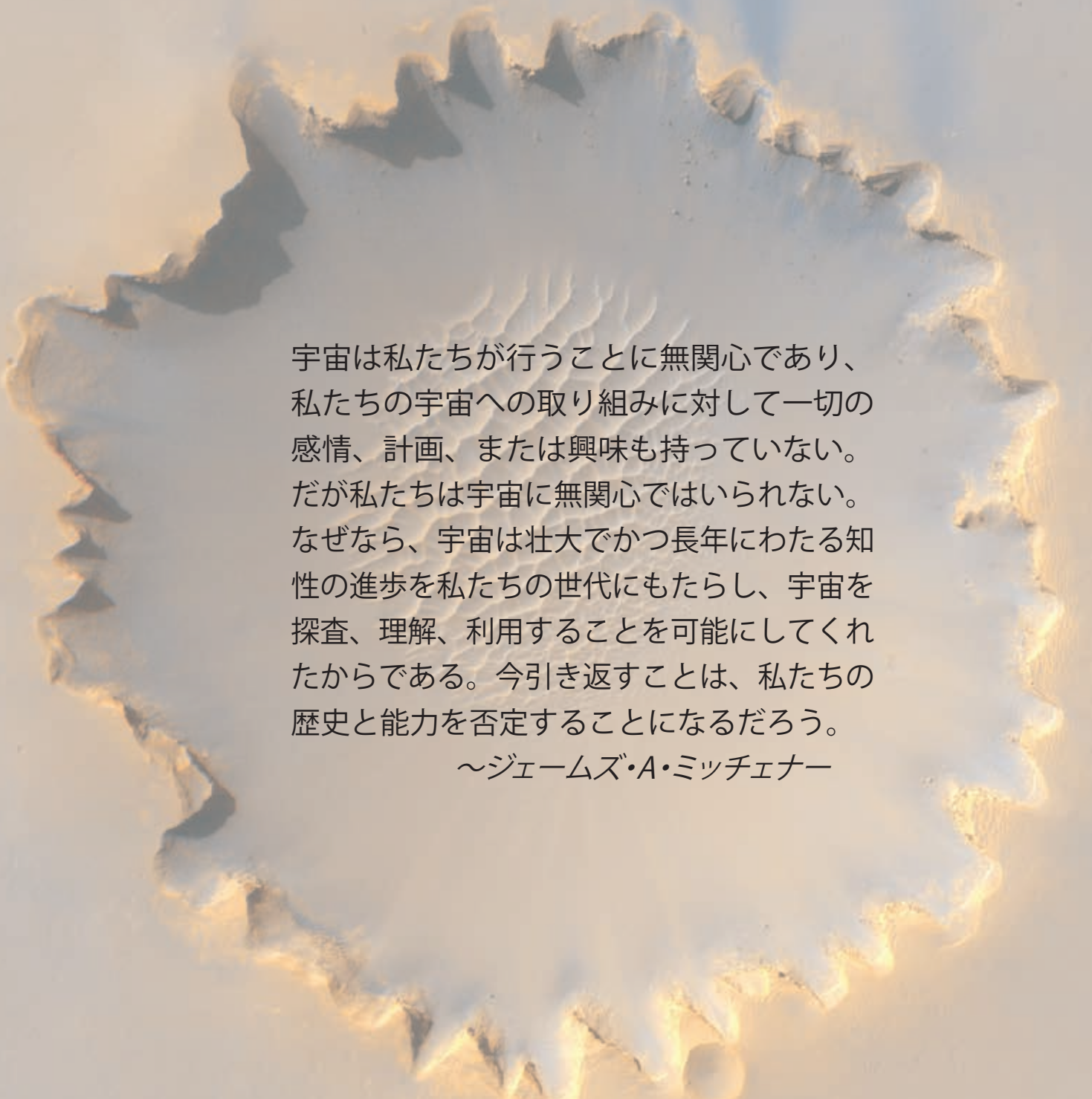
いくつかの機関では、地球低軌道以遠のプロジェクトへの投資計画を進めようとしている民間企業との対話を進めている。そのような民間企業努力を成功させるため、宇宙探査への政府の長期的な関与、民間企業のアイデアを政府の検討に取り入れる機会の継続、および関連法の整備などが確保されることを民間企業は求めている。

本文書はいかなる参加機関の、いかなる種類のコミットメントを与えるものではないが、国際宇宙探査ロードマップは国際的、戦略的、組織的、そして包括的な宇宙探査の枠組み構築に向けたプロセスの重要な一歩である。

2011年9月に公開した国際宇宙探査ロードマップの主要所見は、ここ2年の議論のポイントであった。以下に今回の新しい主要所見をまとめて示す。

1. 数十年間にわたって持続的な有人宇宙探査事業を構築するために、各宇宙機関のリーダーは、宇宙探査が国民へ明確な成果をもたらすように注力しなければならない。
2. 各宇宙機関は、ISS、月近傍、月面、あるいは無人での国際協力ミッションが将来の国際火星ミッションのシミュレーションや準備として活用され、結果として複数のパートナーが将来の有人探査に主要技術で貢献できるようになることを期待している。
3. 宇宙探査の共通目標達成における宇宙飛行士の存在意義を高めるために、有人支援サンプル・リターンや遠隔操作のような新しいミッション構想がさらに検討されるべきである。
4. 無人科学ミッションにより地球低軌道以遠の有人探査の準備に必要なデータを得ることができる。無人探査で得られた計測データが科学の進展および有人探査準備の両方に役立っていることは、科学と探査の両コミュニティによって一般的に認められている。
5. 各機関は、長期滞在探査ミッションにおけるクルーの健康とパフォーマンスのリスクに対し、リスク対策に必要な重量／体積リソースの削減とリスクを許容範囲にする努力を優先して、その軽減対策の国際協力を推進すべきである。

この国際宇宙探査ロードマップの第2版および今後の改訂版は、各宇宙機関と各政府間の拘束力のある合意に向けての技術的基盤となるであろう。



宇宙は私たちが行うことに無関心であり、
私たちの宇宙への取り組みに対して一切の
感情、計画、または興味も持っていない。
だが私たちは宇宙に無関心ではられない。
なぜなら、宇宙は壮大でかつ長年にわたる知
性の進歩を私たちの世代にもたらし、宇宙を
探査、理解、利用することを可能にしてくれ
たからである。今引き返すことは、私たちの
歴史と能力を否定することになるだろう。

～ジェームズ・A・ミッチェナー



ISECG

国際宇宙探査協働グループ

国際宇宙探査ロードマップは国際宇宙探査協働グループ (ISECG) の活動の成果である（ただし、拘束力はない）。この第2版は内容の発展と成熟に伴って定期的に更新される。ISECGは14の宇宙機関により設立され、興味のある機関が目的と計画を共有するとともに、相乗効果が期待できるコンセプトを検討するためのフォーラムの場を提供することにより、国際探査戦略を推進することを目的としている。ISECGは、加盟宇宙機関が国際協調による宇宙探査を実現するパートナーシップに向けて具体的な手段を講じるための取り組みを進めている。



出版サービス提供者:

米国航空宇宙局

本部
ワシントンDC 20546-0001

www.nasa.gov

本文書はオンラインで <http://www.globalspaceexploration.org> より入手可。