

月面活動に関する アーキテクチャの検討について

内閣府宇宙開発戦略推進事務局
2025年3月25日

はじめに

- 宇宙基本計画（2023年6月13日閣議決定）に、「人類の持続的な活動領域の拡大と新たな市場の構築を見据え、月面活動に必要な技術開発・実証等を行うに当たって、政府と宇宙開発の中核機関であるJAXAは、月面活動に関するアーキテクチャの検討を進めつつ、アルテミス計画等の進捗を考慮し、技術開発のベンチマーキングを定期的実施することで、宇宙実証・導入まで見据えた研究開発工程の具体化を遅滞なく実施」と記載されている。
- 上記のような状況を踏まえ、2023年度、2024年度の2年間にわたり月面活動に関する産学官の有識者、ステークホルダと委託調査を通じて検討を進めてきた。
- その際、JAXAが進める技術開発・探査プロジェクトや、スターダストプログラム（宇宙開発利用加速化戦略プログラム）における通信・測位、エネルギー、無人建設、食料技術開発に係る事業、SBIR事業（Small/Startup Business Innovation Research）等の我が国の月面開発事業の全体を俯瞰しつつ、最新の国内外の月面活動に関する動向や、将来的に想定される月面活動の具体例を整理した。
- その上で、ステークホルダが将来の月面活動の検討や探査、技術開発・実証等を行う際に、どのような全体のアーキテクチャや実現シナリオを前提とすべきかについての仮説を、国際社会における貢献等も見据えながら検討した。
- 本資料は、「月面活動に関するアーキテクチャ」に関し、現時点における検討状況を報告するものであり、今後国内外のより幅広いステークホルダと議論を進める上での一つのツールとするものである。具体的な政策の技術開発のベンチマーキングについては定期的に改訂される宇宙基本計画工程表や宇宙技術戦略によるところである。

月面活動の意義

- 宇宙科学・探査における新たな知と産業の創造（宇宙基本計画（2023年6月）より）
 - 月面の水資源は持続的な有人活動をサポートし、生命維持、エネルギー生成に必要な資源となる。
 - 月面には水以外にも半導体材料となるシリコンや、鉄、アルミをはじめとした金属資源も存在。
 - 深宇宙探査に向けたテストベッド、拠点としての役割も期待される。

水資源

水資源の存在が月の南極盆地内に確認されている。
用途：生活用水、電気分解により呼吸用酸素や燃料を製造可能

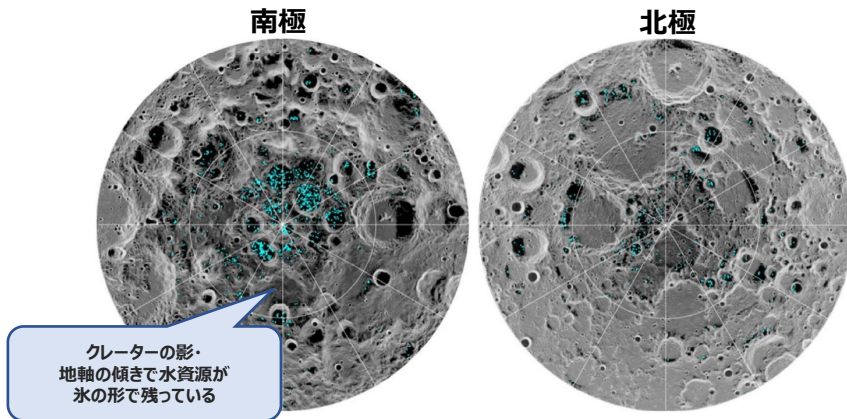


図 月極における水の分布（NASA）
 ※水色部分

金属他資源

月土壤（レゴリス）の含有成分の多くが酸化物として存在し
 シリコンや、鉄・アルミを始めとした金属資源が含まれる
 ※ヘリウム-3（核融合燃料）やレアアースも存在
用途：半導体含む資材等、電気分解により酸素を製造可能

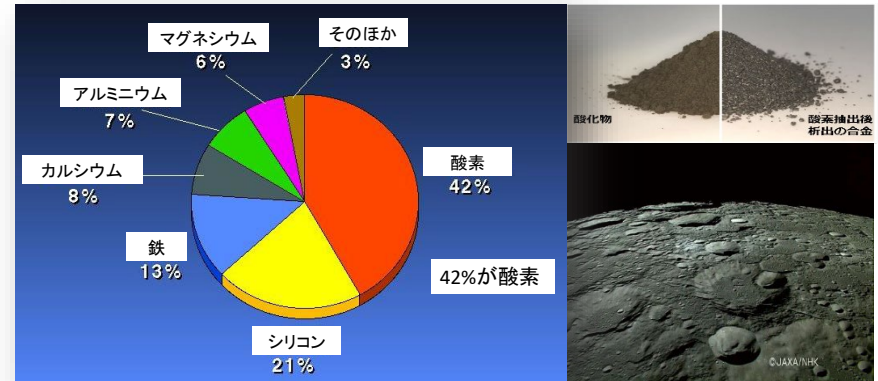


図 レゴリス（月土壤）の含有成分
 ※欧州宇宙機関（ESA）は、月土壤を模した酸化物を熔融塩中で電気分解することで酸素を作る実験に成功

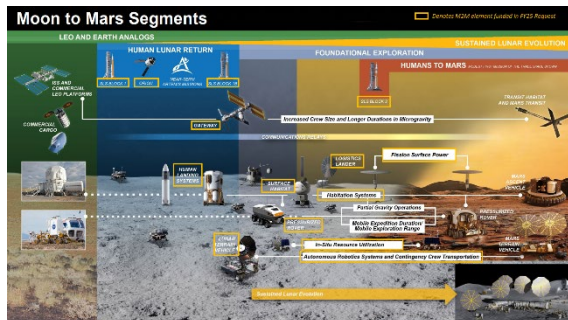
海外動向：月面活動に関する最近の主な取り組み

- アメリカは、NASAを主体としたアルテミス計画、Moon to Mars(M2M)などの月面・火星探査計画や、DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) を主体としたLunA-10を通じて、国際協調と産業振興を進め、持続可能な月探査を目指している。



アルテミス計画

- NASA主体の、米国主導・国際協力による月面探査プロジェクト
 - SLS (Space Launch System)、Orion宇宙船、Gateway、CLPS (Commercial Lunar Payload Service)、HLS (Human Landing System) 等のプログラム
- 最初の有人月面着陸 (Artemis III) は2027年実施予定

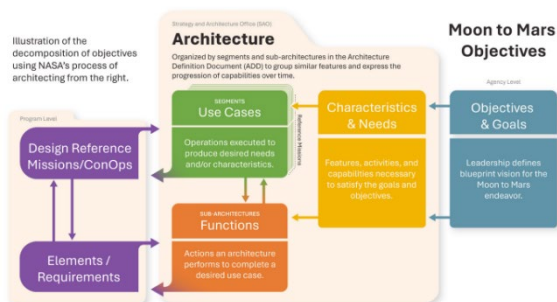


アルテミス計画の全体イメージ (出典：NASA)



Moon to Mars Architecture (M2M)

- NASA主体の、月面および火星探査計画の透明性向上と参画機会の提供を目的としたアーキテクチャ検討
- 意義として、「科学的知識の追求」、「国力の確立と経済成長」、「次世代の鼓舞」の3つを提示



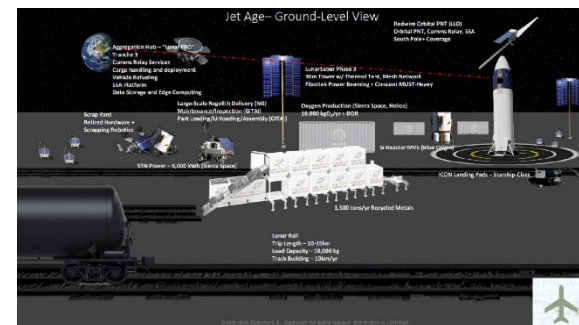
M2Mアーキテクチャの全体イメージ (出典：NASA)



10-Year Lunar Architecture (LunA-10)

- DARPA主体の、M2Mを補完する産業アーキテクチャ検討
- 「共同運用可能なスケーラブルなシステム開発」および「2030年までに将来的な月のユーザが収益化可能なサービス創出」を目的とした検討を実施。分野は電力、ISRU、通信・測位、輸送・モビリティ、建設・ロボティクス等、多岐に渡る

※ISRU (in situ resource utilization : 現地で入手可能な資源を利用)



LunA-10/Jet Age (2035~) の月面活動イメージ (出典：DARPA)

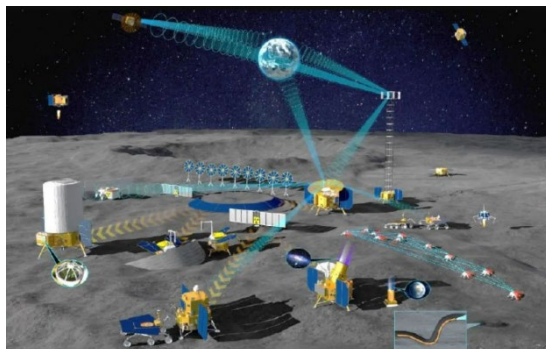
海外動向：月面活動に関する最近の主な取り組み

- 中国のILRSと嫦娥計画は、月面基地建設やサンプルリターンを目指し、2030年代に月の南極に基地を建設予定。欧州のExplore2040は月と火星探査を推進、持続可能な宇宙探査を目指している。



International Lunar Research Station (ILRS)

- 中露主導・国際協力による月面探査プロジェクト。嫦娥及びLUNA計画での実績をベースに、2030年以降に月面に拠点を構築する計画
- 2031年から5年間でILRS-1から5のミッションを計画



ILRSのコンセプトイメージ (出典：CNSA)



嫦娥計画

- CNSAが主導する月面探査計画。2007年の嫦娥1号以降、複数の探査ミッションを成功。2019年に嫦娥4号が月裏側に軟着陸（世界初）。
- 2024年6月、嫦娥6号が世界で初めて月の裏側からのサンプルリターンに成功

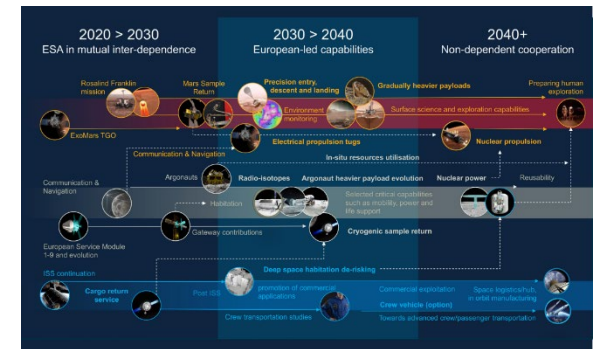


嫦娥6号の外観 (出典：CLEP)



Explore 2040

- 2024年10月に発表。ESAが主体となって策定した欧州の宇宙探査に関する長期戦略
- コンセプトとして、開かれた協力体制における自律性、注力分野の維持、責任ある行動、若い世代の魅了、の4つを提示



Explore 2040のロードマップ (出典：ESA)

国内動向：月面産業振興に向けた開発支援

- JAXAによる技術開発のほか、日本版SBIR、スターダストプログラム、宇宙戦略基金などを通じて、スタートアップや非宇宙企業を含む我が国の月面産業に取り組む民間企業を支援している。

日本版SBIR

(中小企業イノベーション創出推進事業)

内閣府を司令塔とした予算支出目標を設定、研究開発初期段階から政府調達・民生利用まで、各省庁連携で一貫支援。イノベーション促進、ユニコーン創出を目指す。

●月面ランダーの開発・運用実証

月面ランダーの開発、打上げ、運用に係る技術・知見
国産ロケットに搭載するためのインターフェース設計技術
月面ランダーの運用に係る技術

(軌道投入、宇宙航行、月面への着陸誘導制御、月面着陸後の通信・電力供給の確立後の通信・電力供給の確立等)



出典：経済産業省

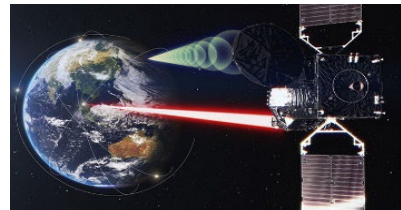
スターダストプログラム

(宇宙開発利用加速化戦略プログラム)

月面開発、衛星基盤技術の強化など、各省の縦割りを排し、連携して取り組むべき研究開発プロジェクトを推進する。

●測位・通信

- ・月面での測位システム（月版GPS）
- ・月－地球間の超長距離光通信技術



月－地球間の光通信 出典：JAXA

●建設

- ・地質調査・地盤解析技術、無人建設技術、建設機械技術
- ・月資源を用いた建材製造技術
- ・簡易施設建設技術



月面無人建設 出典：JAXA

●資源エネルギー

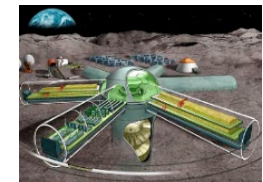
- ・水資源探査技術（テラヘルツ波）
- ・月環境下での水の電気分解技術
- ・発電・蓄電・送電
(無線送電等) 電源系技術



月面資源利用プラント 出典：JAXA

●食料バイオ

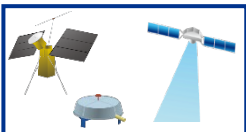
- ・米・大豆・藻類・培養肉等生産技術
- ・残渣や排泄物の完全循環処理技術



月面の植物工場 出典：JAXA

2040年代に想定されうる月面活動の例

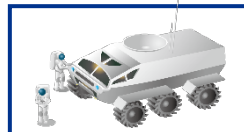
- 2040年代に想定されうる月面活動の例として、委託調査においては主に科学探査（無人・有人）、推薬供給、観光を想定



科学探査（無人）

無人機（衛星・ローバ・ランダ・その他設置機器）による月面での科学探査活動

- 月面天文台：月面で低周波宇宙電波を観測する。
- 月震計：月震計を多点配置し、月の内部構造を分析する。
- サンプルリターン/狭域：限られた範囲(極域など)の詳細探査をローバやロボット等により実施する。
- サンプルリターン/広域：広域(衝突盆地など)から岩石をローバやロボット等により採取する。



科学探査（有人）

宇宙飛行士による月面での科学探査活動（左記の無人での科学探査と連携しながら実施）

- サンプルリターン/狭域：限られた範囲(極域など)の詳細探査を宇宙飛行士が実施する。
- サンプルリターン/広域：広域(衝突盆地など)から岩石を宇宙飛行士が採取する。



推薬供給

深宇宙で科学・探査活動を行う実施主体への推薬供給

- 火星探査を含む深宇宙探査や各種月面活動を行う実施主体に対して推薬を供給する。
- 推薬生産・供給自体は無人で行い、水資源のあるエリア及び長期滞在拠点を中心とした活動がなされることを想定する。



観光

民間人（非宇宙飛行士）による月面観光

- 短期滞在：月面環境の体験や探査遺跡の見学等を行う。長期滞在拠点を中心とした範囲を移動し、短期間の滞在を行う。
- 長期滞在：月面環境の体験や探査遺跡の見学、天体観測等を行う。長期滞在拠点を中心とした範囲（より広範囲）を移動し、越夜を含む長期の滞在を行う。

※一部のステークホルダから月面活動の4分野の一つとして、観光について期待が示されたため想定の対象としたが、必ずしもビジネスモデルやエビデンスを含め十分な議論が行われたわけではない。

将来の月面活動を見通すための仮説（1/2）

● 検討に際し考慮すべき前提条件として、月面産業の振興に寄与する仮定を設定（※）

※月における持続的な活動を想定するため、各国の月探査の取り組み、資源探査結果、輸送コストの革新的低減等が前向きな方向に分岐することを仮定

貢献分野の検討に影響を与えるファクター

本検討における仮定（前提条件）

探査動向

- 国際協力による月探査計画の継続有無
 - アルテミス計画、ILRS
- 上記以外の各国独自の月探査計画
- 国内外の民間企業の活動
 - ispace、Astrobotic、等
- 月面における有人での科学・探査活動

- 国際協力による探査計画、各国独自の探査計画が引き続き進展
- 国内外の民間企業の活動が引き続き継続
- （上記継続の結果）地球-月間の輸送サービスの頻度向上・コスト低下
- 有人での科学・探査活動が振興

月の価値

- 月面探査の進展による変化の有無
- 変化可能性なし：地球に最も近い天体、広大な領域等
- 変化可能性あり：水資源の存在量、土質 等

- 採取・活用可能な水資源の存在が確認

法規制

- 月での活動に関するルール・法規制の設定（商業活動への制限有無）
- 国際的な動向：国連、アルテミス合意 等
- 国内の動向：宇宙資源法、その他法制度

- 月での商業活動を制限するような国際的な法規制等は課されない

インフラ等

- 月面活動に必要な主要インフラ構築・利用可否
 - 通信
 - 測位、電力、など

- 国際協力に基づきインフラ構築が進展。日本が月面活動を行うに当たり必要なインフラの利用が可能（他国と共用、一部自前での構築も）

将来の月面活動を見通すための仮説（2/2）

- 月面活動の将来像や日本の貢献分野を見通すにあたり、国際的ロードマップ等を参考に2040年代以降に民間人による観光や深宇宙、月以遠へ向かうロケット等への推進供給産業が始まると仮定。※ISECG（27の宇宙機関の国際宇宙探査協働グループ）

アーキテクチャ検討の想定年代

年代	①黎明期(前半)	②黎明期(中盤)	③黎明期(後半)	④成長期	⑤成熟期
	2020年代後半	2030年代前半	2030年代後半	2040年代以降	—
主な計画等	ISECGロードマップ:Phase 1 Artemis II~Artemis IV	ISECGロードマップ:Phase 2A Artemis V~Artemis VII以降	ISECGロードマップ:Phase 2B	ISECGロードマップ:Phase 3 (ロードマップに明示的な年代の記載なし)	-
LunA-10における時代想定	Exploration Age / Foundational Age (自給前提・技術実証の時代 / 大型モビリティ・MVEレベルの実証が登場する時代)	Industrial Age (大型物資輸送・投資回収・ISRU※完全稼働が始まる時代)	Jet Age (and Beyond) (月100tの酸素生産・マルチサイト(赤道+極)での活動・地球からの輸送量減少が始まる時代)		-
将来想定される月面活動の例	無人機(衛星・ローバ・ランダ・その他設置機器)による月面での科学・探査活動				
	宇宙飛行士による月面での科学・探査活動				
				深宇宙で科学・探査活動を行う実施主体への推奨供給 民間人(非宇宙飛行士)による月面観光	
活動状況	官需 <ul style="list-style-type: none"> 黎明期の更に初期段階であり、無人機による活動が中心 また、短期間の有人探査も始まっている。 	官需 <ul style="list-style-type: none"> 黎明期中盤であり、今後の月面活動の基盤となるインフラ・モビリティ・拠点等の実装・実証が進められている。 	官需 <ul style="list-style-type: none"> 黎明期の後半であり、月面での有人探査活動が本格化。 今後の月面活動の基盤となるインフラ・モビリティ・拠点等の実装・実証が進められている。 	官需 <ul style="list-style-type: none"> 成長期ではインフラ・拠点の設置・拡張が進み、宇宙飛行士の長期滞在が実現している。 宇宙飛行士に続いて、民間人の訪問(富裕層の観光等)が始まる。 	官需 <ul style="list-style-type: none"> 成熟期では月面産業が更に発展し、更なる滞在期間の長期化や滞在人数の増加が実現。 民間人の滞在・往来(富裕層の観光等)が増加。
月面上の活動人数	4人~			40人~100人程度	数百名~
活動者の属性	宇宙飛行士	宇宙飛行士	宇宙飛行士、 産業従事者(インフラ関係等)	宇宙飛行士、産業従事者(インフラ関係等)、民間人	宇宙飛行士、産業従事者(インフラ関係、観光業等)、民間人
有人探査における活動拠点	Gateway(+南極ランダ)	Gateway(+南極ランダ)	Gateway+南極拠点	Gateway+南極拠点 +広範囲に複数拠点	Gateway+南極拠点 +広範囲に多数拠点
活動範囲	月南極(ランダ)周辺	月南極(ランダ) +周辺数百~数千km	月南極拠点 +周辺数千~数万km程度	月南極拠点、複数拠点 +周辺数千~数万km程度	月南極、多数拠点 +周辺数千~数万km程度
滞在日数/頻度	最大14日間(昼:越夜なし)/年1回	14~42日間(昼+夜+昼:越夜1回)/年1回		数百日以上(長期滞在)/年複数回	数年/年複数回

※ISRU (in situ resource utilization : 現地で入手可能な資源を利用)

将来の月面活動に関する市場推定

- 米国DARPA/LunA-10の時代設定や想定サービス等を参考に、5つの分野（輸送・モビリティ、通信・測位、電力、建設・ロボティクス、ISRU）について、各種前提を置きながら市場推定を実施。
- 輸送、ISRU、電力の規模が比較的大。LunA-10の前提から、月以遠・深宇宙に行くことが産業目的の大部分を占めている可能性も存在。

市場推定に関する前提等

参考とした先行検討

- NASA/M2Mを補完する位置付けの産業アーキテクチャ検討であるDARPA/LunA-10における月面活動の発展シナリオや単価設定等を参考に推定を実施。

想定年代

- LunA-10では、将来の年代区分を月面活動の発展状況に合わせて4つに分類（Exploration Age、Foundational Age、Industrial Age、Jet Age）。
- 本推定では、そのうち最も活動が発展しているJet Age（2030年代後半～）を想定。

想定分野

- LunA-10における産業分類である輸送・モビリティ、通信・測位、電力、建設・ロボティクス、ISRUの5分野を対象。

推定のアプローチ等

- 市場推定は単年の数値を算出。
- LunA-10から読み取れるサービスを積み上げることで推計を実施。
- サービス提供に必要な宇宙インフラ等の開発・製造・整備等の費用については推計が困難で、今回の推定の対象外。

その他

- Jet Ageの想定サービス群は、米国産業界及び国際パートナーが利用するグローバルな月面インフラであることに加え、火星への到達も見据えた設計になっている可能性も存在。

出典：内閣府委託調査のもと三菱総合研究所が試算

※1：NSR「ESA Space2Connect Conference」

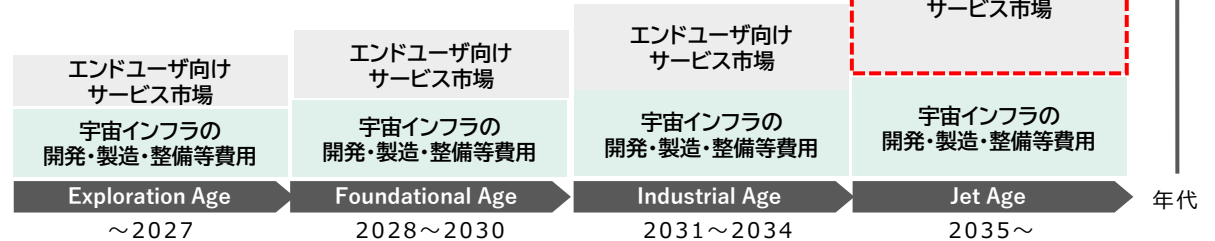
※2：PwC「月面市場調査：市場動向と月面経済圏創出に向けた課題」

市場推定のイメージと推定結果

推定アプローチのイメージ

公表されている他の市場推計等（積み上げ結果の比較等において参照 ※市場の規模感を示す黒線の位置はイメージ）
 2022年 - 2032年（10年間）の累積：1,367億ドル（約20兆円）（NSR予測※1）
 2020年 - 2040年（20年間）の累積：1,505億ドル（約22兆円）（PwC予測※2）

DARPA/LunA-10を参考にした市場推定（積み上げ）
 （※市場を示すブロックの大きさはイメージ）



市場推定の結果（1ドル=150円として円換算）



（今回の推計の対象外とした、宇宙インフラ等の開発・製造・整備等の費用側に主に含まれる可能性）

ISRU (in situ resource utilization : 現地で入手可能な資源を利用)

将来の月面活動に関するシナリオ検討の基盤

- 日本はかぐやによる月周回探査、SLIMによるピンポイント着陸など科学や産業に大きな影響を与える成果を残してきた。科学探査の実績を活かしながら産業界とともにビジネスモデルを見極めていく。

独自の技術・アセット

- 科学：はやぶさ、はやぶさ2、SLIM、MMX
 - ✓ 科学的な知見、航法誘導制御、サンプルリターン技術等
- 輸送（ロケット）：H3
 - ✓ 我が国独自の基幹ロケット
- 輸送（軌道間（月軌道（Gateway）））：HTV-XG
 - ✓ 与圧技術、航法誘導制御、自動ドッキング技術等
- 輸送（軌道-月面間）：SLIM
 - ✓ 耐環境技術（越夜等）、高精度航法誘導技術等
- 月周回軌道（探査（観測）、通信、測位）：
 - かぐや、EQUULEUS、TSUKIMI
 - ✓ GPS航法/電波航法、月通信・測位技術等
- 輸送（月面）：有人と圧ローバ
 - ✓ 耐環境技術（越夜等）、与圧技術、走行機構技術等
- 資源探査：LUPEX、LDA（月面誘電率計測器）
 - ✓ 科学的な知見、耐環境技術（越夜等）、走行機構技術等
- 有人宇宙滞在（生命維持・環境制御）：Gateway用ECLSS等
 - ✓ 有人拠点構築技術、生命維持技術、遠隔・自動化技術等
- 月資源利用技術：スターダストプログラム等を中心とした基礎研究
 - ✓ 水資源利用技術、宇宙無人建設技術、食料生産技術等



小型月着陸実証機
SLIM



有人と圧
ローバ

先駆的な民間企業・月面活動を機会とした非宇宙企業の参画

- 民間企業による自社投資活動：
 - ✓ ispace、高砂熱学工業等
- 月面活動に関する政府プログラムへの非宇宙企業の参画
 - ✓ TOYOTA、HONDA、タカトミー等

月面活動に関する多様な取り組みが存在

- JAXA宇宙探査イノベーションハブ
- 宇宙建設革新プロジェクト
- 月面産業ビジョン協議会等



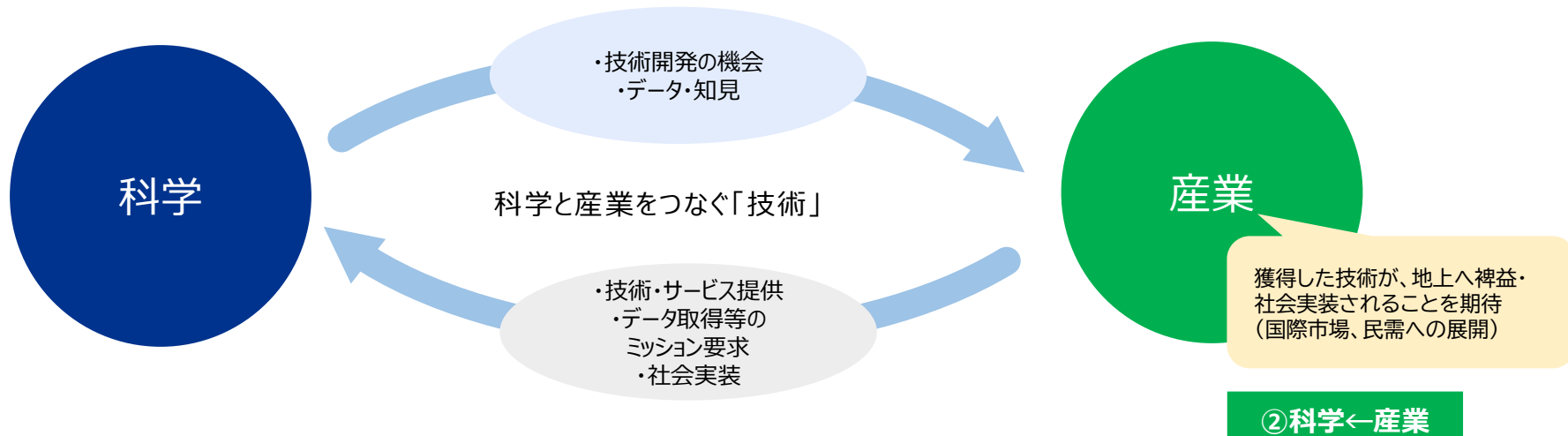
ispaceによる
月面ランダーの
開発

科学と産業の連携の考え方

- 科学と産業が連携し、技術開発、データ共有、共同実証を通じて、月面事業を共に推進するサイクルを回していくことで、より高度な科学の実現や段階的な月面産業の発展・市場の獲得に繋げていく。

① 科学→産業

- 科学がミッション要求を公開し、産業側における技術開発の機会を提供することで、産業側の成長（足場固め）が実現
- 獲得したデータおよび知見を産業側への提供・移管することで、産業側の成長（足場固め）が実現



② 科学←産業

- 産業が技術やサービスのプロバイダとなり、科学がリスクを取れるユーザとしてそれらを利用する
- データ取得・共有や共同での技術開発・実証等のミッション要求を出し、月面における事業においてそれらを利用する
- 得られた成果を社会に還元（社会実装）する

将来の月面活動に関するシナリオ案

年代		①黎明期（前半）	②黎明期（中盤）	③黎明期（後半）	④成長期	⑤成熟期	
		2020年代後半	2030年代前半	2030年代後半	2040年代以降	—	
想定される月面活動の例		無人機（衛星・ローバ・ランダ・その他設置機器）による月面での科学・探査活動					
		宇宙飛行士による月面での科学・探査活動					
必要な機能・技術等		深宇宙で科学・探査活動を行う実施主体への推奨供給					
		民間人（非宇宙飛行士）による月面観光					
輸送	軌道間	HTV-XGの確実な開発により、月周回軌道へアクセス可能なケーパビリティを獲得する	Gatewayへの物資輸送を中心とした国際貢献を行いつつ、月周回軌道への衛星輸送等の需要を獲得する		輸送ケーパビリティの用途・能力を拡大することで継続的に需要獲得・国際貢献		
	軌道-月面間	科学探査活動等のパイロートの輸送や民間活動の支援等により、月面輸送に係る差別化技術を獲得するとともに輸送頻度を担保し、優位性を確立する			輸送ケーパビリティの用途・能力を拡大することで継続的に需要獲得・国際貢献		
	月面	地上のモビリティ産業や、先行する日本の他PJで得られる技術・データ等も活用し、有人圧ローバを確実に開発・実装することで、月面輸送のケーパビリティを獲得する	広域探査に加え、日本の月面活動に不可欠となる物資・貨物を輸送・展開する 他国の月面輸送需要や、有人圧ローバのコンポーネント等に対する需要を取り込み、国際協力における貢献あるいは外貨の獲得を狙う		輸送ケーパビリティの用途・能力を拡大することで継続的に需要獲得・国際貢献		
通信		科学ミッション等の機会を用いて、月面上及び月-地球間の通信に係る小規模な実証及び各種データの蓄積を実施	月-地球間の光通信による基幹回線化（他国との差別化）を図り、国内外の月圏ユーザーに高速通信サービスを提供することで需要獲得を狙うとともに、月通信における日本の優位性確保と独自性のある貢献を果たす		通信ケーパビリティの能力を拡大することで継続的に需要獲得・国際貢献		
		日本の強みとする光通信技術等の開発を確実に進めるとともに、月-地球間の光通信実証等の実施により、遠距離かつ大容量（Gbps級）の通信ケーパビリティを獲得、月通信技術における日本の優位性を確立	月面拠点の建設技術の高度化に資する通信の大容量化、低遅延化技術を、高精度測位技術とともに統合システムとして開発を進め、月面拠点開発における日本の自立性、自在性の確保、優位性を確立する				
		日本が開発する有人圧ローバ等のミッションにおいて、生命線となる通信インフラを少なくとも日本としても構築、保有することにより、月-地球間のE2E通信における自立性、自在性を確保する					
測位		月測位技術の実証ミッションの早期実施により測位ケーパビリティを獲得し、国際協働での月測位システム構築に貢献する	月南極域から月全域へのサービス領域の拡大や月面拠点建設に係る測位サービスの高精度化・高度化のための月測位システム技術の開発を進める 安全保障上、重要となる月測位インフラを日本として段階的に構築、保有することにより、日本の月測位における自立性、自在性を確保する		測位ケーパビリティの能力を拡大することで継続的に需要獲得・国際貢献		
		月面インフラ構築に資するよう、科学探査活動や民間活動等で得られた環境計測データを蓄積・参照しつつ、建設における科学探査データ活用仕組みを構築					
建設	探査	必要となる建設技術開発を早期に進め、自国ミッションで実績を積み、国際協力で構築される月面インフラの建設需要を獲得する					
	施設建設	月面活動に関して獲得した技術を地上に還元する					
電力	発電	科学探査活動等の機会を用い、月面での電力確保に関する小規模な実証や各種データの蓄積を実施		将来的に増加する電力需要を取り込み、国際協力における貢献あるいは外貨の獲得を狙う		電力ケーパビリティの用途・能力を拡大することで継続的に需要獲得・国際貢献	
	蓄電送電	電力に関するプロセスのうち、発電および送電のケーパビリティを早期に獲得し、自律性を確保する					
生命維持		科学探査活動等で得られた環境計測データも参考としつつ、長期の有人滞在に必要な生命維持・健康管理技術を居住に関する技術と併せて開発・獲得				生命維持ケーパビリティの用途・能力を拡大することで継続的に需要獲得・国際貢献	
居住		科学探査活動等で得られた環境計測データも参考としつつ、月面基地の建設方針を仮定し、必要となるケーパビリティの獲得方針を決める				インフレタブル型や展開構造型の構造物に関する技術を生命維持・健康管理技術と組み合わせることで開発・獲得	
（ISRU）資源	探査	国の科学探査活動と民間の独自活動を組み合わせ、継続的にデータを取得し、他国に先んじて資源分布を把握する	日本国内での情報共有による月面科学の高度化および月面産業の育成を行う 資源分布把握に対する需要を取り込み、国際協力における貢献あるいは外貨の獲得を狙う			継続的な探査活動によるデータ詳細化を行う	
	水・酸素・推奨建材	ISRUに関して注力すべきプロセスを定め、リソースを投入し、日本の強みに育てる					注力プロセスに係る需要を取り込み、国際協力における貢献あるいは外貨の獲得を狙う
		他のケーパビリティ（電力、建設、ISRU、居住、生命維持等）の方針設定と協調して、食料供給の方針を仮定し、必要となるケーパビリティの獲得方針を決める		食料ケーパビリティの用途・能力を拡大することで継続的に需要獲得・国際貢献する			
食料		資源循環型食料供給システムやその要素技術に関し、技術開発と地上や地球低軌道等での実証を実施					
		獲得した技術の地上転用により、食料安全保障や脱炭素、被災地等におけるQOL改善に寄与することを目指す					

総括・今後の課題

- 月面活動に必要な技術開発・実証等を行うに当たって、月面活動に関するアーキテクチャを示すことを試みた。検討に当たっては、国内外の動向調査を行うとともに、2040年代に想定される月面活動の例や将来の活動を見通すために影響を与える要因や前提条件を設定し、前向きな前提に基づいた月面産業市場規模の推定を行った。
- その際、日本の具体的な貢献分野を踏まえつつ、人類の月面活動に必要な機能・技術の候補の全体を把握し、それらの機能・技術の関連性も踏まえながら、日本の将来の月面活動を見通すためのシナリオについて仮説を立てた。その上で、現時点における月面活動に関するアーキテクチャの案を示した。
- 今後も継続的に検討していく必要があり、そのためには、国際的な探査計画や水資源の状況、国際ルール・規範をはじめ、月面活動に関連する重要な影響要因について把握することが重要である。
- 特に、将来ありうべし4つの月面活動として想定した、科学探査（無人・有人）、推薬供給、観光に関連する取組みについては、月面活動の前提となるデータ取得や重要技術（無人・遠隔技術や通信・測位技術、科学探査活動から得られる各種データの地図化等）の早期獲得に向けて技術開発を促進しつつ、海外動向や利用ユーザー、ビジネスモデル等を評価し、官民が必要に応じて連携していくことが重要である。
- さらに、今回整理した結果も元に、米国や欧州等との国際的な議論も通じて我が国の貢献分野に関する検討を関係府省等において深めていく。

総括・今後の課題

- 今後の内外で議論を継続するに当たっては、特に以下の点を注視していく。
- ① 今回一定の整理をした、**前向きな前提条件に基づく将来の月面活動において、その実現を左右する重要な影響要因に関する状況**（例えば、**各国の探査計画や経済合理的な水資源の有無**を含めた月の価値に関する探査状況、**月面活動に関する国際的なルール・規範の動向**等）。
- ② 主要国の月面経済活動に関する技術開発・実証に関する状況。**特に、月面経済活動を左右するゲームチェンジャーとなりうる技術に関する状況**（例えば、SpaceX社の月面輸送機であるスターシップは100t級のペイロード搭載能力を有し、再使用型で相当なコスト低減効果が期待されている。**月面への輸送コストが下がれば、インフラ構築含め、新たなアイデアによるビジネスモデルなども期待されるため、これらゲームチェンジャー技術の動向とその波及効果の分析等**）
- ③ **民間企業のビジネスモデルや、将来の月面活動を見据えた先行投資や地上との関連投資を含む国内の民間企業による具体的な投資に関する状況。**

• なお、2023年度・2024年度の委託調査期間に、政府において2024年3月に宇宙技術戦略が策定され、本資料で概観したスターダストプログラム、SBIR事業、JAXAの技術開発や探査事業の他に、JAXAに宇宙戦略基金が設置され、スタートアップを含む民間企業や大学等により様々な技術開発プログラムが社会実装を目指して開始されたところである。今後は、それらの進捗や関連する動向も踏まえる必要がある。また、本資料は、冒頭にあるとおり、「月面活動に関するアーキテクチャ」に関し、現時点における検討状況を報告するものであり、今後国内外の、より幅広いステークホルダと議論を進める上での一つのツールとするものである。したがって、具体的な政策の技術開発のベンチマーキングについては定期的に改訂される宇宙基本計画工程表や宇宙技術戦略によるところであり、また、それぞれの施策プログラムの実施方針によるところである。

(参考) 水資源の探査

- これまでの探査結果には水の存在を示唆するものも存在。一方で、その存在量、分布、形態等の詳細は未だ不明の状況。

これまでの探査で得られた知見（水の存在量・分布・形態等について）

存在量

- 観測結果：推定される水の量には観測結果ごとに差異が存在。
- 不明点：
 - 水分子の直接観測による推定値ではないものも存在。また、空間解像度・データ精度の違いや影領域におけるS/N（Signal/Noise）比の低さにより、各観測結果間の相対的な確度を評価すること自体が困難。観測深度も探査ごとに異なる。
 - 現時点で月面活動に利用可能な水の量は確認できていない。

分布

- 観測結果：永久影の表面では水氷は数wt%以下であることを確認(日本の「かぐや」及び韓国の「KPLD」による探査)
- 不明点：水の分布は不均一であり、極域の永久影内に集中していると考えられているが、明確な結論は得られていない。地中の水氷は深さ数メートルから数十メートルの範囲に分布している可能性も示唆されている。

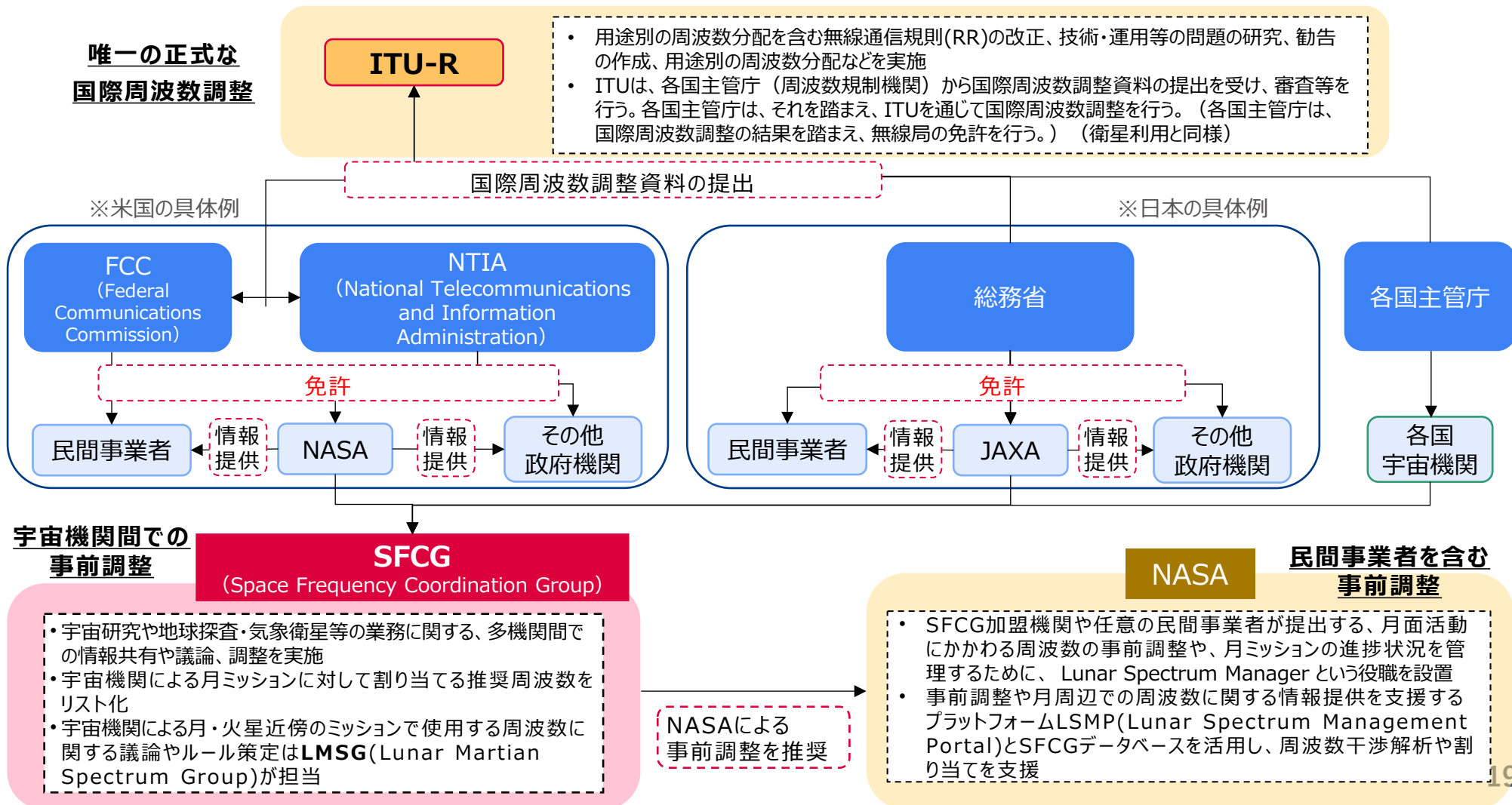
形態

- 観測結果：水素が存在する可能性は高い。(インドの「Chandrayaan-1」による探査)
- 不明点：水素は水として存在するのか分かっておらず、水として存在したとしても、水和物として鉱物に含まれるのか水氷として存在するのか分からない。

“月極域の水氷関連データは、リモートセンシング観測データに基づく多くの研究が報告されているが、観測波長・データ解析手法により結果が異なることや、データの解釈において意見が分かれるなどの理由から、量、分布、形態(塊、吸着など)について決定的な結論はまだ得られていない。”(国際宇宙探査シナリオ(案)2021より)

(参考) 月の周波数利用に当たっての国際周波数調整等

- 月の周波数利用に当たっては、国際周波数調整、各国主管庁からの無線局免許が必要。
- 正式な国際周波数調整はITU-Rにおいてなされるが、宇宙機関間での調整はSFCGにおいて行われている（SFCGは、宇宙の周波数利用に関する情報共有や議論を実施）。
- 一方、NASAはSFCG非加盟組織(民間事業者等)を含む事前調整支援や情報提供を行っている。



(参考) 月の周波数分配

ITU-Rにおける議論状況

- 月面・月軌道－月面間の通信について、WRC-27に向けて議題化（議題1.15）され、国際的な周波数の新規分配等に関する議論が開始されている。
 - WP7B(作業部会)が責任グループとなり、月周辺での様々な通信ユースケースに関する周波数需要や技術特性・運用特性を研究しており、用途別の周波数帯の分配や、干渉を防止するための基準に関する具体的な検討に着手している。
 - 商業利用は当議題の検討対象外となっている。

WRC-27 議題1.15

「月表面間及び月軌道と月表面間のための、宇宙研究業務（宇宙から宇宙）への新規分配または分配の変更の検討」

- 月面で運用されるシステム／月面システムと通信する月周回軌道衛星に関する周波数ニーズの調査及び当該システムの技術的・運用的特性および保護基準の研究
- 現在、WP7Bでは月表面／月周回軌道衛星を含む月周辺での通信の運用概念について記述し、月周辺での様々な通信ユースケースに関する特定の技術特性および運用特性（各システムごとに想定されるユーザーデータ量も整理）を記載した報告書案を作成中である。

SFCGにおける議論状況

- 月周辺・地球－月間通信で利用可能な周波数帯のリスト化や、技術的要件に関する勧告文書を発行している。
- SFCG加盟機関及び非加盟組織に対し、NASAによる事前調整を推奨している

NASA / LSM(Lunar Spectrum Manager)による、LSMPを通じた事前調整支援

- 各国政府機関や民間事業者が、共通のプラットフォーム(LSMP)上で事前調整や情報交換を実施できる。
- 月周辺で利用可能な周波数帯や制約条件等の情報が提供されているほか、各ミッションの進捗状況を踏まえた周波数の事前調整の優先順位付けなどが行われている。

(参考) 月面活動に関する国際協調

- 米国主導のアルテミス計画や、中露主導のILRS計画の推進を念頭に置き、宇宙探査に関する基本原則やガイドラインについて、認識を共有するパートナー国を増やす取組が、それぞれの探査計画の主導国を中心として行われている。

アルテミス合意 (Artemis Accords)

主導国

- 米国

署名国

- アルテミス合意の当初署名国：8カ国（米国、日本、カナダ、イギリス、イタリア、オーストラリア、ルクセンブルク、アラブ首長国連邦）
- 2025年3月現在：53カ国

概要

- アルテミス計画推進を念頭に置き、月や火星等の宇宙探査に関する基本原則を各国共通の認識として示す合意
- アルテミス合意は全13部から構成されており、第1部において、各署名国の民生宇宙機関が行う宇宙活動に適用することが明記。
- また、第10部「宇宙資源」と第11部「宇宙活動の衝突回避」は、資源探査活動の文脈において重要な指針を示すものであり注目。

ILRS (ガイドライン+ILRSCO)

主導国

- 中国、ロシア

署名国

- 当初参加国：2カ国（中国、ロシア）
- 2025年3月現在：13カ国（上記2カ国、ベネズエラ、南アフリカ、アゼルバイジャン、パキスタン、ベラルーシ、エジプト、ニカラグア、タイ、セルビア、カザフスタン、セネガル）と11の機関・大学等

概要

- ILRS建設に向け、協調の構想として以下の6項目を掲げる。
 - 平和的な開発：ILRSは全人類の利益となること
 - 共同での協議・構築と共有：透明性・開放性を堅持し、発展途上国を含む全ての国に探査機会を創出する
 - 多様な協力形態：ミッションレベルから教育・能力構築まで多岐にわたる形態での協力が可能
 - 科学成果の共有：科学データの共有と公正な共有
 - 月資源の保全：月軌道や周波数利用の合理化、月-地球系の環境保全(探査等の活動に依る月環境汚染の防止など)
 - 協力組織の設立：ILRSCO(国際月面研究基地協力機構)を設立し、計画遂行を円滑化

(参考) 宇宙技術戦略との対応

ケーパビリティ区分		宇宙技術戦略における記載事項	
大区分	小区分	区分	要素技術等
輸送	軌道間	物資補給技術	自動ドッキング技術
			航法誘導制御技術
			補給効率向上技術
			燃料補給技術
	軌道-月面間	月着陸技術	航法誘導制御技術（月面）
			降着系技術
			障害物検知・回避技術
			エンジン技術
	月面	月表面探査技術	航法誘導制御技術（航法・自動運転技術、オンボードの有人操縦と地上遠隔操作の融合技術等）
			走行機構技術（不整地、長距離走行技術等）
			耐環境技術（越夜、防塵技術等）
			作業支援技術（ロボットアーム技術等）
通信	月近傍	月通信・測位技術	大容量リアルタイム通信技術
			惑星間インターネット技術
			小型軽量化技術
	月面	月面科学に係る技術	月面拠点内のRF通信技術
			科学観測機器の自立的な運用を行う上でのパッケージ化技術（通信、電源、構造、熱制御等）
			月面環境データ・観測技術
測位		月通信・測位技術	月測位システム技術

ケーパビリティ区分		宇宙技術戦略における記載事項	
大区分	小区分	区分	要素技術等
建設	探査	月資源開発技術	月周回資源探査技術
			月面資源探査技術（探査機による資源調査・掘削・採取、地盤調査、環境計測技術等）
		月資源利用技術	宇宙無人建設技術（無人建設（自動化・遠隔化）、建材製造、簡易施設建設技術等）
		月表面探査技術	航法誘導制御技術（航法・自動運転技術、オンボードの有人操縦と地上遠隔操作の融合技術等）
			走行機構技術（不整地、長距離走行技術等）
			耐環境技術（越夜、防塵技術等）
	施工/施設建設	月面科学に係る技術	作業支援技術（ロボットアーム技術等）
			科学観測機器の自立的な運用を行う上でのパッケージ化技術（通信、電源、構造、熱制御等）
		月資源開発技術	月面環境データ・観測技術
			月周回資源探査技術
		月資源利用技術	月面資源探査技術（探査機による資源調査・掘削・採取、地盤調査、環境計測技術等）
			宇宙無人建設技術（無人建設（自動化・遠隔化）、建材製造、簡易施設建設技術等）
月表面探査技術	航法誘導制御技術（航法・自動運転技術、オンボードの有人操縦と地上遠隔操作の融合技術等）		
	走行機構技術（不整地、長距離走行技術等）		
	耐環境技術（越夜、防塵技術等）		
		作業支援技術（ロボットアーム技術等）	

(参考) 宇宙技術戦略との対応

ケーパビリティ区分		宇宙技術戦略における記載事項	
大区分	小区分	区分	要素技術等
電力	発電	エネルギー技術	発電技術 (展開収納型太陽電池タワー、半永久電源等)
	送電		蓄電技術 (全固体電池、高エネルギー密度電池等)
	蓄電		送電技術 (有線・無線送電技術等)
	共通	月面科学に係る技術	科学観測機器の自立的な運用を行う上でのパッケージ化技術(通信、電源、構造、熱制御等) 月面環境データ・観測技術
生命維持	水	有人宇宙滞在・拠点システム技術	環境制御・生命維持システム(ECLSS)
	健康・医療		健康管理技術(QOL 向上を含む)
	共通	月面科学に係る技術	月面環境データ・観測技術
居住		月資源利用技術	宇宙無人建設技術・簡易施設建設技術等
		有人宇宙滞在・拠点システム技術(拠点構築、滞在、運用等)	拠点構築技術
			生命維持・環境制御技術
			遠隔化・自動化・自律化を含む有人活動支援技術
			健康管理技術(QOL 向上を含む)
			有人宇宙施設運用技術
			有人活動安全評価・管理技術
		月面科学に係る技術	科学観測機器の自立的な運用を行う上でのパッケージ化技術(通信、電源、構造、熱制御等) 月面環境データ・観測技術

ケーパビリティ区分		宇宙技術戦略における記載事項	
大区分	小区分	区分	要素技術等
資源(ISRU)	資源探査	月資源開発技術	月周回資源探査技術
			月面資源探査技術 (探査機による資源調査・掘削・採取、地盤調査、環境計測技術等)
		月表面探査技術	航法誘導制御技術 (航法・自動運転技術、オンボードの有人操縦と地上遠隔操作の融合技術等)
			走行機構技術 (不整地、長距離走行技術等)
			耐環境技術 (越夜、防塵技術等)
			作業支援技術 (ロボットアーム技術等)
	水・酸素・推薬/建材	月資源開発技術	月周回資源探査技術
			月面資源探査技術 (探査機による資源調査・掘削・採取、地盤調査、環境計測技術等)
		月資源利用技術	水資源利用技術 (資源採取、推薬生成技術等) 鉱物資源利用技術 (分離回収、精製、成形技術等) 鉱物資源利用技術
	食料	月資源利用技術	月面等での食料生産技術
拠点構築技術			
有人宇宙滞在・拠点システム技術(拠点構築、滞在、運用等)		生命維持・環境制御技術	
		遠隔化・自動化・自律化を含む有人活動支援技術	
		健康管理技術(QOL 向上を含む)	
	有人宇宙施設運用技術		
	有人活動安全評価・管理技術		

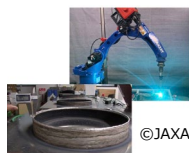
【実施方針】

技術開発テーマ（全22テーマ）

宇宙輸送

【文】宇宙輸送機の革新的な軽量・高性能化及びコスト低減技術（120億円程度）

- ロケットの低コスト化を見据え、大型構造体や部品における、複合材適用拡大や、金属3D積層活用拡大に向けた基盤技術の開発



大型造形が可能になる造形装置のイメージ



高頻度な打上げを可能とする地上系のイメージ

【経】固体モータ主要材料量産化のための技術開発（48億円程度）

- ロケットの固体モータの生産量拡大を見据え、国内のモータ材料サプライヤによる供給能力の向上に向けた、主要材料や推進薬の量産化技術の確立に向けた技術開発

【経】宇宙輸送システムの統合航法装置の開発（35億円程度）

- 宇宙輸送システムにおけるキー技術として地上の管制設備等のコスト縮減やロケットの安全確保につながる小型・低コスト・高性能な統合航法装置の開発



固体ロケットブースターの燃焼試験

衛星等

【文】高分解能・高頻度な光学衛星観測システム（280億円程度）

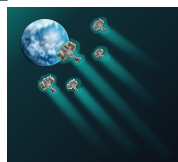
- 高頻度に三次元計測が可能な高精細な小型光学衛星による観測システム技術の高度化実証

【文】高出力レーザの宇宙適用による革新的衛星ライダー技術（25億円程度）

- 衛星ライダーの機能革新に資する宇宙用レーザの高度化に向けた技術開発

【文】高精度衛星編隊飛行技術（45億円程度）

- 野心的な事業・ミッション構想の実現に向けた世界最高水準の高精度な編隊飛行技術の実証



編隊飛行（フォーメーションフライト）のイメージ

【経】商業衛星コンステレーション構築加速化（950億円程度）

- 光通信衛星や小型SAR衛星、小型多波長衛星等の衛星コンステレーションについて、我が国を含む一定地域でサービスを展開することが可能な基數配備の実現

【経】衛星サプライチェーン構築のための部品・コンポーネント開発・実証（180億円程度）

- 衛星ミッションの高度化に対応した我が国のサプライチェーン上重要な部品・コンポーネントについて、ユーザーニーズに応える機能・性能の向上や、QCDの解決に必要な技術開発・実証

【経】衛星データ利用システム海外実証FS（10億円程度）

- 宇宙ソリューション市場の拡大と課題解決に向けた、各国・地域における社会課題解決等に対応する衛星データ利用システムの開発・実証

【総】衛星量子暗号の通信技術の開発・実証（145億円程度）

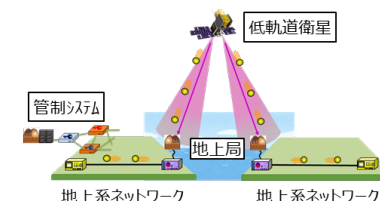
- 距離に依らない堅牢なセキュリティ環境を実現する量子暗号通信網の構築に向けた衛星搭載用の通信機器及び地上局設備の開発・実証

【総】衛星コンステレーションの構築に必要な通信技術の実装支援（19億円程度）

- 大容量リアルタイム通信が可能な衛星間光通信におけるキー技術として、相互運用性、高速性、安定性等を備えたネットワークに必要な光ルータ等の技術開発



衛星コンステレーション



量子暗号通信網

【実施方針】

技術開発テーマ（全22テーマ）

探査等

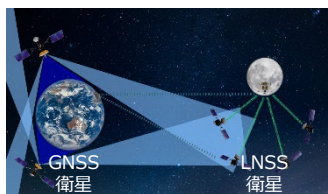
月面開発

【文】月測位システム技術（50億円程度）

- 月面・月周回軌道上で、リアルタイムに測位を行うシステムの実現に向けた技術開発

【文】再生型燃料電池システム（230億円程度）

- 月面環境での運用を想定した再生型燃料電池システムの地上実証



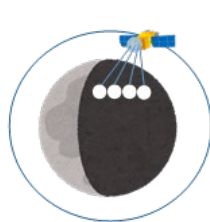
月測位システムイメージ ©JAXA

【文】半永久電源システムに係る要素技術（15億円程度）

- 月面環境にてメンテナンス不要かつ長期間使用可能な電源システムに係る要素技術開発

【総】月面水資源探査技術（64億円程度）

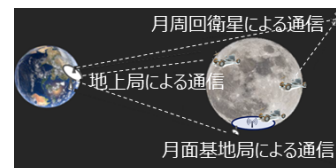
- センシングによる効率的な月面水資源探査に向けた、小型軽量なセンサを搭載した小型衛星の開発・実証



月面水資源探査のイメージ

【総】月-地球間通信システム開発・実証FS（5億円程度）

- 月-地球間における大容量かつ高精度捕捉等が可能な通信アンテナの開発に向けた基本設計、高品質・高信頼性のモバイル通信環境の実現可能性の調査



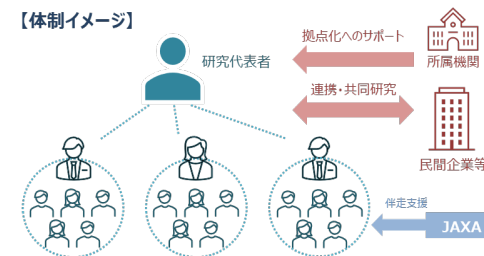
月-地球間通信システムのイメージ

分野共通

【文】SX研究開発拠点（110億円程度）

- 特色ある分野等において優れた技術を有する研究者等を中核とした研究開発の推進を通じた拠点化や非宇宙分野からの参画も含む人材の裾野拡大を図る

【体制イメージ】



※この他、各技術開発テーマの加速等に向けた共通環境整備費（50億円程度）及び本基金事業の管理費（87億円程度）を含む。

地球低軌道利用

【文】国際競争力と自立・自在性を有する物資補給システムに係る技術（155億円程度）

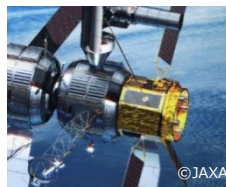
- 有人活動の場に係る多様な利用ニーズに対応する自立飛行型モジュールの基本システムの開発

【文】低軌道自律飛行型モジュールシステム技術（100億円程度）

- 商業宇宙ステーション等に接続が可能な自立飛行型モジュールの基本システムの開発

【文】低軌道汎用実験システム技術（20億円程度）

- 宇宙ステーションでの効率的で高頻度な実験を可能とする自動化・遠隔化等の技術開発



自律飛行型モジュールのイメージ

火星探査

【文】大気突入・空力減速に係る低コスト要素技術（100億円程度）

- 火星着陸技術の自立性確保や地球低軌道からの地上への物資輸送に向けた、軽量・低コストな大気突入システム（展開型エアロシェル）の開発



展開型エアロシェルのイメージ