

月探査の全体シナリオと技術的課題(案)
補足資料

平成21年11月18日

長谷川 義幸

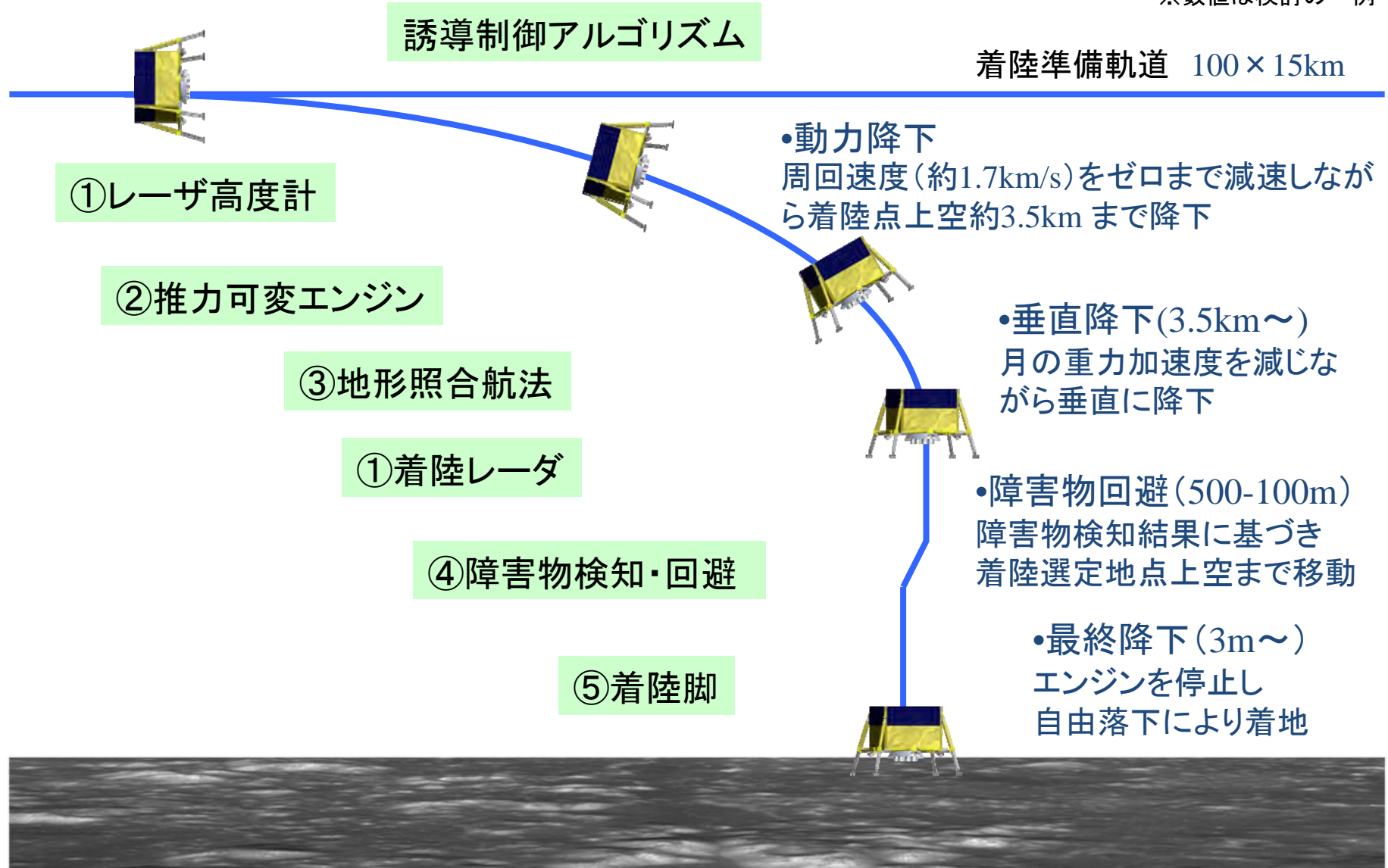
(宇宙航空研究開発機構)

【目次】

1. 月面着陸技術
2. 探査ロボット技術
3. 月面エネルギー技術
4. 地球への輸送技術
5. 輸送系(ロケット)技術
6. データ通信技術
7. 月探査の拠点イメージ(案)

1. 月面着陸技術

※数値は検討の一例



※各要素技術①~⑤の個別説明は次頁以降。

① レーザ高度計、着陸レーダ（電波高度速度計）

- 探査機を高精度、安全に着陸させるためには、カメラのほかにレーザ光や電波を月面に照射し、その反射信号を処理する方式の各種センサとして、表面との相対速度を計測するセンサ（速度計）と高度を計測する高度計が必須である。
- レーザ高度計は、米、欧、インド、日本などが有する技術であり、高高度での高度測定は「はやぶさ」「かぐや」で実績のあるレーザ方式である、3km程度以下の低高度での測定用には、電波方式の着陸レーダを開発中。
- 着陸レーダ（電波高度速度計）は、米、欧が有する戦略技術である。外国からの輸出入には規制が係るため、日本は独自開発を行っているところ。試作モデルは完成済み、搭載化に向けた設計を開始するところ。
- このようなセンサは、一般的には精度を上げるためには大型、大電力が必要となる。信号処理の工夫により、いかに小型高性能にできるかが重要課題である。
- なお、宇宙では、耐放射線性、耐真空材料、放熱などの点で地上技術をそのまま使えないことが多いが、開発された技術は地中、海中、原子力発電所などの極限環境での使用に応用できる。

《レーザ高度計》

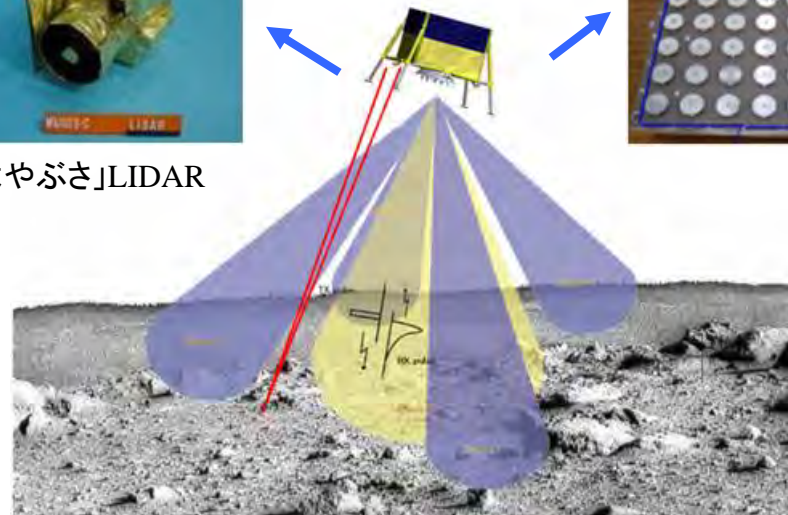
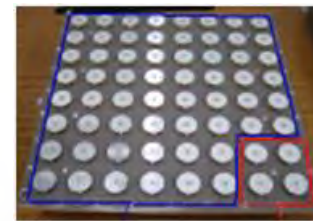


「かぐや」LALT



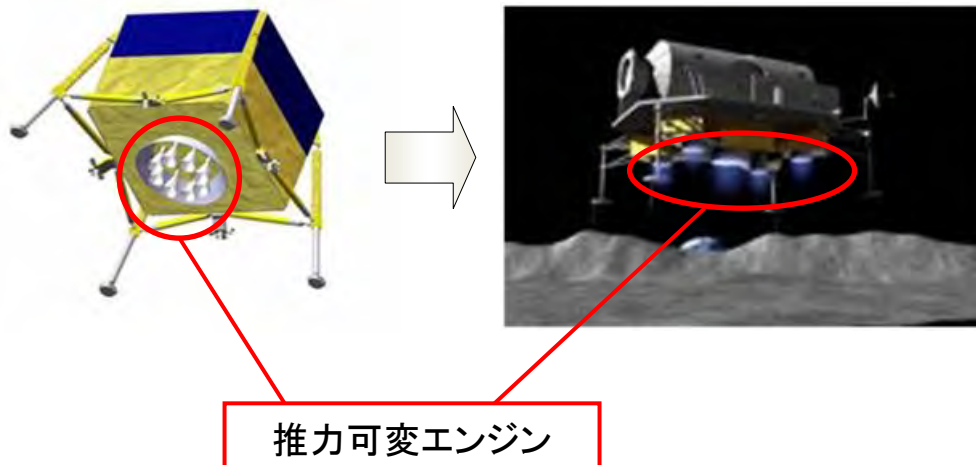
「はやぶさ」LIDAR

《電波高度速度計》 アンテナアレイ



②推力可変エンジン

- 月などの天体に安全、確実、高精度に着陸するためには、地球周回の人工衛星に比べると、大推進力を精密に制御できる大型の推力可変エンジンが必要(※)。
- 大型可変推力エンジンは米国しか有していない技術。
- 日本の探査機用エンジンのメーカーであれば現在技術の延長で開発可能であるが、地上燃焼試験装置等の大型化も必要であり、コスト、期間ともある程度が必要である。JAXA(研究開発本部推進グループ)と推進系メーカーが研究を実施中。
- 大型エンジンの推力を調整することは難しく、通常の変流量バルブは応答が悪く、着陸に必要な1秒程度の応答は困難である。また、小型のエンジンの場合は、短時間でのオン・オフの比率によって平均推力を変える方法も可能であるが、大型のエンジンでこれを行うことは難しいので、可変推力方式の開発が必要となる。
- なお、これらの技術は、着陸探査のみならず、ロケットの制御性能向上等にも応用できる。



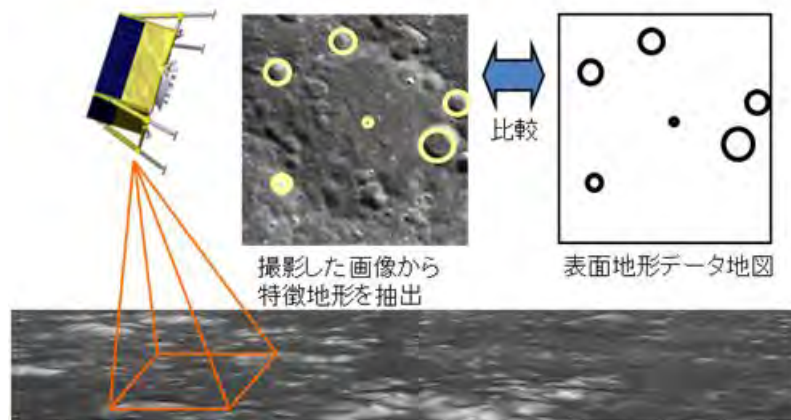
(※)例えば、1000kgの月着陸機では3000N程度が必要となるが、我が国で実績のあるエンジンは最大で500Nクラスであるので、数本程度束ねて使用することを考えている。さらに大型の着陸機では、これ以上のエンジンを搭載することは難しいので、大型エンジンの開発が必須となる。



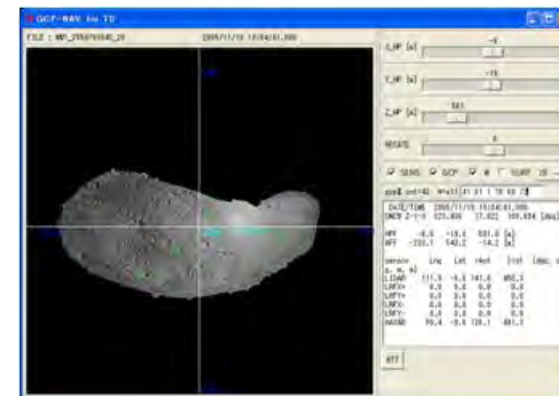
写真はアポロ着陸船のTRW TR-201(写真:
(C)NASA)

③地形照合方法

- 従来の地上からの電波を用いた誘導法では1km程度の着陸精度が限界である。100m級の着陸精度を実現するためには、月面地形を照合しながら着陸点を目指す必要がある。
- 米欧では、地形情報から飛行経路に沿った表面の予想画像を生成しておき、これと実際のカメラ画像を見比べることによって、探査機位置を正確に決める方法が研究されている。
- 日本では、「はやぶさ」探査機において、地上にてオペレータが地形照合を行うことにより、小惑星イトカワに10m程度の精度で着陸させることに成功した。さらに、世界に先行している本技術を用い、このアルゴリズムを高速化して、探査機の計算機に載せるため、地形情報から特徴地形(クレータなど)の位置をデータベース化し、これと撮影画像から抽出された特徴地形の位置とをパターンマッチングする方法が研究されている。
- 地形照合方法では、日照条件などが異なる自然地形画像をいかに間違い無く処理できるか、そしてそのような演算が宇宙用計算機などで実現できるかが重要課題となる。
- なお、このような地形照合航法技術は、工場での部品位置決め技術などと共通性があると同時に、被災地偵察用無人飛行機等にも適用できる。



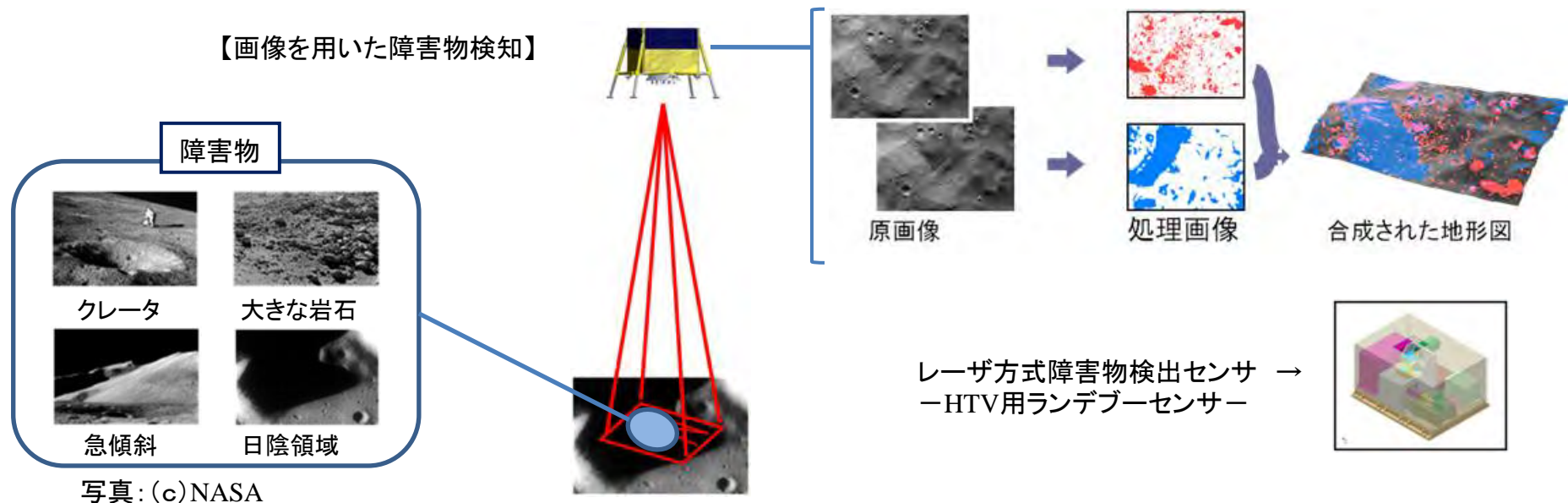
地形照合方法



小惑星探査機「はやぶさ」での実例

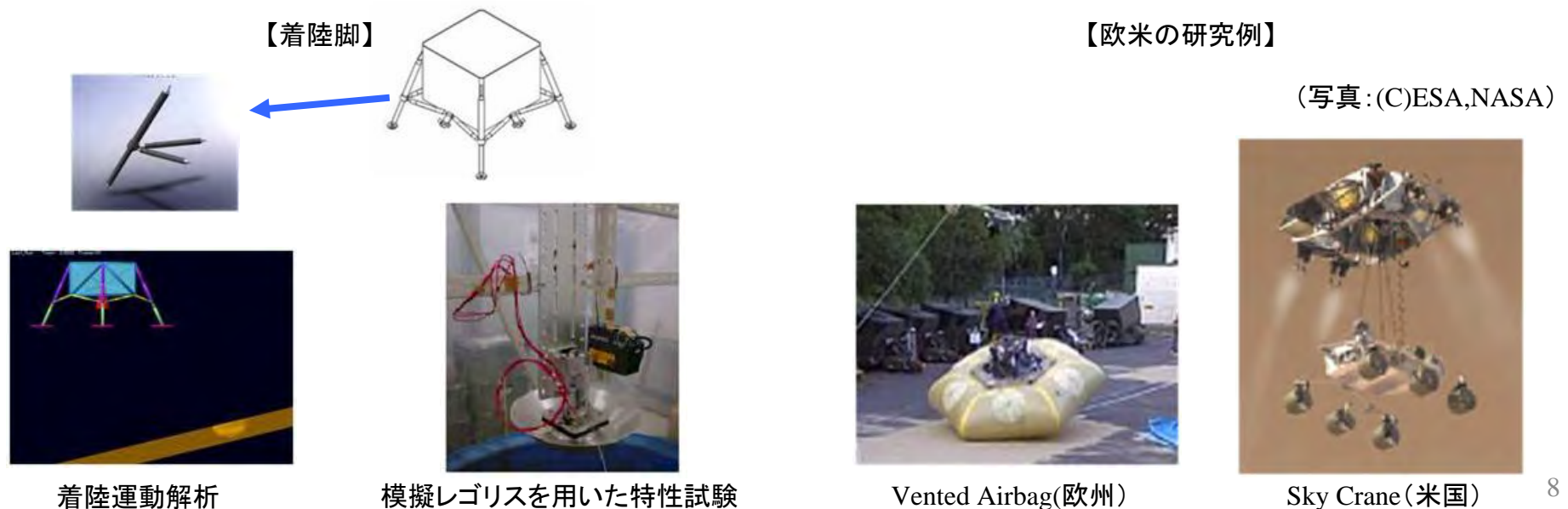
④障害物検知・回避

- 探査機を高精度、安全に着陸させるためには、カメラのほかにレーザ光や電波を月面に照射し、その反射信号を処理する方式の障害物検知・回避のためのセンサが必要である。
- これまでの米露の探査においては、(特定の着陸目標点があったわけではなく)障害物が少ない地域を狙って着陸を実施。有人飛行においては、宇宙飛行士が障害物を避けるように操縦することも可能であった。次世代の「降りたい場所への着陸」では、障害物の自動検出・回避技術は必須であるので、各国が研究開発にしのぎを削っている分野であるが、高性能なセンサを開発する技術が難しく、各国が開発途上にある。
- この中、米加独では、民生の測量用(カナダ:LIDAR)や軍用(米国:Flash LIDAR、カナダ:STS用発展型など)のものを宇宙化する開発を行っている。
- 現在、日本においてはJAXA、大学、宇宙機メーカーなどで研究段階であるものの、開発したHTV用ランデブーセンサをを改良して障害物センサとする案を検討中。
- カメラ画像から障害物を検出する方法は、誤認識しないようなアルゴリズムの研究が重要課題となる。また、画像を用いる方法は、誤認識の可能性がある、極地域では岩石等の影が大きく使えない等の問題があるため、レーザセンサにより地形を直接高精度に測定する方法も検討されているところ。
- なお、これらの技術成果は、自動車の自動走行や移動体による3次元測量に応用可能となる。



⑤着陸脚

- 着陸脚の役割は、着陸時の探査機への衝撃緩和と転倒防止であり、月面着陸する際に必須となる。
- 米国では、既にアポロ着陸機においてハニカム構造のアルミでできた脚がつぶれることにより衝撃を吸収する方式が用いられたが、比較的大型のものであった。現在、火星探査機用として探査機をひもでつるしながらそっと着地させる方式(Sky Crane)などが研究されている。
- 欧州では、エアバッグのエアを着地の瞬間に解放するVented Airbag方式が火星探査用に研究されている。
- 日本においては、約10年前に1本足のハニカム構造脚の試作、試験などを実施したが、今後、模擬レゴリスを用いた試験、転倒解析などを行う必要がある。また、国内の大学では、形状記憶合金を用いた再使用可能な着陸脚なども研究している。
- 着陸脚は、月面の状況に応じてつぶれる長さが変わるため、平坦で無いところへの着陸時の転倒可能性の回避や1回しか使用できない(地上であらかじめ試験できない)という課題がある。
- なお、衝撃吸収技術は様々な産業応用が期待でき、また転倒解析・防止技術は歩行ロボットなどの不安定系の制御と共通する技術である。



2. 探査ロボット技術

主要技術課題

②操作・制御技術

- ・地形計測、マッピング
- ・自動経路生成
- ・障害物検知、自律化

③作業技術

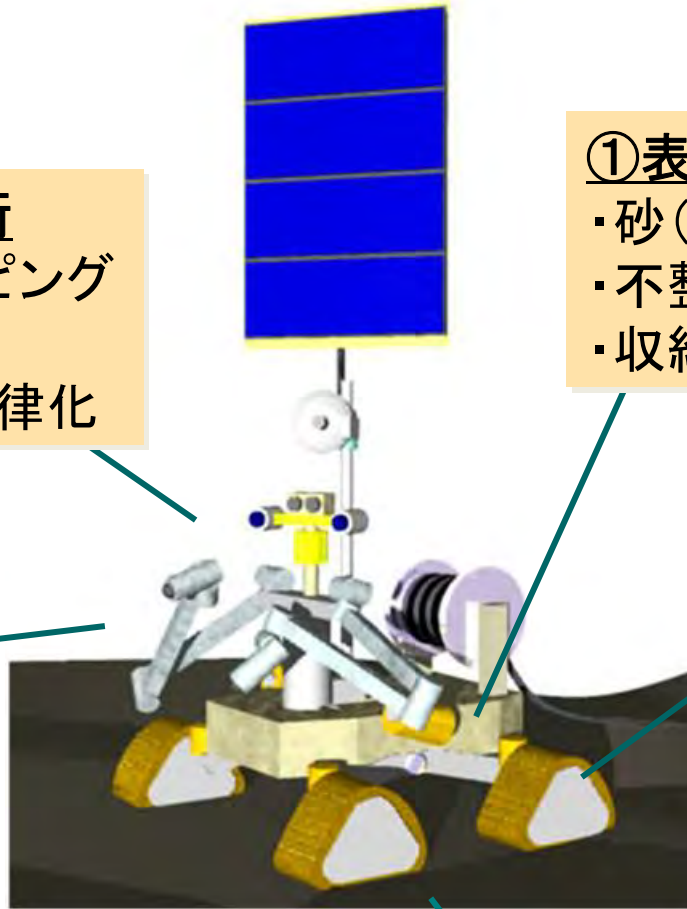
- ・把持、研削
- ・掘削、埋設
- ・接続、組立

①表面移動技術

- ・砂(レゴリス)地走行
- ・不整地走行、登坂
- ・収納

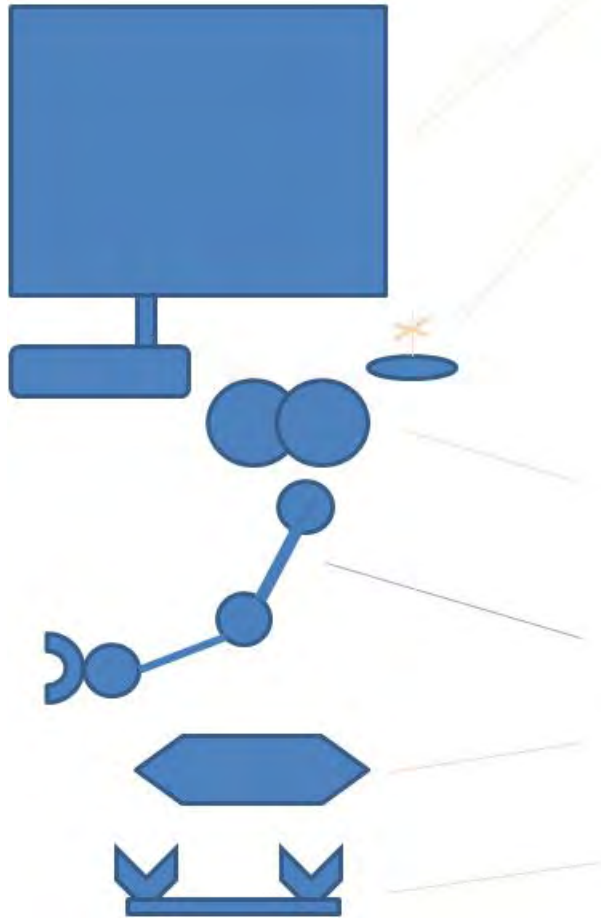
④耐環境性技術

- ・低温／高温
- ・夜間電源供給
- ・レゴリス防塵



(共通)要素の小型・軽量化
・観測装置への質量配分増

基本構成と基本機能



- ・電力: 太陽電池で電力を得る。
日陰時はバッテリーや再生型燃料電池の電力で活動。
- ・通信: 着陸機の近傍では着陸機と通信。着陸機と離れた場所では中継衛星経由等で地球と通信。
- ・熱制御: 中低緯度の昼間は太陽以外の空間方向に放熱。夜間は嚴重な断熱シールド。
- ・計測: 画像、地形、姿勢などのセンサを有し、地上にデータを送信。
- ・作業: ロボットアームを有し、汎用的に作業に対応。
- ・移動: 着陸機から作業対象(複数)までの移動機能。
- ・収納: 打上時には着陸機上に収納・保持され、月面において、降機、展開される。

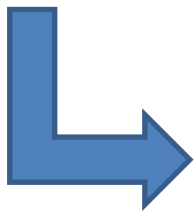
①表面移動技術(1/4)

表面移動の環境

地形:クレータ中央丘、有人拠点候補地は、いずれも山岳地帯（山岳地帯の平均斜度15度、最大斜度30度程度）
土壌:月面は、砂(レゴリス)が数m～数十m積もっている。

<レゴリスの特徴>

- ・尖った粒子形状 → ふかふか状態だが圧縮すると絡み合う。
- ・数十ミクロン以下の微粒子が多い



移動機構方式の比較



最適な解は・・・

方式	概念図	最小自由度数*	接地面圧**	メリット/デメリット	選択
2脚		12	大	・安定性:小	
4脚		8	中	・岩場乗越え:良	
6脚		12	小	・岩場乗越え:良 ・安定性:大	
剛性車輪		2	大	・シンプル機構 ・高速化:良	
弾性車輪		2	中	・シンプル機構 ・制御性:低	○
クローラ		2	小	・岩場乗越え:良 ・不整地フィット:良	○

*: 少ないほど信頼性が大
 **: 砂地移動には適度の低さが必要

①表面移動技術(2/4)

- ・月面は細かい砂(月レゴリス)で覆われた不整地であり、砂で滑ったり埋もれたりしてスタックを生じやすい。
- ・アポロ月面車、ルノホートにより一定の走行性が実証されたが、砂地土壌でのスタック回避は依然として課題に残っている。乾いたレゴリスが厚く覆っている月面では、一度スタックすると出られない可能性が非常に高い。

事例	画像(ローバ)	画像(走行系)	走行時スタック事例
アポロ月面車 (LRV) :NASA		 (金属メッシュ弾性車輪)	<ul style="list-style-type: none"> ・アポロ15号のLRVはスタックし、宇宙飛行士が引き出した ・「土壌が柔らかい領域があり、車両が動かなくなる。対策が必要。」(Lunar Sourcebook)
月無人ローバ (ルノホート) :旧ソ連		 (剛性メッシュ車輪)	<ul style="list-style-type: none"> ・土壌が急激に柔らかくなるクレータ近辺で車輪が20cm沈み、走行に多大な困難を伴った。
火星探査ローバ (MER) :NASA		 (剛性車輪)	<ul style="list-style-type: none"> ・斜度16度の砂地斜面でスタック(2004. 3) ・低い砂丘で1ヶ月以上スタック(2005. 4)

(写真:(C)NASA、RSA)

①表面移動技術(3/4)

- ・車輪の直下の接地面圧の高い部位で掘り込み、沈み込みが生じる。
- ・地盤を適度の接地面圧で締め固めながら移動すると滑らないため、スタック防止には、広くフラットな接地面を持つ低圧走行機構(クローラ、弾性車輪)が有望。(右下図)
- ・20度の斜面で10%程度の滑り率、25度の斜面では安定した滑り率で走行可能なことを目指す。(火星ローバでは40%以上の滑り率で異常と判定。)
- ・欧米は次期火星ローバに弾性車輪を想定。
- ・JAXAでは弾性車輪と特性の良いクローラを並行開発中。
いずれも、方式として目処が付き、搭載化の詰めの段階。



①表面移動技術(4/4)

世界の月惑星面移動ロボット事例

ロボット	天体	時期	活動期間	重量(kg)	走行距離	エネルギー源	画像
ルノホート (Lunoknod)	月	1970 1973	10.5ヶ月 5ヶ月	840	10.5[km] 35[km]	昼:太陽電池 夜:ラジオアイソ トープ(保温用)	
アポロ月面車 (LRV)	月	1971	3~4時間	230 + クルー2名	25-35[km]	1次電池	
ソジャーナ (Sojourner)	火星	1997	83日	10.5	約100[m]	昼:太陽電池 夜:ラジオアイソ トープ(保温用)	
スピリッツ・ オポチュニティ (MER)	火星	2004	5年	185	10[km]~	昼:太陽電池 夜:ラジオアイソ トープ(保温用)	

(写真:(C)NASA、RSA)

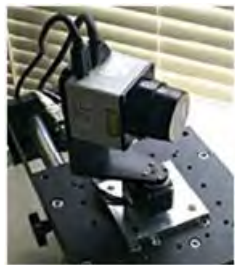
②操作・制御技術(1/3)

操作・制御の環境

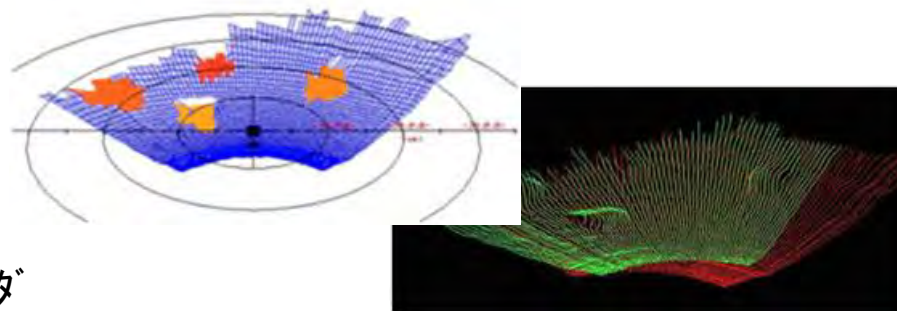
地形情報: かぐやの観測により分解能10m程度の地形図
通信伝送時間: 地球から往復3秒程度。(短い)

地形計測、マッピング

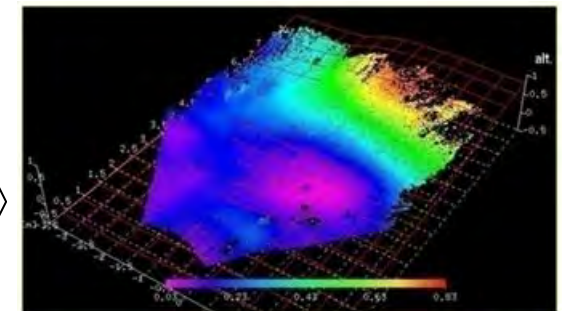
- ルノホートやNASA火星ローバは、マニュアル操縦が基本であったが、今後の探査ミッションでは自動化の適用が進むと考えられる。
- 月面では、詳細な地図なく、GPSは使用できないため、地形を計測し地形図を作成しながら移動し、作成した地形図で自己位置を同定するSLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技術の適用が有望。
- 技術レベルは、米・欧・日ともに同等レベルであり、開発に凌ぎを削っている。
- レーザレンジファインダ(LRF)は大形のものカナダ・独などが搭載用を開発済み。探査ロボット用には、より小型のものが必要であり、JAXAでは、民生用をベースとした小型LRFの研究・開発を進めている。



レーザレンジファインダ



レーザレンジファインダの地形・障害物検知、繋ぎ合わせ



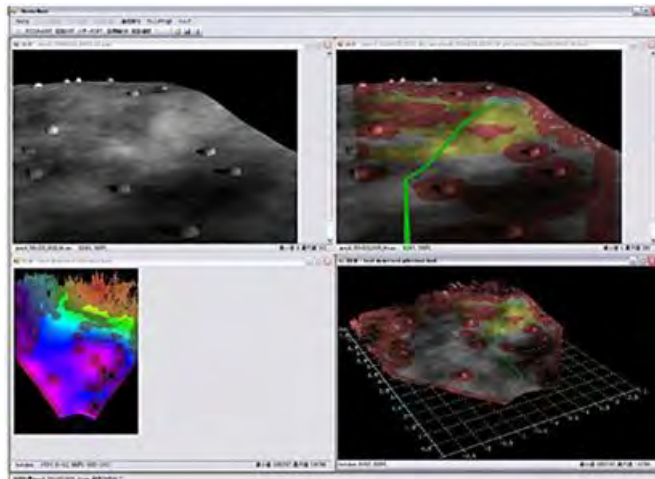
作成した3次元地図

②操作・制御技術(2/3)

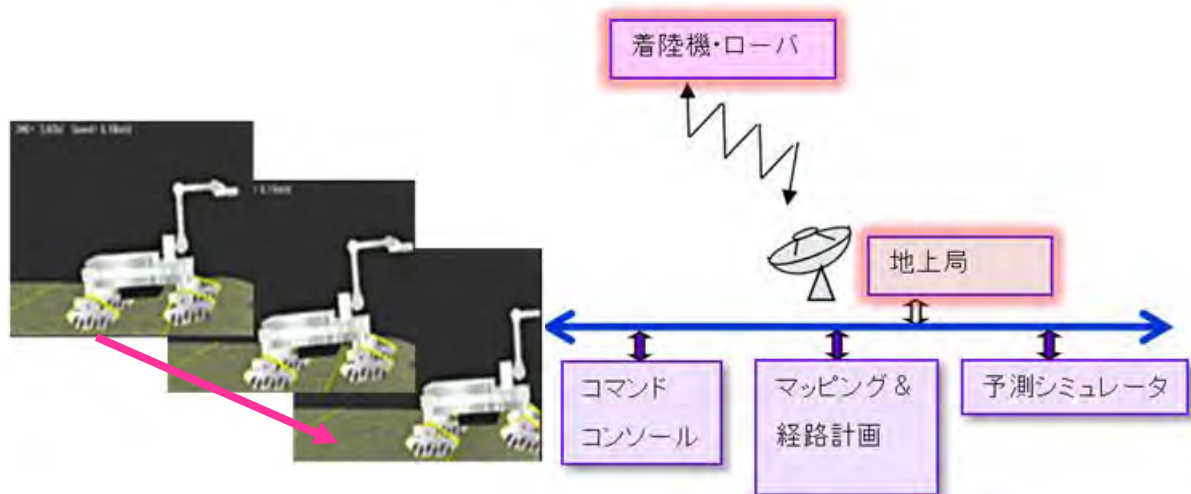
遠隔操作・自動経路生成

これまでの欧米の月・火星探査ローバは、マニュアル操作が基本であったが、JAXAでは、ETS-VIIで実運用に供した自動・遠隔操作技術をベースとした以下の機能構成により、より進んだ操作系の構築を目標としている。

- ・地図(DEM)上で障害物領域や段差、急傾斜領域を自動識別
- ・目標経路に適合し、障害物、急傾斜等を避けた最適経路を自動生成
- ・動力学シミュレーションによる事前確認(自動)
- ・人間が全体経路計画と進行判断を行い、異常時にスムーズ介入



自動経路計画系



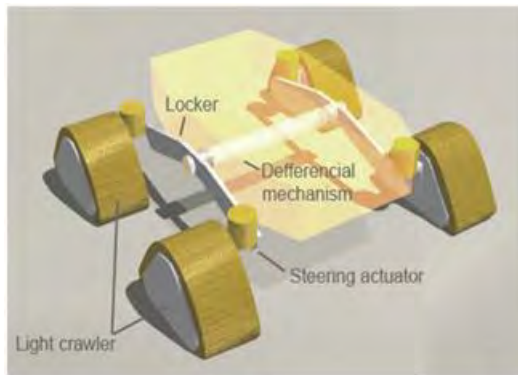
動力学シミュレーション

操作系の基本構成

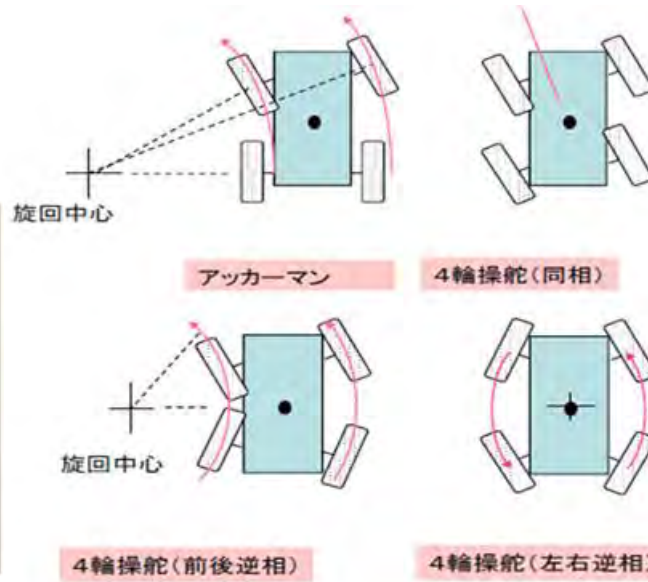
②操作・制御技術(3/3)

走行制御

- 滑りを伴うレゴリスの積もった不整地の走行では、目標の経路に沿った走行や各走行駆動系への負荷配分が課題となる。
- 天体センサによる進行方向検知や加速度計による傾斜角の検知、各センサ情報を統合した制御が必要となる。
- この分野の技術レベルは各国とも同等と思われるが、特性に応じた造り込みが必要。
- JAXAでは天体センサとジャイロを用いた方位計測に基づいて、指令経路に沿って走行する経路制御と各種の走行モードを用意した走行制御系の開発を進めている。



四駆のサスペンションと操舵機構



四駆での各種走行モード

有望な航法制御用センサ構成

機能項目	センサ
3次元地形計測	LRF,ステレオカメラ
遠方地形撮像	広角カメラ
進行方向計測	鉛直上方カメラ
3軸姿勢計測	3軸加速度計
日照方向	太陽センサ
角速度計測	1軸ジャイロ

③作業技術(1/3)

マニピュレーション、作業インタフェース

月面での作業は、高真空、1/6重力の環境下。この環境下で複数の種類の作業を着実に実行することが課題。

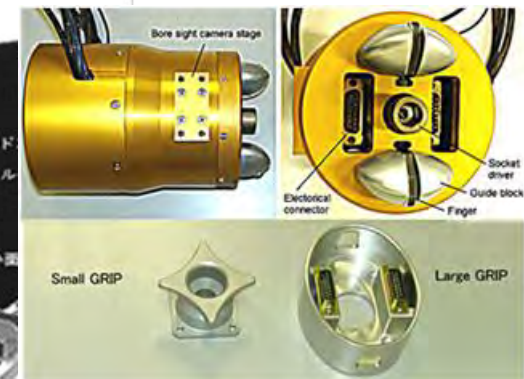
- ・ロボットアームは、汎用的に多種作業への対応が要求されるが、作業項目が限られているため、取っ手やコネクタなどの標準的なインタフェースを設定し、作業種別ごとに用意した定型的な作業パターンで作業するのが効率的かつ着実な方法。
- ・国際協働作業では、標準化で先行・普及(グローバル標準化)することが重要。
- ・ETS-VIIにおいて力制御や画像フィードバック制御の適用により、各種のツールを使用した作業実験が成功裏に実施(宇宙では世界初)された。これらの技術をベースとして、組立作業などの制御技術・インタフェースの研究開発で欧米に先行。



スペースシャトル・ISSで標準のカナダ製ハンド機構と取っ手



ETS-VIIでの各種の作業実験



JAXAが開発した小型ハンドと取っ手

③作業技術(2/3)

世界の宇宙ロボットアーム搭載事例

国(機関)	名称	搭載時期	自由度数	備考
カナダ (CSA)	SRMS(シャトル)	1972-	6	スペースシャトルの大型アーム
	SSRMS(ISS)	2001-	7	ISSの大型アーム
	SPDM(ISS)	2006	7+7+1	機器交換用双腕アーム
欧州 (DLR他)	Rotex(シャトル)	1996	6	与圧室内実験
	Perikan(ミール)	1995	6	機械式マニピュレータ
米国 (NASA)	Viking搭載アーム	1975	1	土壌採取用伸展スコープ ^o
	MER搭載アーム	2003	5	岩石研削・分析用アーム
日本 (JAXA)	ETS-VII	1997-1999	6	技術試験衛星
	MFD(シャトル)	1997	6	JEM子アームの実証実験
	JEMRMS(ISS)	2008-	6+6	JEMの機器交換アーム



SSRMS



SPDM



MFD



ETS-VII



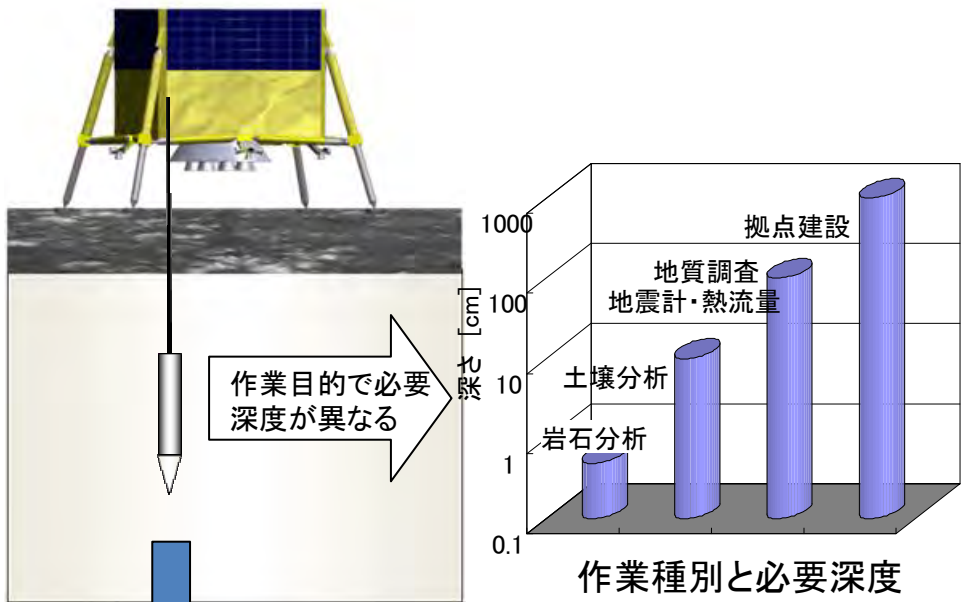
JEMRMS

(写真:(C)NASA、CSA、JAXA)

③作業技術(3/3)

掘削、埋設

・表面探査(2次元)から地下の調査・活用(3次元)へ広がる月面活動の基本技術。



開発中のコンパクトなドリル

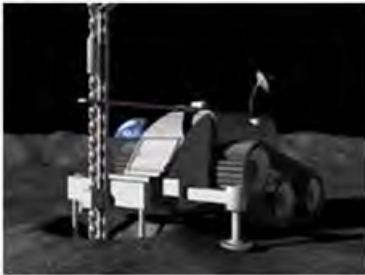
<現在の取り組み例>

- ・当面の目標として数Wで1m程度の掘削を想定。(左図のドリルのサイズは長さ30cm程度。)
- ・コンパクト化のため駆動機構を内蔵。
- ・月面模擬環境試験結果に基づく効率的な外形。

<地上技術との違い>

・月土壤での掘削・排土

地上では排土に水を活用。深さや土質も影響。



・先端ビットの耐久性

月面環境ではレゴリスの摩擦と熱で劣化。

・小電力化、軽量化

電力や質量は地上に比べ圧倒的に限られる。

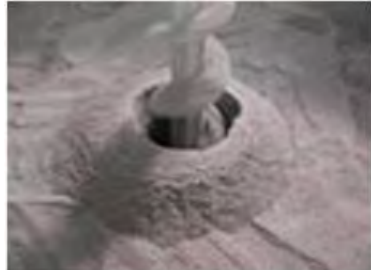
・低重力下での反力の確保

軽量プラットフォームでは特に問題。

上記を解決するために、形状の最適化など、さまざまな工夫を凝らしたオーガ(ドリル)を試作し、月面模擬環境で評価を実施。



試作品の一例



掘削試験の様子

④耐環境性技術

熱環境： 温度変化大、 $-170\sim+120^{\circ}\text{C}$ 昼間は放熱、夜間は保温が課題。

日照：

- ・極域では影の領域が多い(地形計測にも影響)
- ・中低緯度では夜が長い(2週間)

レゴリス： 数十ミクロンの微粒子が多く、機構部への侵入、磨耗が課題。

高温・低温対策

- ・昼間の温度上昇、夜間の温度低下を抑制する温度制御方式の開発が重要。
- ・欧米、中国は放射性同位体により保温。
- ・夜の長い中低緯度探査では、夜間用シールドと大容量バッテリーや燃料電池等のエネルギー蓄積手段あるいは、別途、電力システムによる給電支援が必要。
- ・走行機構やセンサなどの外部露出部分は低温・高温に晒されるため、部品・機器の温度耐久性の試験・評価が必要。

砂(月レゴリス)に対する防塵、摩耗対策

- ・月面では、極低温・真空に加えて、レゴリス粉塵環境下における機構部の潤滑技術および磨耗対策が重要課題。
- ・JAXAでは回転機構部の防塵対策として、樹脂ブラシや防塵構造の開発を進めている。

防塵ブラシ／シール
試作品



探査ロボット技術の産業応用

同種の技術を要するという観点で技術の応用が期待できる産業分野を下表に示す。

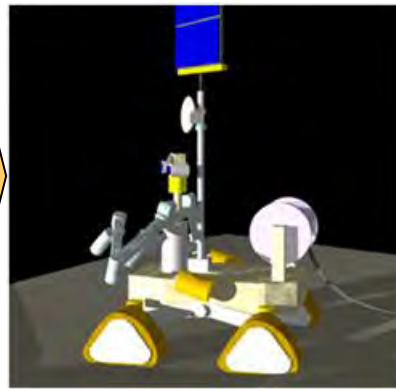
技術項目	応用が想定される産業分野
走行機構	農林業機械／ロボット、建設機械／ロボット、災害救援ロボット
機構要素(潤滑等)	極限環境ロボット、半導体製造装置、表示パネル製造装置
自動／遠隔制御系	海洋探査ロボット、医療ロボット、災害救援ロボット、ホームロボット
センシング	農林業機械／ロボット、建設機械／ロボット、災害救援ロボット

(参考) 探査ロボットの作業シナリオ

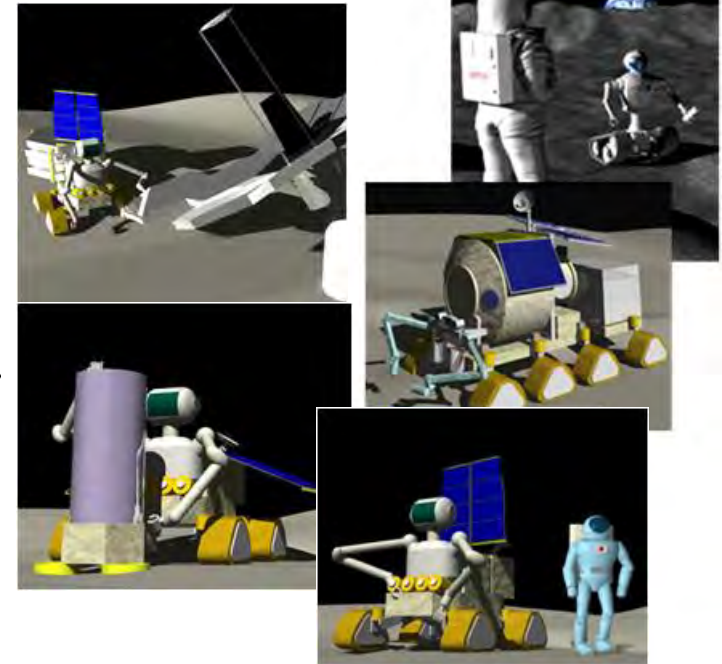
探査ロボットの
移動・採取試験
(2015年頃)



岩石採取 (I 案)
探査拠点の組立 (II 案)
長期間移動探査 (II 案)
(2020年頃)



有人対応の科学拠点拠点建設
人とロボットの連携による本格的な探査
(20XX年)



無人科学探査

作業シナリオ例①
「岩石採取」

長期移動
探査

拠点建設

作業シナリオ例②
「組立、配線」

有人探査支援

作業シナリオ例①: 岩石採取

周囲を観察しながら、移動

地形および岩石外観観察により採取候補を選定

候補の岩石に近づき、表面を削る

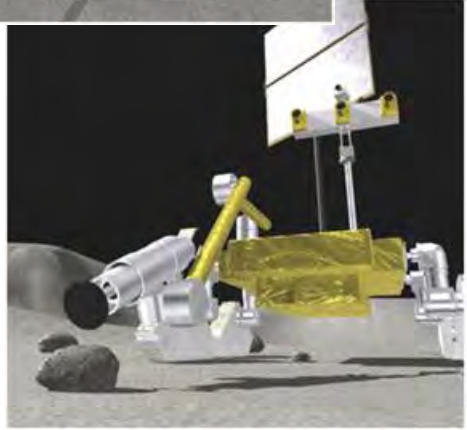
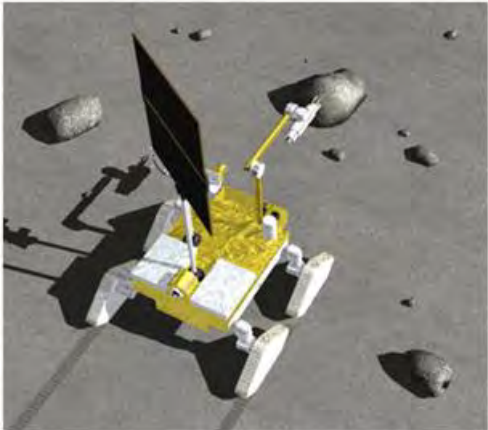
削った岩石面を分光計等で観察

有用なサンプルと判断されたら適度な大きさに割る

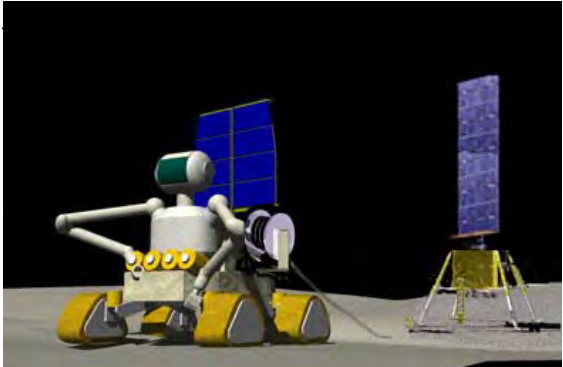
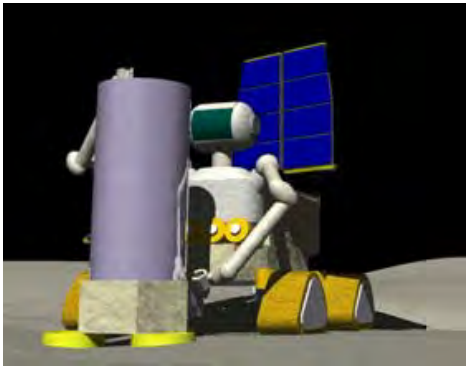
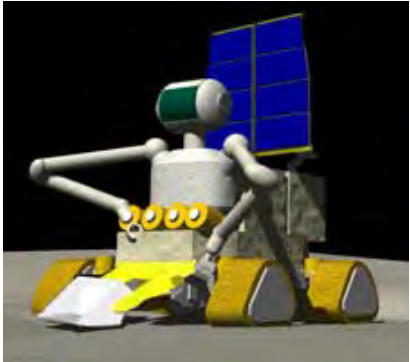
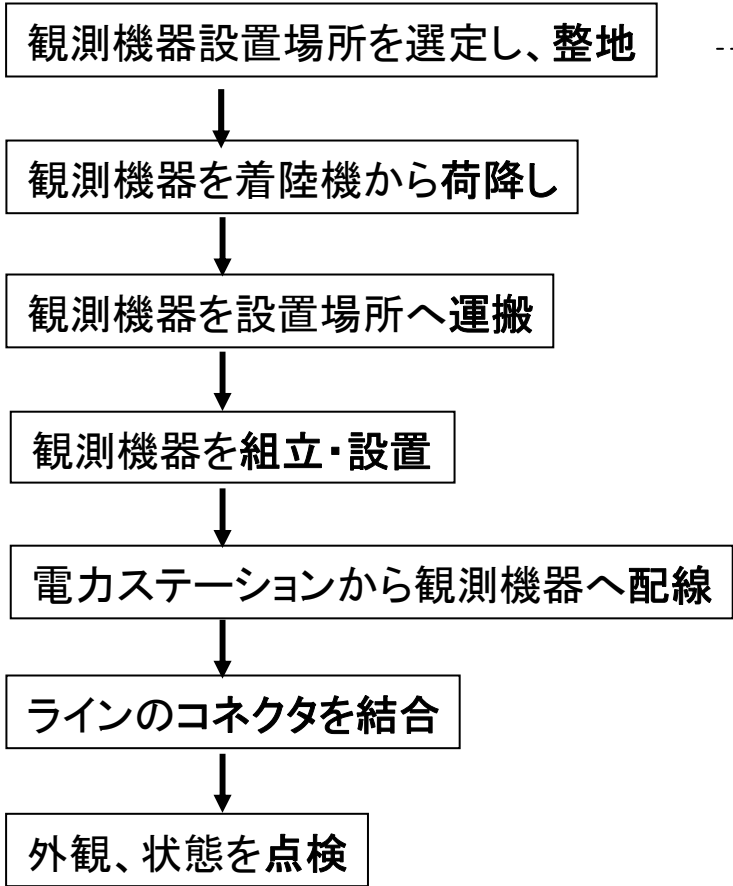
岩石を掴み、カプセルに収納する

複数点のサンプルにつき、上記作業を実施

着陸機に戻り、コンテナを詳細分析装置や帰還カプセルに装填



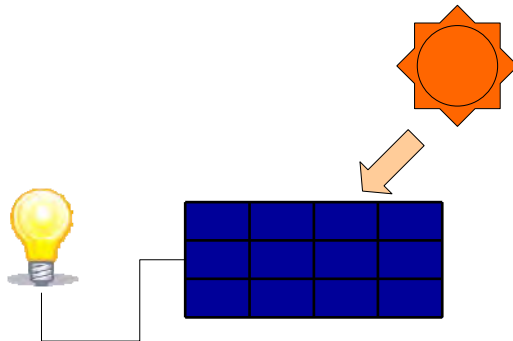
作業シナリオ例②: 観測機器の組立・設置



発電技術

電力への変換効率が重要

- 一次電池
- 太陽光発電
- 燃料電池
- ラジオアイソトープ
- 原子炉



得られる電力は効率に比例

例えば、太陽光発電の場合、太陽光のエネルギーを太陽電池で電力に変換する。地球周辺では、1平方メートルあたり約1350Wである。世界最高効率(非集光型)は35.8%であるので、理想的には480Wの電力が得られる。ただし、常に太陽指向は難しいことや諸損失から1平方メートルあたり200W程度である。

蓄電技術

重さと大きさが重要

- 二次電池
 - ニッカド電池
 - ニッケル水素電池
 - リチウムイオン電池
- 再生型燃料電池



重量はエネルギー密度に反比例

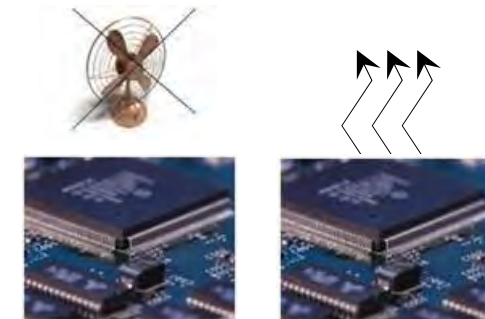
例えば、宇宙用リチウムイオン電池の場合、重量エネルギー密度(1kgあたりどのくらいの電力を蓄えられるか)は高性能な物で150Wh/kg(1kgの電池で150Wを1時間供給できる)くらいである。

再生型燃料電池は、いわば非常に軽い電池で、450Wh/kg以上を目標に開発が進んでいる。

節電技術

放熱量の削減が重要

- 断熱・熱制御技術
- インテリジェント制御
- 高効率デバイス
 - DC/DC変換器
 - 通信機



可能な放熱量は桁違いに小さい

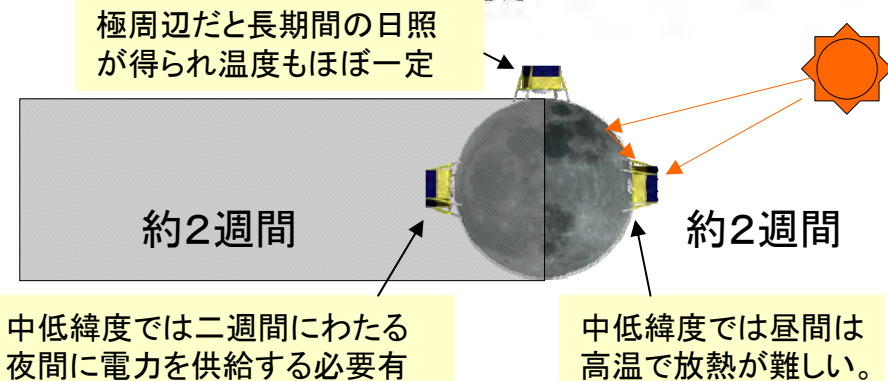
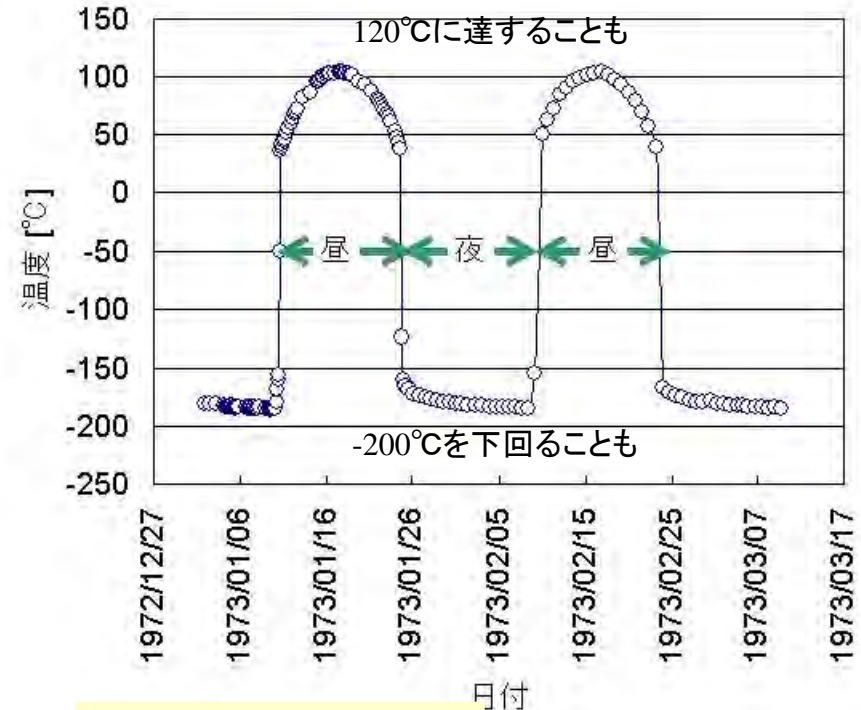
すべての消費電力は最後には熱になる。その熱を宇宙空間に捨てる必要があるが、空気がないので対流による放熱ができず、すべて放射によって捨てる必要がある。

宇宙空間では、放熱面1m²あたり300Wくらいの放熱量となる。

厳しい月面環境

- 厳しい月面環境
 - 中低緯度地域の場合
 - 昼間(約2週間)
 - 最低表面温度: +120°C
 - 放熱が困難
 - 夜間(約2週間)
 - 最低表面温度: -200°C
 - 太陽電池使えず, 100W供給しようとする、現状では300kg近い電池が必要
 - 極域の場合
 - -50±10°C程度でほぼ一定
- エネルギー技術が重要
 - 夜を越えないとミッション期間は昼間の二週間に限定される。
 - 優れたエネルギー技術が必須
 - 発電技術
 - 蓄電技術
 - 節電技術

アポロ17号によって月面に設置された熱流量計による実測値の抜粋。緯度によって最低・最高温度は異なり, 最高温度は約+120°Cであり最低温度は約-200°Cに達する。



日本の優れたエネルギー技術を生かす

太陽電池, 二次電池, 燃料電池, 原子力も含めエネルギー技術は我が国の得意技術

- 発電技術
 - 世界最高レベルの太陽電池技術を生かし、さらなる高効率化と軽量化を計る。
- 蓄電技術
 - 優れたリチウムイオン電池技術や先端を行く再生型燃料電池技術を生かし、小型軽量化を極限まで進めた、革新的な高性能電池の開発。
- 節電技術
 - 優れたデバイス技術や省電力技術や高度な熱管理技術を集約。

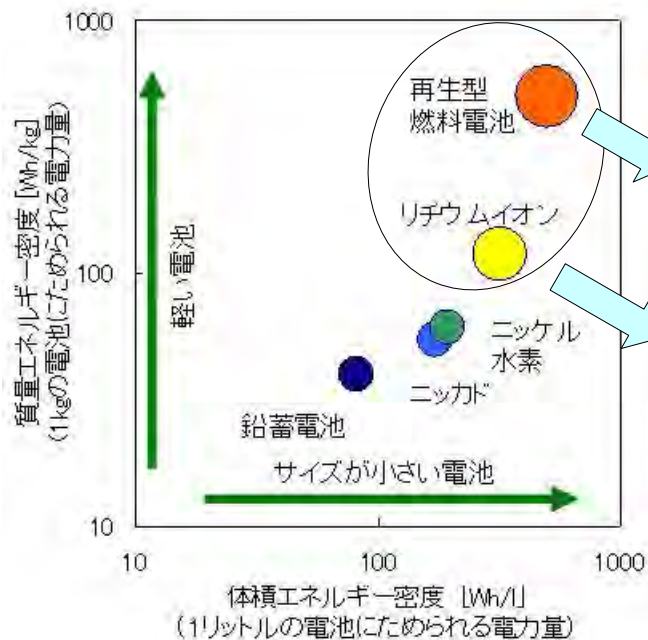
宇宙技術

•宇宙利用に適した薄膜化、高効率化太陽電池の開発
 •超軽量蓄電池である再生型燃料電池技術を確立
 •低温から高温まで対応可能な軽量大容量かつ高信頼リチウムイオン電池の実現等々

地上技術

•太陽電池発電の高効率化・低価格化を牽引
 •水素エネルギー社会の実現を牽引
 •厳しい環境をものともしない電気自動車の発展を牽引等々

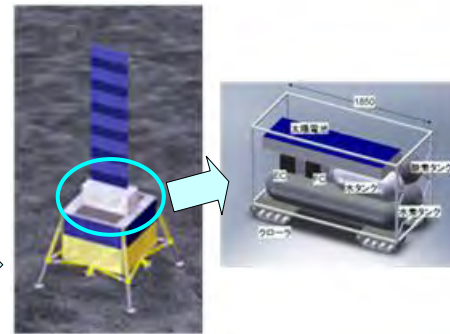
スピニン
スピノフ



2030年頃～:
高性能再生型燃料電池, 宇宙炉

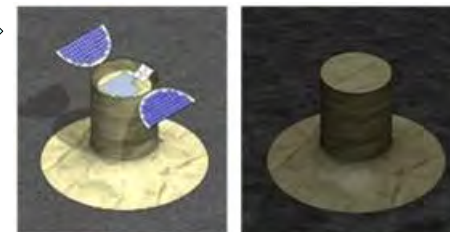
2020年頃:
高性能太陽電池
再生型燃料電池の実用化

2015年頃:
35%級太陽電池
高性能リチウムイオン電池



再生型燃料電池を用いた1kW級越夜電源システム

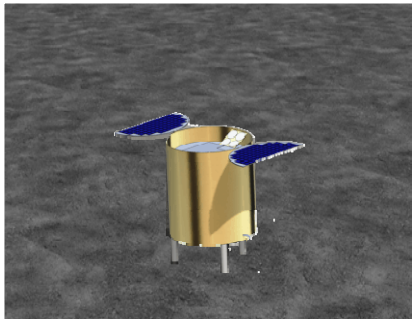
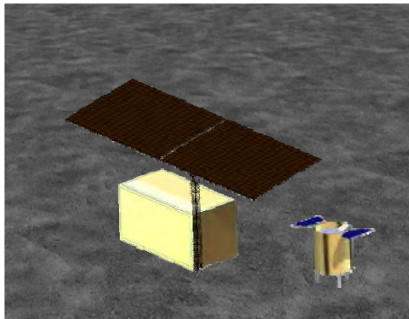
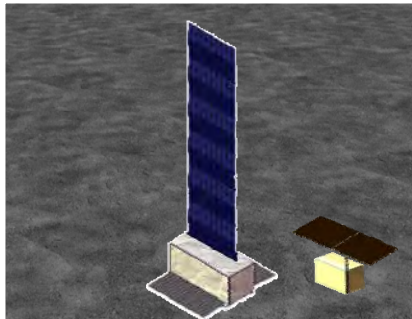
•太陽電池+再生型燃料電池を利用
 •本格的探査のベースライン電源として開発。徐々に大規模化を図る。



昼間運用時
夜間運用時
リチウムイオン電池を用いた10W級越夜電源システム

•太陽電池+リチウムイオン電池を利用
 •観測機器等の汎用電源として有人探査の時代になっても利用。

電源システムの開発ロードマップ(案)

	10W級 電源システム	100W級 電源システム	1kW級 電源システム
必要な時期	2015～	2020～	2020～
想定電力規模	夜間に10Wの電力を供給	夜間に100Wの電力を供給	夜間に1kWの電力を供給
適応先例	地震計、熱流量計、電磁場計などの観測機器	観測ステーション(地震計、熱流量計、放射線モニタ、ダストモニタ)、モニタカメラ、探査ロボットなど	探査拠点、大型の観測ステーション、大型ロボット、月面作業機器など
対応場所	月面全域	月面全域	極域(中低緯度でも利用できるが能力は400Wとなる)
想定する寿命	一年以上	一年以上	一年以上
電源	太陽電池+リチウムイオン電池	太陽電池+再生型燃料電池	太陽電池+再生型燃料電池
将来展開	小電力な観測機器等の汎用電源として広範囲に利用.	観測機器等の汎用電源として広範囲に利用.	探査拠点の電源として活用. 大規模化を図ることが可能.
イメージ図			

- リチウムイオン電池

- 競争力:

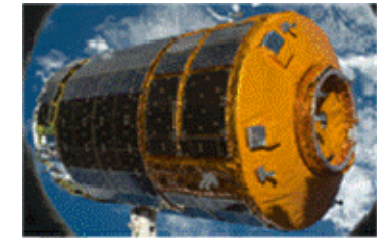
- 宇宙用はフランスと並んで我が国が世界最先端である。民生用は圧倒的に優位。

- 現在の取り組み

- 高容量化(現状150Wh/kg→近い将来200Wh/kg)を図る研究を実施。
- できるだけ広い温度範囲で使用できる必要があり、電力密度が高いHTV用電池の温度試験等を実施し、適用性を見極めを実施。
- 宇宙用をJAXAと電池メーカーが共同で研究開発している。

- 将来性

- 宇宙用は、世界をリード可能。また、耐環境性能に優れた電池はモバイル機器やハイブリッド自動車などに応用が期待される。



HTV
(写真:(C)NASA)

- 再生型燃料電池

- 競争力:

- 地上用では我が国は最先端。宇宙用の実績はない。ただし、再生型燃料電池自体については、JAXAにおいて成層圏プラットフォーム用や宇宙用を目指した研究開発を進めており技術が蓄積されている。

- 現在の取り組み

- 再生型燃料電池に必要な、軽量酸素タンク、生成水を再度電気分解し高圧で蓄える高圧水電解技術などの研究開発を民間と共同で実施している。

- 将来性

- 再生型燃料電池は、要は超軽量バッテリーであり実用化できれば、リチウムイオン電池の1/3~1/5の重さが実現できる。そのため、まったく排出物を出さず、一度の充電で長距離走れる電気自動車の実現につながる。
- また、太陽電池や風力発電の様な不安定な自然エネルギーを蓄え、安定的に給電できる環境負荷のない発電システムの実現につながる。



宇宙用再生型燃料電池の試作品

- 太陽電池技術

- － 競争力:

- 宇宙用シリコンセルはかつては世界最先端でシェアも高かった。現在主流のリジッド多接合型セルで出遅れたが、現在、優位性を取り戻しつつある。薄膜多接合型セルの高効率化・大面積化技術では世界最先端(最高効率)である。民生用ガラス基板CIGSは国際競争力がある。

- － 現在の取り組み

- 軽量化・薄膜化及び耐環境性向上を図り、且つ高効率な太陽電池を研究開発中。JAXAとメーカー及び産総研と共同で研究開発している。
 - 極域の場合、いかに高い太陽電池タワーを建てるかが重要である。そのため、軽量の展開機構、インフレーター構造などがJAXA内外で研究されている。

- － 将来性

- 薄膜多接合型セルは、原料の使用量が少ないため、安価に供給できる可能性を秘めており、将来の太陽エネルギー利用に寄与できる。

- 熱制御技術

- － 競争力

- 天文衛星、惑星探査機などで高度な技術を有する。

- － 現在の取り組み

- JAXA内各部署が連携して、断熱材、可変熱放射率素子、熱スイッチ、ヒートパイプなどの研究開発を行っている。

- － 将来性

- 宇宙用の断熱技術などは、住宅用断熱塗料として実用化するなどすでに民生利用の実績がある。
 - 液体天然ガスの輸送・貯蔵技術の向上(省エネルギー)、液体水素の貯蔵技術の実用化(脱炭素社会の実現)などにも大きく寄与すると考えられる。

太陽電池+二次電池



•かぐや(月周回衛星):

日照時は太陽電池で発電し、太陽電池が使えない日陰時は、二次電池で電力を供給する

※かぐやの二次電池はニッカド電池である。太陽電池は、二重接合セルである。

一次電池、太陽電池+二次電池



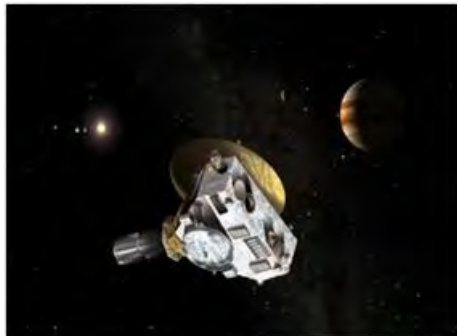
•HTV(宇宙ステーション補給機):

(写真:(C)NASA)

一次電池と太陽電池+二次電池を搭載している。太陽電池、二次電池、一次電池からの電力を併用している。

※HTVの一次電池は、リチウムイオン二次電池を一次電池として利用している。

ラジオアイソトープ電源



•ニューホライズン(冥王星探査機、米国):

(写真:(C)NASA)

太陽電池が使えないため、ラジオアイソトープ(放射性同位元素)を熱源とした発電により電力を供給する。

※ラジオアイソトープ(放射性同位元素)は、放射線を出し別の物質に変わる。そのときの放射線のエネルギーを熱エネルギーに変え、温度差で起電力が発生する半導体である熱電素子などで発電する。例えばプルトニウム238(核燃料に利用されるプルトニウム239と違い核分裂しない)は、 α 線を出し、半減期88年(別の物質に半分が変化する時間)である。そのため数十年にわたって電力を供給できる。 α 線は紙一枚で遮蔽できるため、放射線は全く外部に漏れない。

一次燃料電池



•スペースシャトル:

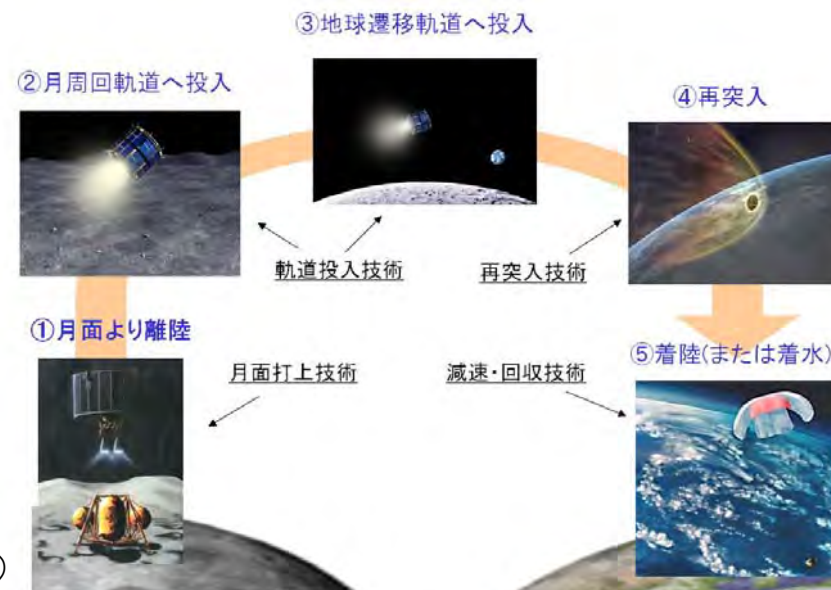
(写真:(C)NASA)

ミッション期間が2週間と限られているため水素と酸素を反応させて電力を得る一次燃料電池を利用している。

※ミッション期間が限られるため、水素と酸素を持って行き、アルカリ型の燃料電池で発電を行っている。燃料電池から生成された水は、クルーの飲料等に使用するため飲料水タンクへ送られるが、実際は使い切れないため、余分な水は船外へ排出される。現在、自動車用などで開発が進んでいる高分子型燃料電池は、ジェミニ宇宙船(米国)で用いられた。

4. 地球への輸送技術

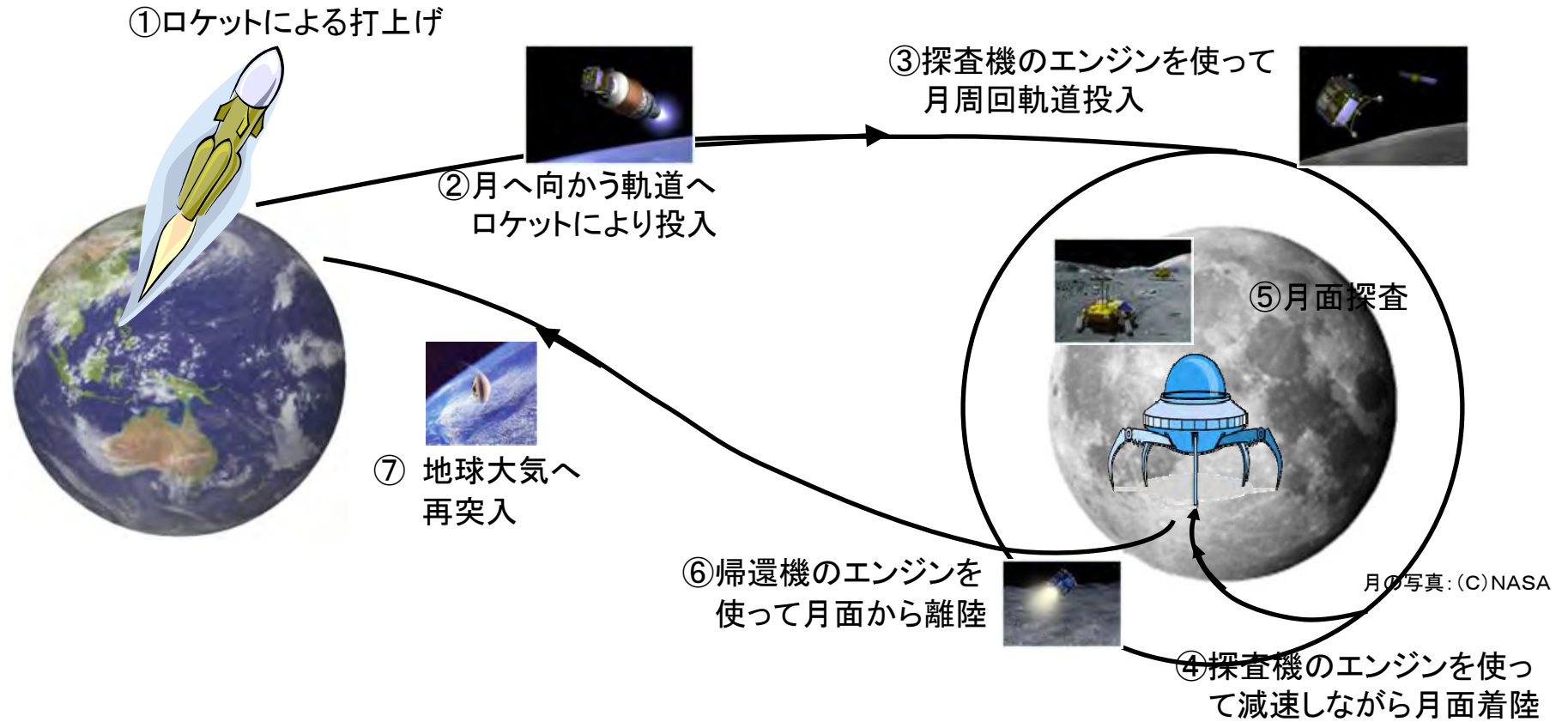
- 地球への輸送技術は、月からの離陸、(月周回軌道でのランデブードッキング)、帰還までの誘導制御、再突入カプセルに分けられ、採取した岩石を地球へ持ち帰るために必要である。
- 米国ではアポロ計画等により地球帰還技術は習得。
- 日本においては、再離陸技術、地球への帰還誘導技術は、これまでの探査機工学の範囲で開発可能であるが未知の領域である。再突入カプセル技術については、地球周回軌道からの帰還よりも突入速度が大きく設計が難しくなるが、「はやぶさ」で開発された惑星間軌道からの再突入技術が使用できる。ただし、カプセルの大型化のためには、耐熱材料の改良等が必要である。
- 月周回軌道から月面へ往復するには多くの燃料が必要となる。そのため有人宇宙船など大型のものでは、必要最小限の部分を月面に降ろし、地球帰還部は月周回軌道で待機する方式が効率的となる。他方、小型探査機の場合は、軌道上で待機する機体やランデブードッキングするための装備がシステム全体で占める割合は比較的大規模となるため、月面上から直接帰還する方式が有利となりうる。
- 高速再突入技術は、地球周回からの帰還に応用すれば、より小型軽量のシステムとすることができる。また、耐熱材料技術は、他の産業分野への応用も期待できる。



(各図は想像図 /月の写真:(c)NASA)

5. 輸送系(ロケット)技術 ～月探査の想定シナリオ(例)ーロボットによる月探査の一例～

注: 写真はあくまでもイメージを示すもの。提供: JAXA・NASA



(例) 月探査における重量変遷

観測成果の拡大

サンプルリターンミッションの成果拡大

ロケットの(例)	①-②月への軌道	③月周回軌道	④月面到達	⑤観測機器等	⑥地球帰還軌道	⑦地球帰還 (大気圏に突入)
現行基幹ロケット(H-IIB)	5300 kg	2600 kg	1300 kg	600 kg	300 kg	20 kg
基幹ロケット大重量級 (現行の2倍以上の能力)	7ton以上	—	—	1.2ton以上	600kg以上	40kg以上

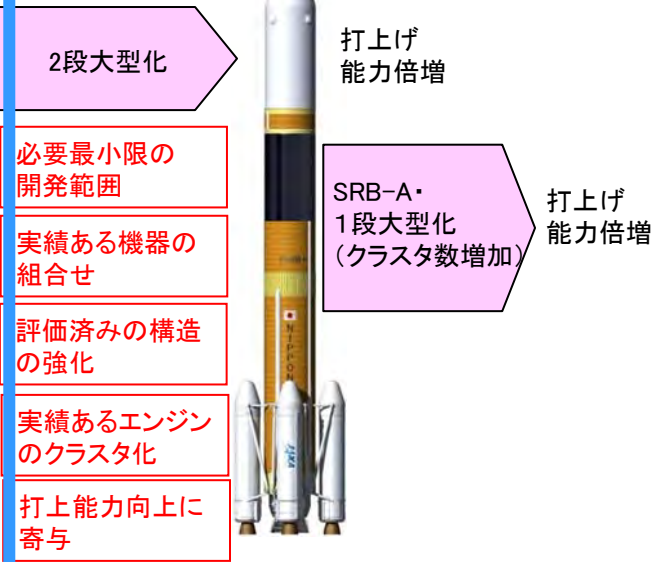
- 「**基幹ロケットの戦略的強化**を通じた技術基盤」を土台として、月探査に求められる輸送能力に**確実・効率的**に対応可能。
- 基幹ロケットの実運用を通じて成熟した技術を活用し、**必要最小限の変更**をすることで、**極めて効率的に大重量化**する。
(技術基盤を活用した大重量化は、H-IIBロケット開発において実績あり)
- 打上能力の大重量化は、月探査のみならず、大型化しつつある**静止衛星の動向**へも対応可能

基幹ロケットの戦略的強化



- 多数回着火能力の獲得
- ネットワーク化・モジュール化
・拡張性 ・品質安定化
・低コスト化
- 低コスト・軽量構造仕様化
- 簡素でフェイル・セーフなロケットエンジン
- 射点設備の簡素化
機上点検の強化

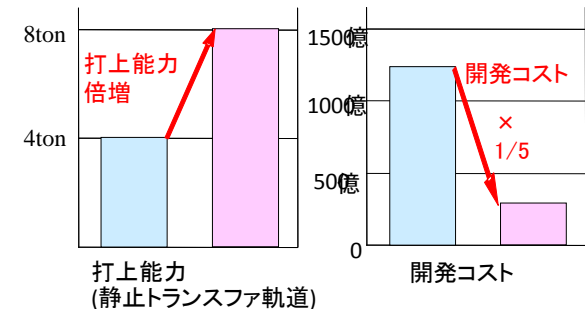
基幹ロケット大重量級



- 必要最小限の開発範囲
- 実績ある機器の組合せ
- 評価済みの構造の強化
- 実績あるエンジンのクラスタ化
- 打上げ能力向上に寄与

基幹ロケットの技術基盤を最大限活用した大型ロケット開発事例(H-IIBロケット)

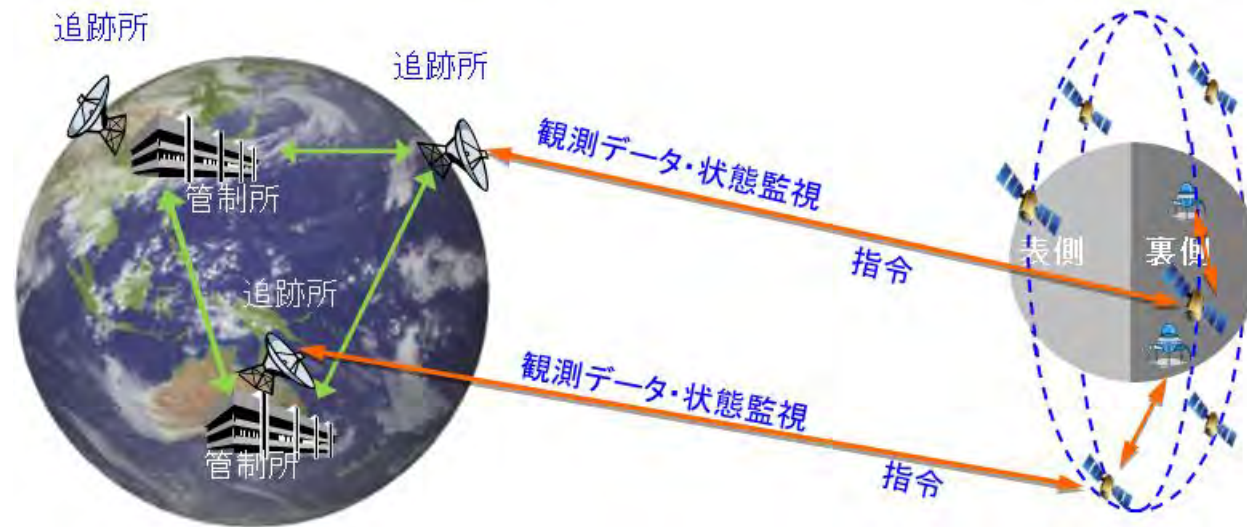
- ・ H-IIA202の打上げ能力を2倍に強化。
- ・ 5年/270億円(試験機除く)という短期間、低コストで計画通りに開発を完了。
- ・ 試験機で実用ミッションを担うISS補給機(HTV)初号機を打上げ。
- ・ 全段組立状態で開発中に発生した不具合件数はH-IIAと比べて激減。



	H-IIA(202)	H-IIB
打上げ能力	約4ton	約8ton
開発コスト	約1250億円	約270億円
開発期間	7年	5年

6. データ通信技術 月の裏側と地球との通信案

(各図は想像図)

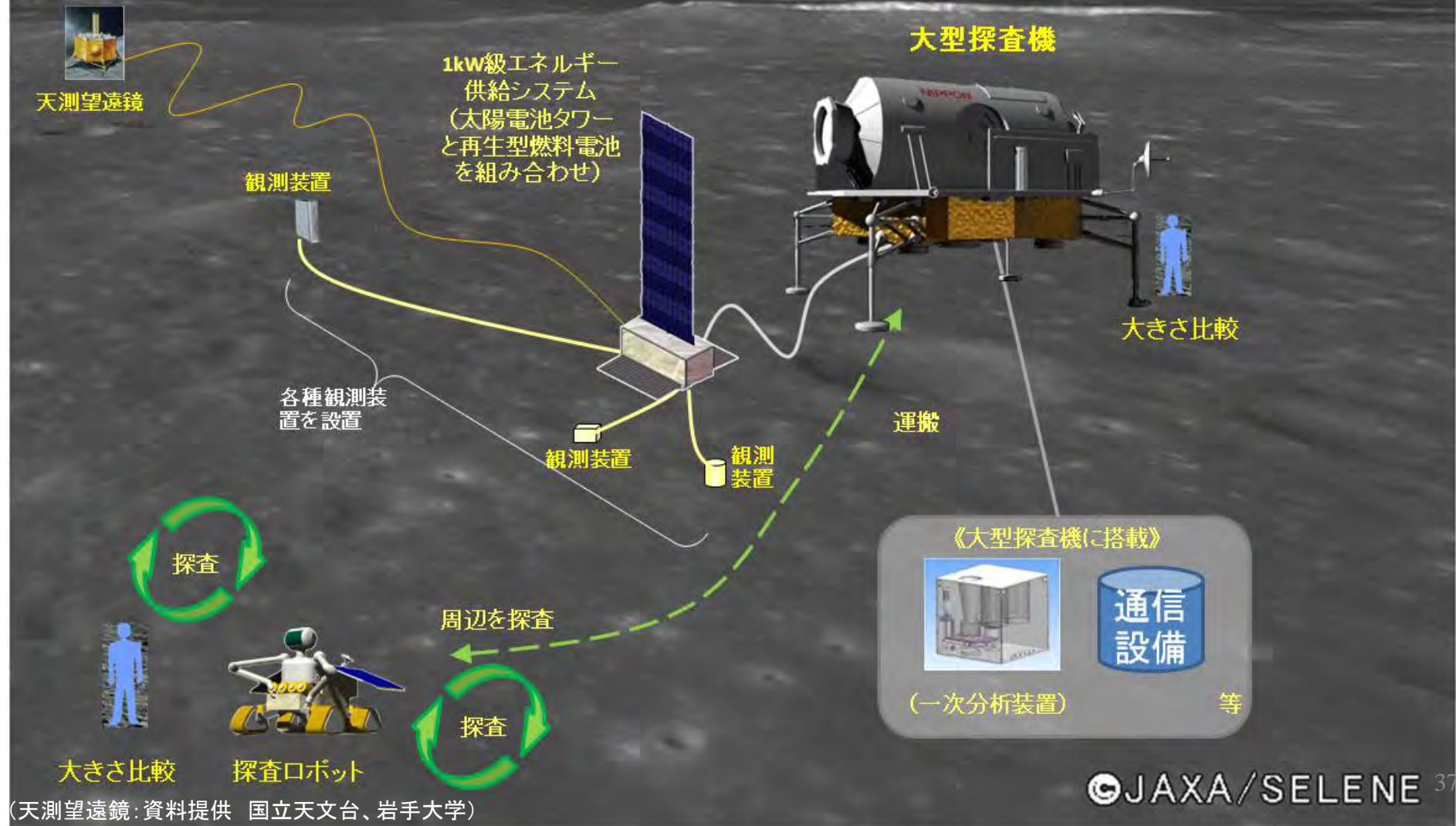


- 月の裏側と地球との直接通信はできないので、月の周回軌道に中継衛星を配置する。
- 月面の任意の地点と常時、通信を可能にするには、中継衛星を直交する2軌道面にそれぞれ3衛星を配置する必要がある。追跡局も3局必要となる。
- 月面の地点および通信可能時間が限定される場合は、中継衛星数を減らすことができる。また、長円軌道とすることも考えられる。
- 着陸やローバーの機能確認に時間的制約があるときは、その稼動状態を地球でリアルタイムでモニターし、必要な指令を送信できるようにする。

7. 月探査の拠点イメージ(案)

2020年頃の拠点イメージ

探査機により、月の表側の極周辺(月の表側と裏側の境界領域)の日照率の高い地域に軟着陸を実現。1kW級のエネルギー供給システム等をロボットにより組み立て、探査拠点とする。数ヶ月間に亘り、探査拠点から探査ロボットにより極周辺の岩石を採取し、探査拠点に集めてその場で分析を実施。



7. 月探査の拠点イメージ(案)

20YY年頃の有人月面拠点イメージ

南極などの日照条件のよい場所に建設され、飛行士が数ヶ月間連続して滞在し、科学探査、月の資源利用のための設備組み立て／運用、火星探査のための技術開発や生命科学実験などを実施する。なお、広範囲の探査を行うためのローバや着陸地点から拠点までの移動システムなどが駆使される。

電力発生システム

居住モジュール

貨物輸送機

与圧ローバ

資源利用装置

表面移動システム

曝露ローバ