

# 月探査の全体シナリオと技術的課題 (案)

平成21年11月18日  
平成21年12月09日改

長谷川 義幸  
(独立行政法人宇宙航空研究開発機構)

blank page

## 【目次】

1. ラフシナリオ案の考え方
2. ラフシナリオ案
3. 第一段階(2020年頃まで)の具体的探査計画案  
【Ⅰ案】～2020年頃に、月の石を地球に持ち帰る～
4. 第一段階(2020年頃まで)の具体的探査計画案  
【Ⅱ案】～2020年頃に、探査拠点を構築する～
5. 技術的課題
6. 月・惑星探査に関する海外の主な動向
7. 月面技術からの地上技術への応用例

# 1. ラフシナリオ案の考え方

- ◆ これまでの月探査懇談会における議論を踏まえ、考えられる目標案と全体シナリオ案を整理した。
- ◆ 2020年頃の月探査の考え方としては、以下の3つが考えられる。
  - ロケットや探査機などの宇宙技術と、将来の地上での重要な先端技術と見られるロボット技術、エネルギー技術などを統合した形で月探査を実現
  - 世界をリードする科学的な成果を得る月探査を実現
  - 宇宙探査や有人宇宙活動など、我が国の将来の宇宙活動の発展につながる宇宙技術(往還技術など)を獲得する月探査を実現
- ◆ 第2回会合では、科学探査の面で、地質探査(アプローチA)、内部構造探査(アプローチB)、天文観測(アプローチC)を提案し議論いただいた。議論を踏まえ、これらの複合ミッションの技術的実現性も考慮し、考えられる2020年頃の目標案として、以下の2案に整理し直した。
  - (Ⅰ案) 2020年頃に、月の石を地球に持ち帰る案
  - (Ⅱ案) 2020年頃に、探査拠点を構築する案
- ◆ 全体シナリオ案の考え方は次のとおり。
  - 月探査技術の段階的な実現と科学探査、環境データ取得等を組み合わせて実施。
  - 2020年頃のロボット探査に先立って2015年頃に、まず月着陸を実現する目標を設定。また、2020年頃以降には、さらに高度なロボット探査や探査拠点の拡充などを目指し、2025年頃までの目標を想定。

## 2. 月探査ラフシナリオ案

## 2. ラフシナリオ案(1/4)

### I 案 ～2020年頃に、月の石を地球に持ち帰る～

#### 【2015年頃 月表側への軟着陸の実現】

- 日本で初めて月の表側に小型の探査機で軟着陸を実現。探査ロボットで大規模クレータ内部を移動探査し、岩石を採取。その場で予備的な地質探査を実施。
- 数W級の観測機器群の数ヶ月にわたる連続観測実験を行い、予備的な内部構造探査や月面環境調査を行う。

#### 【2020年頃 月の表側への往還の実現と、月の石を地球に持ち帰る】

- 探査機により月の表側の大規模クレータ(特に一番新しい地形)への往還を実現。自律・遠隔制御ロボットで月の石を採取し、地球に持ち帰る(サンプルリターン)。
- 数十W級の観測機器群(地震計、熱流量計等)の1年間にわたる連続観測を行う。  
⇒内部構造探査のために地震や熱流量等の約1年間の連続観測は行うものの、ローバ等による着陸探査活動は昼の期間に限定される。再利用する「探査拠点」の構築は目指さない。月の新しい地域の岩石を地球に持ち帰って年代分析や結晶構造の精密分析することにより、月の地殻が最終的にいつ頃どのようにできたかを解明する。

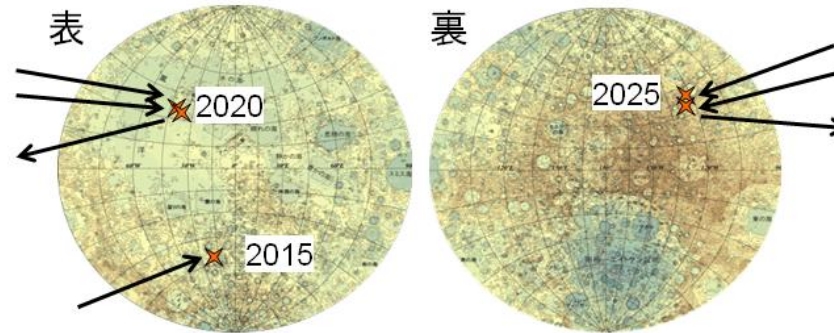
#### 【2025年頃 月の裏側への往還の実現と、月の裏側の石を地球に持ち帰る】

- 2025年頃に、世界で初めて月の裏側の高地への往還を実現し、月の裏側からのサンプルリターンを実施する。通信中継衛星を経由して探査ロボットなどの遠隔制御を行う。
- 100W級の観測機器群(地震計、熱流量計、ダストモニタ等)の一年以上にわたる連続観測を行う。  
⇒マグマの海から最初に地殻が形成されたと言われる月の裏側の高地にある岩石を地球に持ち帰って精密分析することにより、月が誕生した直後における月の地殻の様子を解明する。

## 2. ラフシナリオ案(2/4)

### I 案 ～2020年頃に、月の石を地球に持ち帰る～

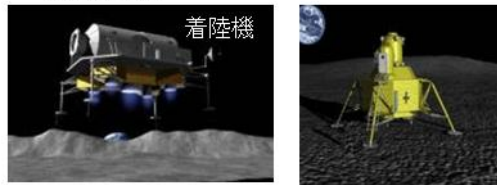
#### 【着陸地点イメージ案】



「かぐやが見た月の地形」(画像: 国立天文台/国土地理院/JAXA)を基に処理。

#### 【2020年の活動イメージ】

1. 探査目標地点になるべく近い、安全な場所に着陸。

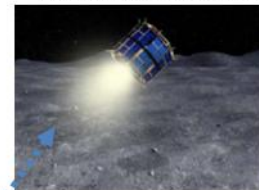


探査ロボット  
一次分析装置

サンプル回収機

2回に分けて着陸

4. さらに特徴的サンプルを選別採取して離陸。



5. サンプルを回収

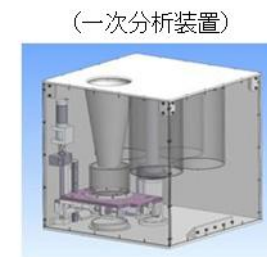
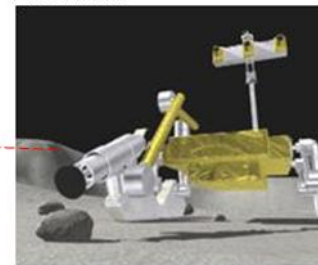
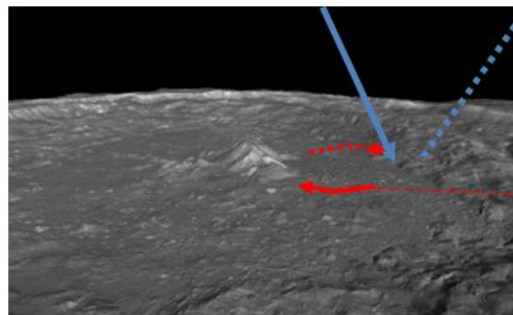


#### 地上での詳細分析

地上の設備にて、  
岩石サンプルの  
年代測定

月の地殻形成の  
年代を正確に知  
ることができる

2. 探査ロボットを使って、周辺を探索。特徴的な岩石を切断、研磨し、簡易分析。
3. 簡易分析した岩石サンプルを探査ロボットを使って、一次分析装置まで運び、一次分析(岩石サンプルを自動切断、研磨、顕微鏡観測、分光観測)を実施。



## 2. ラフシナリオ案(3/4)

### Ⅱ案 ～2020年頃に、探査拠点を構築する～

#### 【2015年頃 月表側への軟着陸の実現】

- 日本で初めて月の表側に小型の探査機で軟着陸を実現。探査ロボットでクレータ内部を移動探査し、岩石を採取。その場で予備的な地質探査を実施。
- 数W級の観測機器群の数ヶ月にわたる連続観測実験を行い、予備的な内部構造探査や月面環境調査を行う。

#### 【2020年頃 月の極周辺に探査拠点を構築する】

- 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。探査拠点からエネルギー供給を受けて、数ヶ月間にわたり、長距離移動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。
- 1kW級のエネルギー供給システムにより多数の観測機器群(地震計、熱流量計、放射線計、ダストモニタ等)の数年間にわたる連続観測を行う。

⇒極周辺で数ヶ月間夏の間広範囲なその場探査を行い、地形と地質の分布を調査する。内部構造探査のために地震や熱流量等の数年間の継続観測を行う。また、天測望遠鏡等の大規模観測装置も、日照率の高い地域を利用して実現可能。輸送能力の制約上、集めた岩石の持ち帰りは2025年頃を目指す。

科学探査拠点を構築し、拠点を基に活動を実施する場合には、探査ロボット(ローバ)や観測装置等に供給するためのエネルギー確保が大変重要となる。月の極周辺では、地球の白夜のように、連続した日照を確保可能なため、太陽電池による高効率発電システム等を用い、継続的な電力確保が比較的行いやすい。このため、探査拠点構築等は極周辺が適している。

#### 【2025年頃 探査拠点を活用した発展的探査と、月の極周辺への往還の実現】

- 探査拠点を活用したより広範囲な探査など、発展的探査を実現する。裏側の南極エイトケン盆地に探査機を軟着陸させ、通信中継衛星を経由して、遠隔制御する探査ロボットにより、長期にわたり月の裏側の岩石を採取、分析装置のある探査拠点に持ち帰って分析を行う。数kW級のエネルギー供給システムや、より高度な分析装置の設置などにより、探査拠点の機能拡充を行う。また、極周辺の探査拠点近傍への往還を実現する。サンプル回収機(帰還機)を探査拠点近傍に軟着陸させ、それまでに集められた岩石を積み込んで地球に持ち帰る。
- 探査機を着陸させた南極エイトケン盆地にて、100W級の観測機器群(地震計、熱流量計、ダストモニタ等)の一年以上にわたる連続観測を行う。同時に、極周辺の探査拠点では、エネルギー供給システム、観測機器群のメンテナンスを行い1年以上にわたる連続観測を行う。

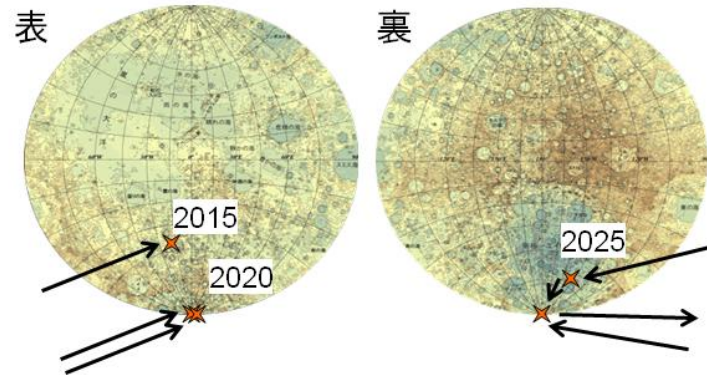
⇒2020年頃に構築した探査拠点を再利用し、大きな隕石の衝突により月の深い部分の物質が噴出している南極エイトケン盆地を探査し、内部の物質が何であるかを解明する。一部の岩石については、地球に持ち帰って精密分析することにより、月の地殻がいつ頃どのように形成されていったのかを解明する。



## 2. ラフシナリオ案(4/4)

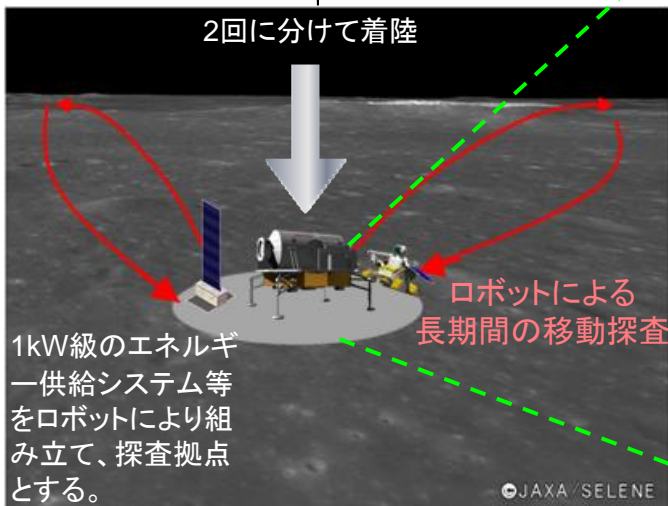
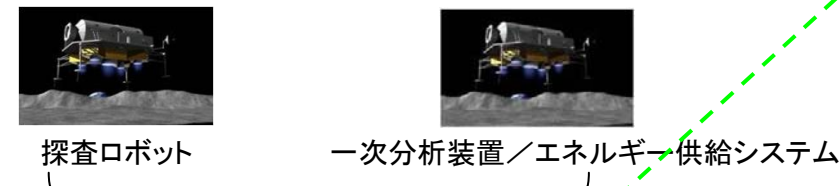
Ⅱ案～2020年頃に、探査拠点を構築する～

【着陸地点イメージ案】

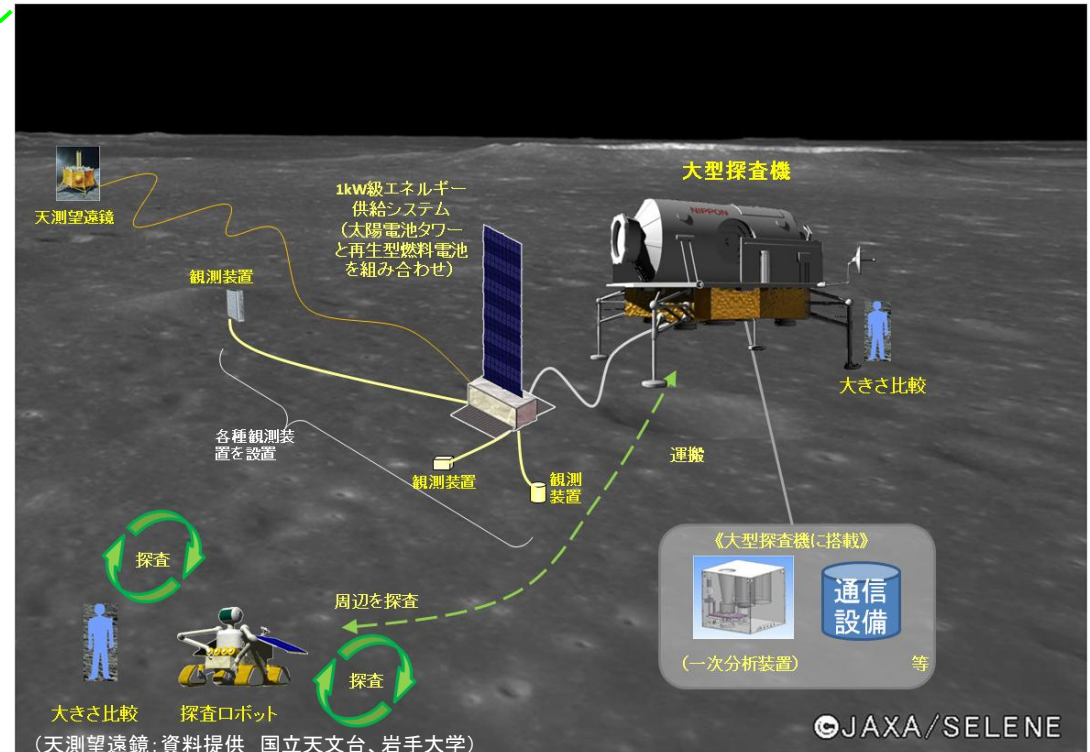


「かぐやが見た月の地形」(画像: 国立天文台/国土地理院/JAXA)を基に処理。

【2020年の活動イメージ】



※イメージ案



(天測望遠鏡: 資料提供 国立天文台、岩手大学)

©JAXA/SELENE

## 2. 月探査のラフシナリオ案【I案】

2010年

2015年頃

2020年頃

2025年頃

20XX年頃

月表側への軟着陸の実現

月の表側への往還の実現と、  
月の石を地球に持ち帰る

月の裏側への往還の実現と、  
月の裏側の石を地球に持ち帰る

《表側の大規模クレータ 内部》

《表側の大規模クレータ内部》

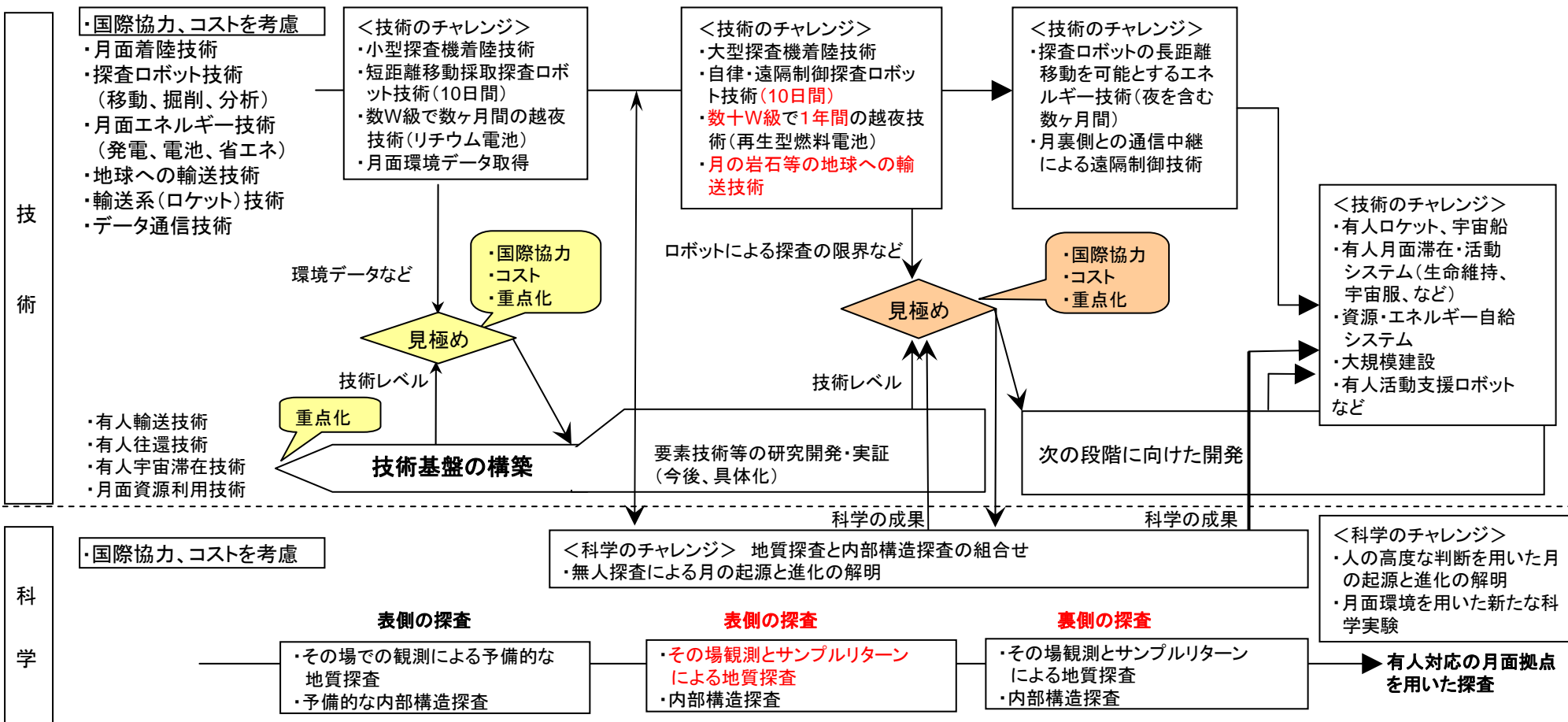
《裏側の高地》

- ・小型探査機軟着陸
- ・探査ロボットの移動・採取試験

- ・大型探査機軟着陸とサンプル回収機による地球への帰還
- ・自律・遠隔制御探査ロボットで岩石採取

- ・月の裏側への往還
- ・数ヶ月移動探査、月裏側での岩石採取

- ・有人対応の科学探査拠点建設
- ・人とロボットの連携による本格的な探査



## 2. 月探査のラフシナリオ案【Ⅱ案】

2010年

2015年頃

2020年頃

2025年頃

20XX年頃

月表側への軟着陸の実現

月の極周辺に探査拠点を構築する

探査拠点を活用した発展的探査と、月の極周辺への往還の実現

《表側の大規模クレータ 内部》

《南極周辺のクレータリムなどの高台(日照時間の長い所)》

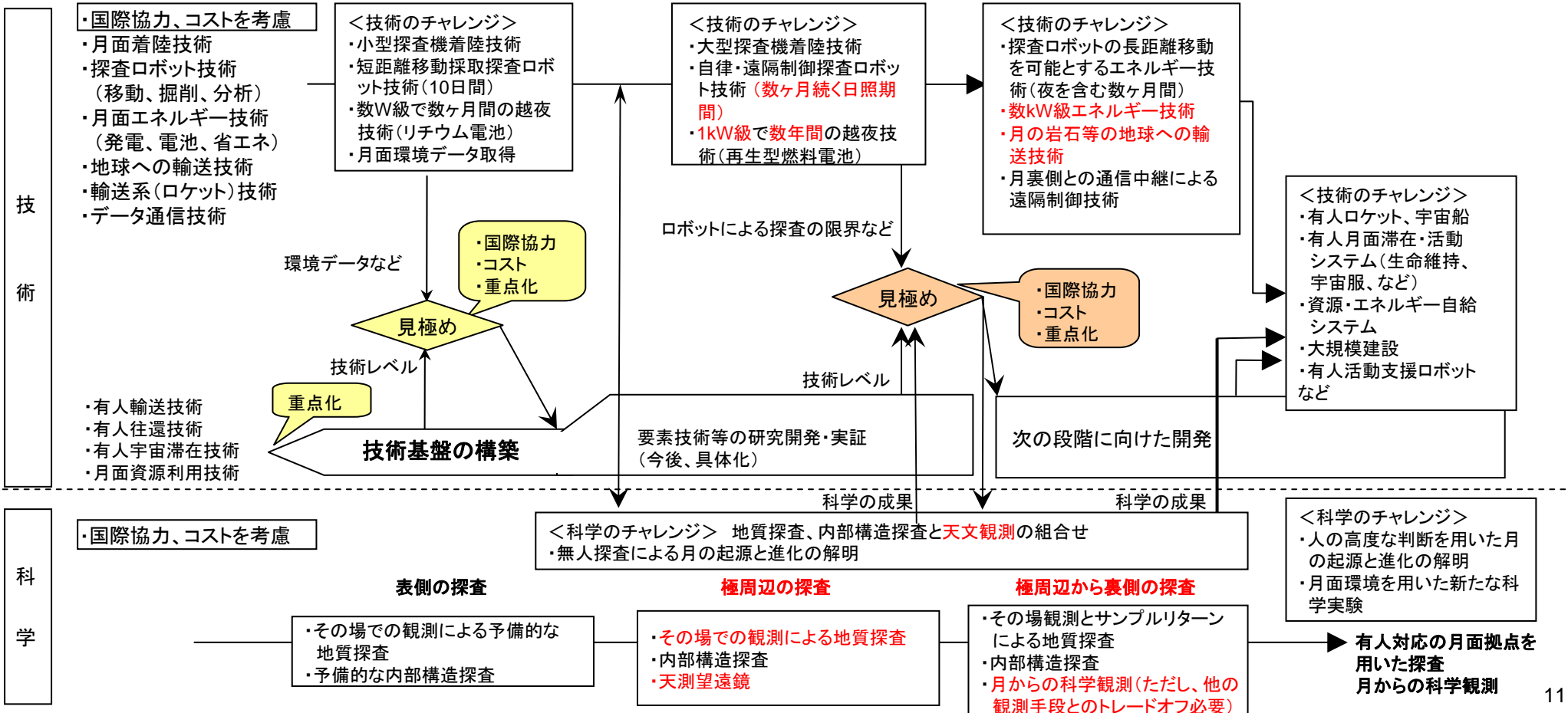
《南極周辺の盆地》

- ・小型探査機軟着陸
- ・探査ロボットの移動・採取試験

- ・大型探査機軟着陸
- ・ロボットによる探査拠点(1kW級エネルギー供給等)の組立
- ・ロボットによる長期間移動探査

- ・数ヶ月移動探査、月裏側での岩石採取
- ・探査拠点の拡充(数kW級)
- ・サンプル回収機による地球への帰還

- ・有人対応の科学探査拠点建設
- ・人とロボットの連携による本格的な探査



blank page

### 3. 第一段階(2020年頃まで)の具体的探査計画案

#### 【I案】

～2020年頃に、月の石を地球に持ち帰る～

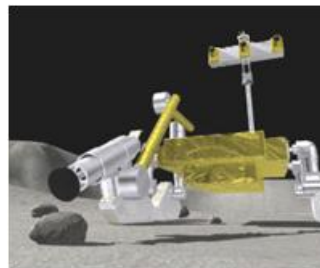
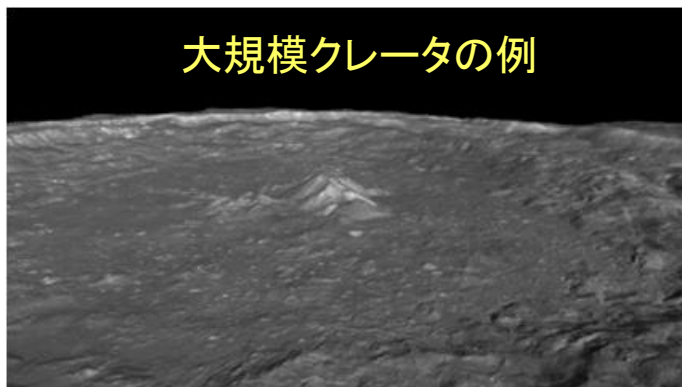
# 2015年頃 月の表側への軟着陸の実現(1)【I案】

月に軟着陸し、探査ロボットにより岩石等を採取し、その場観測による科学観測と月面環境の計測を行う。これを実現するために、H2Aクラスのロケット1機分相当の月面への輸送が必要。

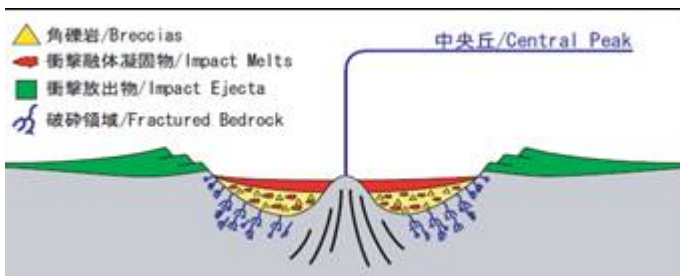
## 科学観測目標

《地質探査(アプローチA)の観点から》

大規模クレータの中央にできる丘は、地下からの噴出物質(マントル)が露出しており、地殻形成の解明に有効なサンプルの結晶構造を解析して、マントルを構成する岩石の種類が何か分かる。



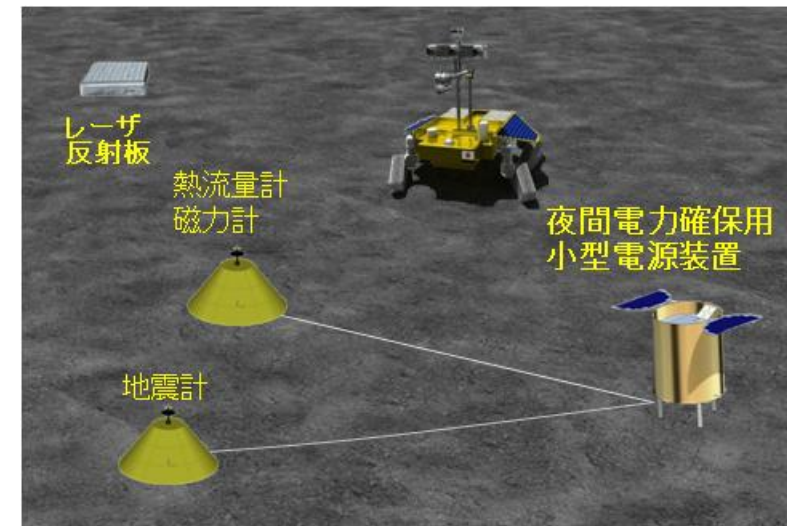
探査ロボットを使って岩石を採取し、切断、研磨などの簡易処理をして内部組織分析や成分分析を行う。



《内部構造探査(アプローチB)の観点から》

月の内部構造を調べるため、地震計、熱流量計、磁力計等を着陸地点(表側大規模クレータ)に設置して観測する。月全体の内部構造を推定するためには最低3点以上の観測が必要であるが、観測手法の実証を目的とし、1箇所でデータを取得する。

数ヶ月以上の長期観測が必要であるので、越夜電源システムが必要となる。



※イメージ案

# 2015年頃 月の表側への軟着陸の実現(2)【I案】

## 月面環境計測

月面の放射線、レゴリスダストの振る舞い、地盤などの計測を行う。場所による依存性は少ないと考えられており、これらの観測データは他の地域の探査においても役立つ。

## 着陸地点と必要な技術

着陸地点：月表側の大規模クレータ(\*)内部。

技術開発：クレータ内部に安全に着陸する、高精度着陸、障害物回避技術

着陸地点から移動しながら周辺を探査する探査ロボット技術(10日間)

夜を越して数ヶ月の観測を可能とする、省エネルギー保温技術、小型高効率電池技術

(\*)地下からの噴出物質が露出している中央丘がある。具体的なクレータ及び着陸地点については、「かぐや」の観測データや技術的難易度等を考慮して、今後絞り込む。

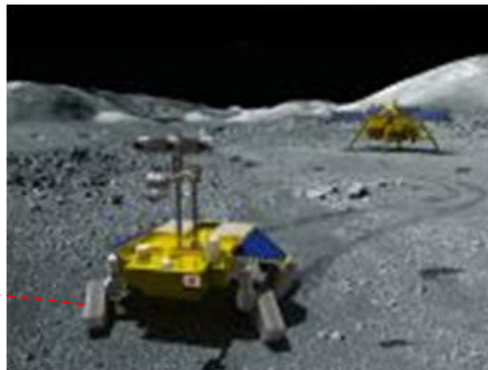
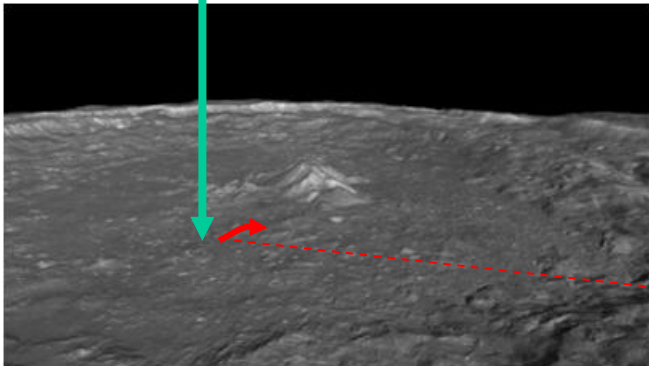


観測に適した地点へ100m程度の精度で着陸を行う。

…この技術は、将来の月面拠点建設に向けて、既存の設備のすぐ近くに着陸するためには必須である。

探査ロボットを使って、数百m程度移動しながら、岩石を採取・観測する。

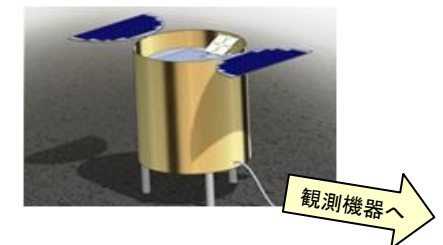
…この技術は、将来の月面拠点建設に向けた建設作業や広域探査に必須である。



※イメージ案

観測機器の低消費電力化と徹底した断熱設計により、数Wの電力で越夜可能とする。200Wh/kg級高効率リチウムイオン電池により、地震計等を数ヶ月間運用可能とする。

…この技術は、将来の大規模探査においても、小型観測装置や着陸誘導用ビーコンなどの電源として有用である。



# 2020年頃 月の表側への往還の実現と、月の石を地球に持ち帰る(1)【I案】

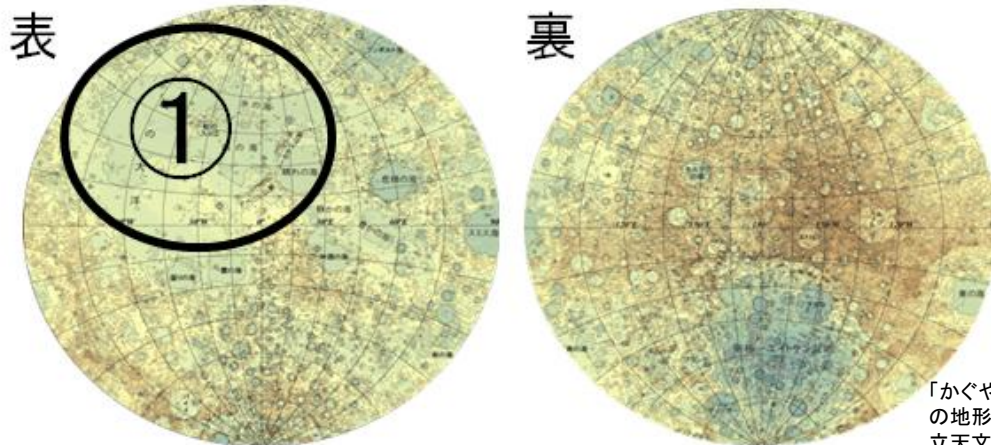
探査ロボットを用いて岩石サンプルの採取とその場での一次分析を行い、有用な岩石サンプルを地上へ持ち帰る。探査ロボット、一次分析装置、月面離陸装置を基幹ロケット大重量級2機分相当の輸送が必要。

## 科学観測目標

《地質探査(アプローチA)の観点から》

岩石の一次分析では、内部組織の観察や主成分分析から、岩石の種類は特定できるが、岩石の年代分析は大規模な測定装置が必要となるため、岩石サンプルを地球に持ち帰って分析することにより、月の地殻形成の年代を正確に知ることができる。特に、月で最も新しい岩石を採取するための探査を行う。

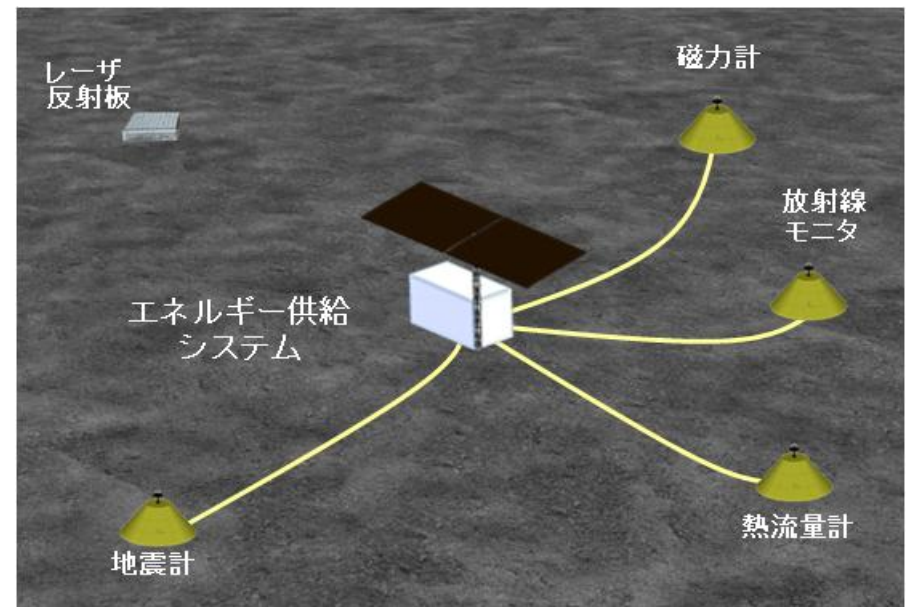
①マグマの海が最後まで溶けて残っていたと言われる地域の大規模クレーターの中央丘は、比較的新しい地殻が露出しており、月の地殻形成のうち、後期段階の様子を知ることができる。



「かぐやが見た月の地形」(画像:国立天文台/国土地理院/JAXA)を基に処理。

《内部構造探査(アプローチB)の観点から》

月の内部構造を調べるため、地震計、熱流量計、磁力計等を着陸地点(表側大規模クレータ)に設置して観測する。多地点での観測が必要なことから、2015年の観測地点と離れていることが望ましい。この頃は、世界各国の探査機が月面に着陸していると考えられるので、諸外国との協力により観測点数を増やし、月の構造の解明を行う。



※イメージ案



# 2020年頃 月の表側への往還の実現と、月の石を地球に持ち帰る(2)【I案】

## 着陸地点と必要な技術

着陸地点: 月表側の最も新しくできたとされる地域のクレータ(\*)内部。

技術開発: 大型探査機を着陸させるための大型可変推力エンジン

遠隔操作と自律機能を組み合わせたロボットにより、周辺の岩石を集め、一次分析装置まで運ぶ探査ロボット技術 (10日間)

採取したサンプルを自動で処理、一次分析(切断、研磨、顕微鏡観測、分光観測)などを行う技術(10日間)

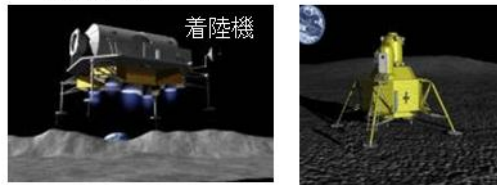
数十W級の観測装置が夜を越して1年間の動作を可能とする、再生型燃料電池等の技術

(ただし、夜間は発電ができないため運用は限定的)

岩石サンプル等の地球への輸送技術、大気圏再突入技術

(\*)地下からの噴出物質が露出している中央丘がある。具体的なクレータについては、「かぐや」の観測データや技術的難易度等を考慮して、今後絞り込む。

1. 探査目標地点になるべく近い、安全な場所に着陸。

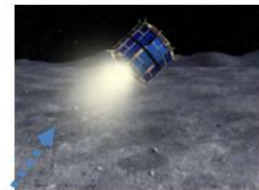


探査ロボット  
一次分析装置

サンプル回収機

2回に分けて着陸

4. さらに特徴的サンプルを選別採取して離陸。



5. サンプルを回収

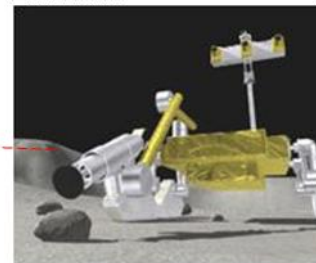


地上での詳細分析

地上の設備にて、  
岩石サンプルの  
年代測定

月の地殻形成の  
年代を正確に知  
ることができる

2. 探査ロボットを使って、  
周辺を探索。特徴的  
な岩石を切断、研磨し、  
簡易分析。



3. 簡易分析した岩石サンプルを探査ロ  
ボットを使って、一次分析装置まで運び、  
一次分析(岩石サンプルを自動切断、  
研磨、顕微鏡観測、分光観測)を実施。

(一次分析装置)



# 2025年頃 月の裏側への往還の実現と、月の裏側の石を地球に持ち帰る(1)【I案】

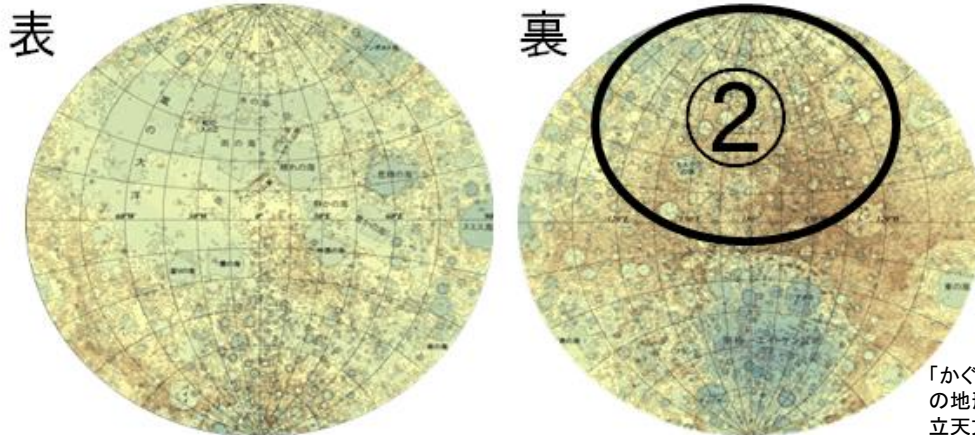
月の裏側に着陸し、探査ロボットを用いて月の裏側からの岩石サンプルを地上へ持ち帰る。探査ロボット、一次分析装置、月面離陸装置、通信中継衛星を基幹ロケット大重量級3機分相当の輸送が必要。

## 科学観測目標

### 《地質探査(アプローチA)の観点から》

これまでの米口の探査でも、月の裏側からの岩石は持ち帰られていない。人類としては初めて、月の裏側からの岩石サンプルを地球に持ち帰って分析することにより、月の地殻形成の様子を知ることができる。特に、月の裏側から、月でもっとも古い岩石などを採取することで、月誕生直後の地殻形成の初期段階の様子を知ることができる。

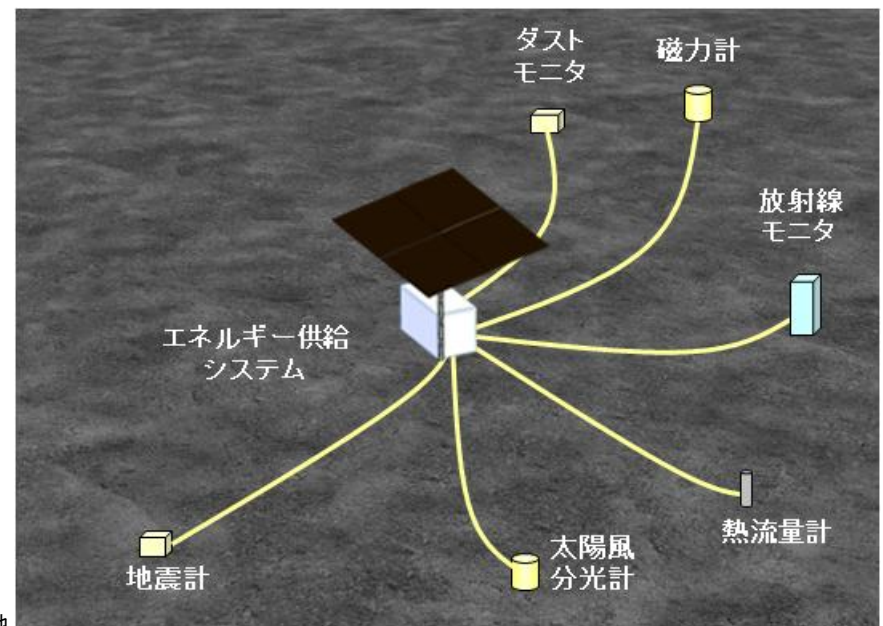
②マグマの海から最初に地殻が形成されたと言われる月の裏側の高地は、月誕生直後の地殻形成の初期段階の様子を知ることができる。



「かぐやが見た月の地形」(画像:国立天文台/国土地理院/JAXA)を基に処理。

### 《内部構造探査(アプローチB)の観点から》

月の内部構造を調べるため、地震計、熱流量計、磁力計等を着陸地点(裏側高地)に設置して観測する。この頃は、世界各国の探査機が月面に着陸していると考えられるので、諸外国との協力により観測点数を増やし、月の構造の解明を行う。



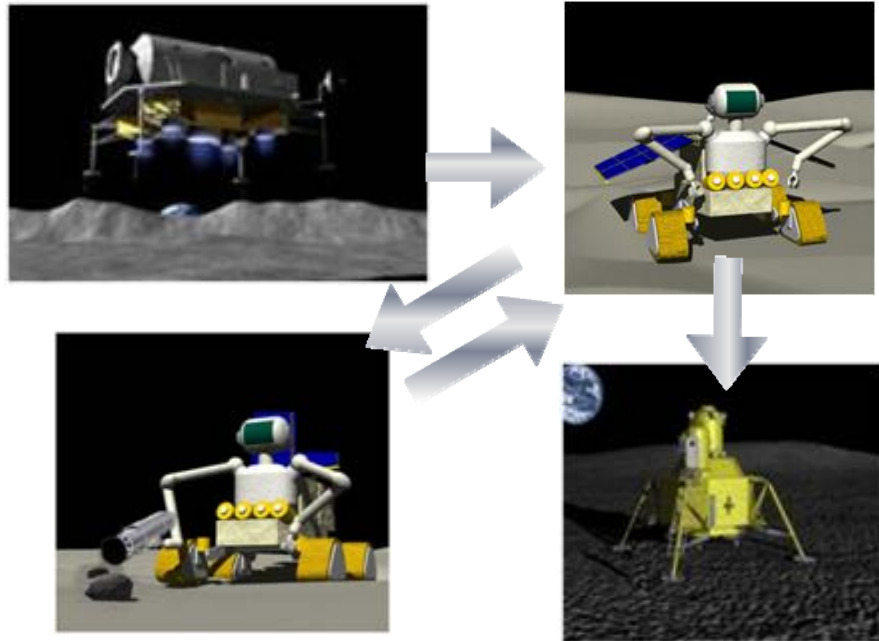
※イメージ案

# 2025年頃 月の裏側への往還の実現と、月の裏側の石を地球に持ち帰る(2)【I案】

## 着陸地点と必要な技術

着陸地点: 月の裏側の高地

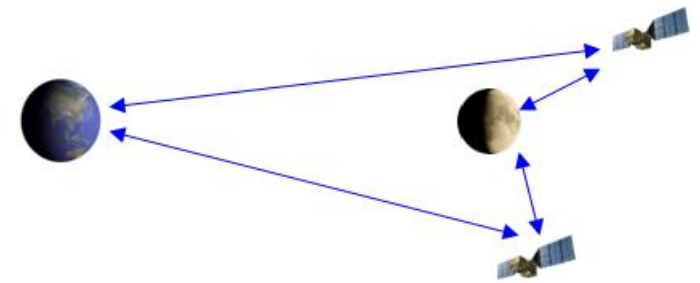
技術開発: 探査ロボットを遠隔操作するための月裏側との通信中継技術  
探査ロボットが夜を含む数ヶ月間継続して移動探査するためのエネルギー供給技術



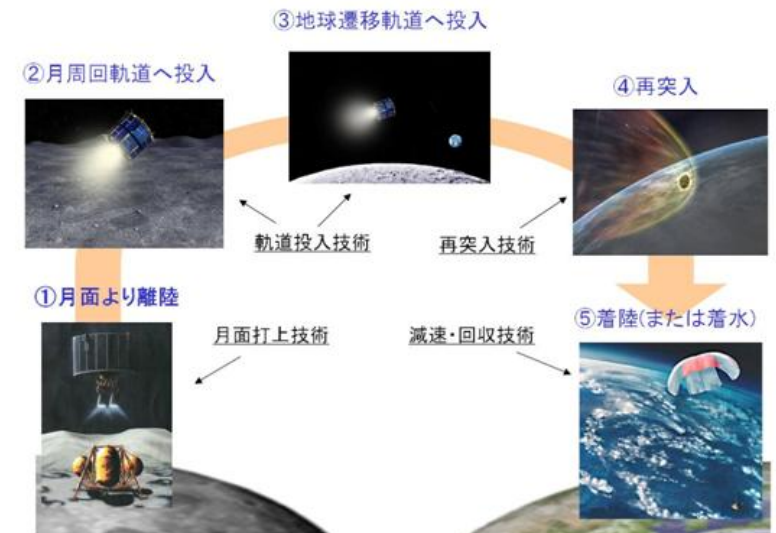
月の裏側の高地に着陸して岩石サンプルを採取し、サンプル回収機に回収

## 〔通信中継システム〕

数機の通信中継衛星を月周回軌道に配置し、月裏側からでも常時地球と通信が可能にする。



## 〔サンプルリターン〕



※各図はイメージ案

blank page

## 4. 第一段階(2020年頃まで)の具体的探査計画案

### 【Ⅱ案】

～2020年頃に、探査拠点を構築する～

# 2015年頃 月の表側への軟着陸の実現(1)【Ⅱ案】

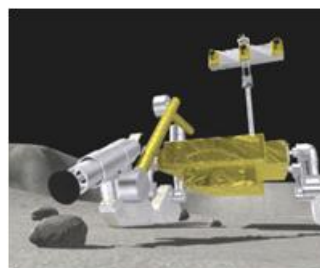
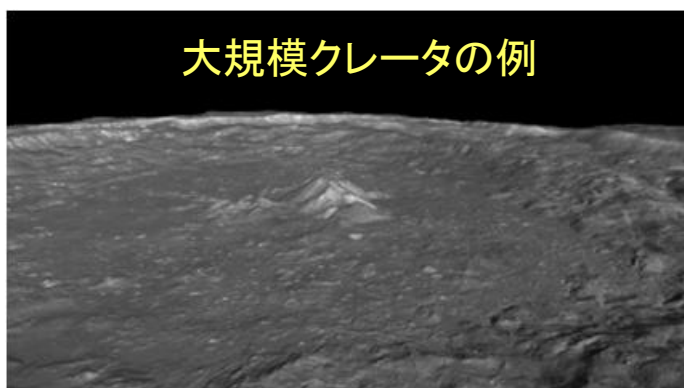
I案と同じ

月に軟着陸し、探査ロボットにより岩石等を採取し、その場観測による科学観測と月面環境の計測を行う。これを実現するために、H2Aクラスのロケット1機分相当の月面への輸送が必要。

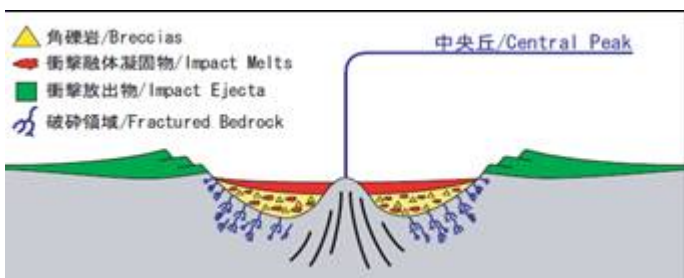
## 科学観測目標

《地質探査(アプローチA)の観点から》

大規模クレータの中央にできる丘は、地下からの噴出物質(マントル)が露出しており、地殻形成の解明に有効なサンプルの結晶構造を解析して、マントルを構成する岩石の種類が何か分かる。



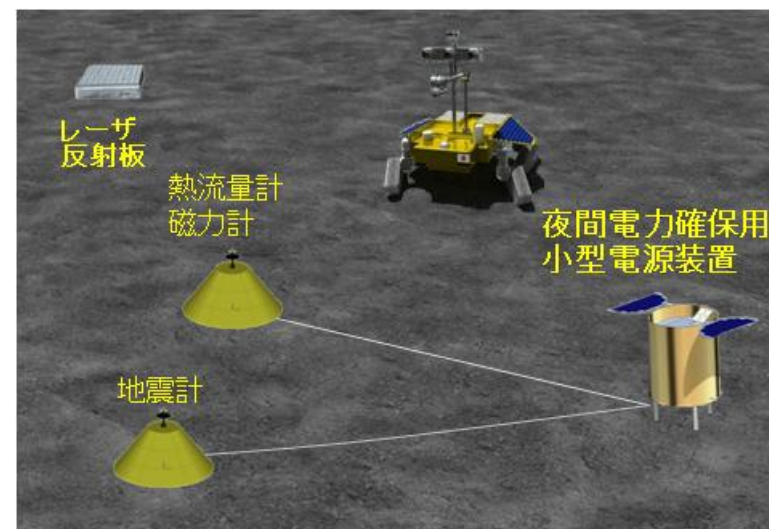
探査ロボットを使って岩石を採取し、切断、研磨などの簡易処理をして内部組織分析や成分分析を行う。



《内部構造探査(アプローチB)の観点から》

月の内部構造を調べるため、地震計、熱流量計、磁力計等を着陸地点(表側大規模クレータ)に設置して観測する。月全体の内部構造を推定するためには最低3点以上の観測が必要であるが、観測手法の実証を目的とし、1箇所でデータを取得する。

数ヶ月以上の長期観測が必要であるので、越夜電源システムが必要となる。



※イメージ案

## 月面環境計測

月面の放射線、レゴリスダストの振る舞い、地盤などの計測を行う。場所による依存性は少ないと考えられており、これらの観測データは他の地域の探査においても役立つ。

## 着陸地点と必要な技術

着陸地点：月表側の大規模クレータ(\*)内部。

技術開発：クレータ内部に安全に着陸する、高精度着陸、障害物回避技術

着陸地点から移動しながら周辺を探査する探査ロボット技術(10日間)

夜を越して数ヶ月の観測を可能とする、省エネルギー保温技術、小型高効率電池技術

(\*)地下からの噴出物質が露出している中央丘がある。具体的なクレータ及び着陸地点については、「かぐや」の観測データや技術的難易度等を考慮して、今後絞り込む。

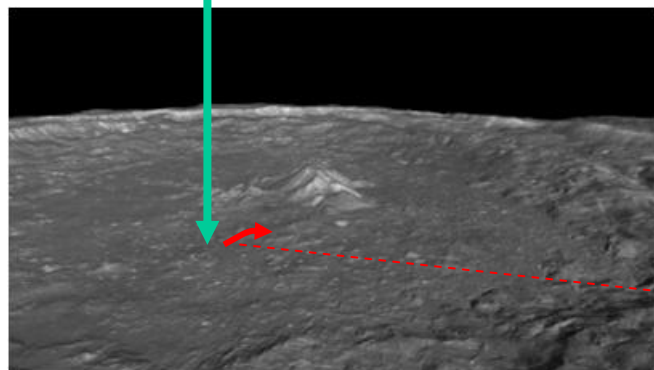


観測に適した地点へ100m程度の精度で着陸を行う。

…この技術は、将来の月面拠点建設に向けて、既存の設備のすぐ近くに着陸するためには必須である。

探査ロボットを使って、数百m程度移動しながら、岩石を採取・観測する。

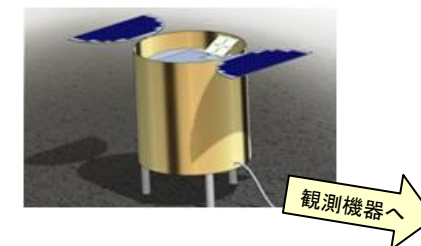
…この技術は、将来の月面拠点建設に向けた建設作業や広域探査に必須である。



※イメージ案

観測機器の低消費電力化と徹底した断熱設計により、数Wの電力で越夜可能とする。200Wh/kg級高効率リチウムイオン電池により、地震計等を数ヶ月間運用可能とする。

…この技術は、将来の大規模探査においても、小型観測装置や着陸誘導用ビーコンなどの電源として有用である。



# 2020年頃 月の極周辺に探査拠点を構築する(1)【Ⅱ案】

月の南極周辺に、探査ロボットを用いて科学観測拠点を設置し、豊富な電力を確保することにより、周辺の岩石サンプルの採取と一次分析を長期間にわたって行う。探査ロボットと、エネルギー供給システム、一次分析装置を基幹ロケット大重量級2機分相当の輸送が必要。

## 科学観測目標

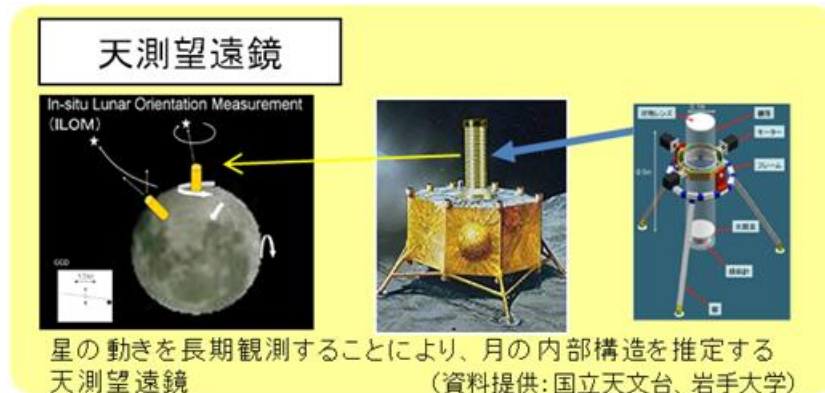
※各図はイメージ案

### 《地質探査(アプローチA)の観点から》

極地域には、海の多い表側と高地の多い裏側の境界領域であり、両者の岩石を観測できる可能性があるとともに、日照時間の長い高台では、数ヶ月程度の長期観測、活動が可能である。極周辺の長期にわたるその場観測により、極周辺の岩石の内部組織の観察や主成分分析などの質的量的向上をはかり、新たな発見につなげる。

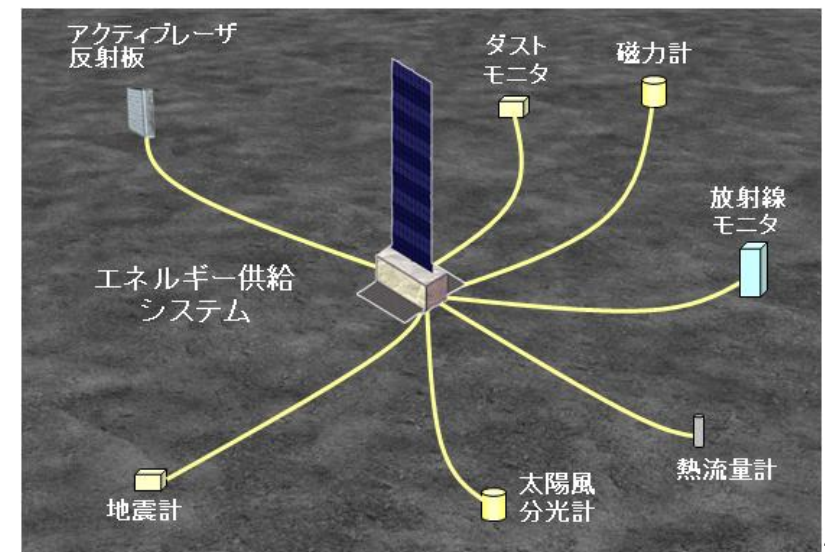
### 《内部構造探査(アプローチB) & 天文観測(アプローチC)の観点から》

月面上から天体を観測し、その見える方向から月の運動を精密測定する天測望遠鏡を設置する。



### 《内部構造探査(アプローチB)の観点から》

月の内部構造を調べるため、地震計、熱流量計、磁力計等を着陸地点(極周辺)に設置して観測する。また電力が豊富であるため、ダストモニタや放射線モニタ等も設置できる。この頃は、世界各国の探査機が月面に着陸していると考えられるので、諸外国との協力により観測点数を増やし、月の構造の解明を行う。



※イメージ案



# 2020年頃 月の極周辺に探査拠点を構築する(2)【Ⅱ案】

## 着陸地点と必要な技術

着陸地点:南極周辺のクレータリムなどの高台(日照時間の長い領域)

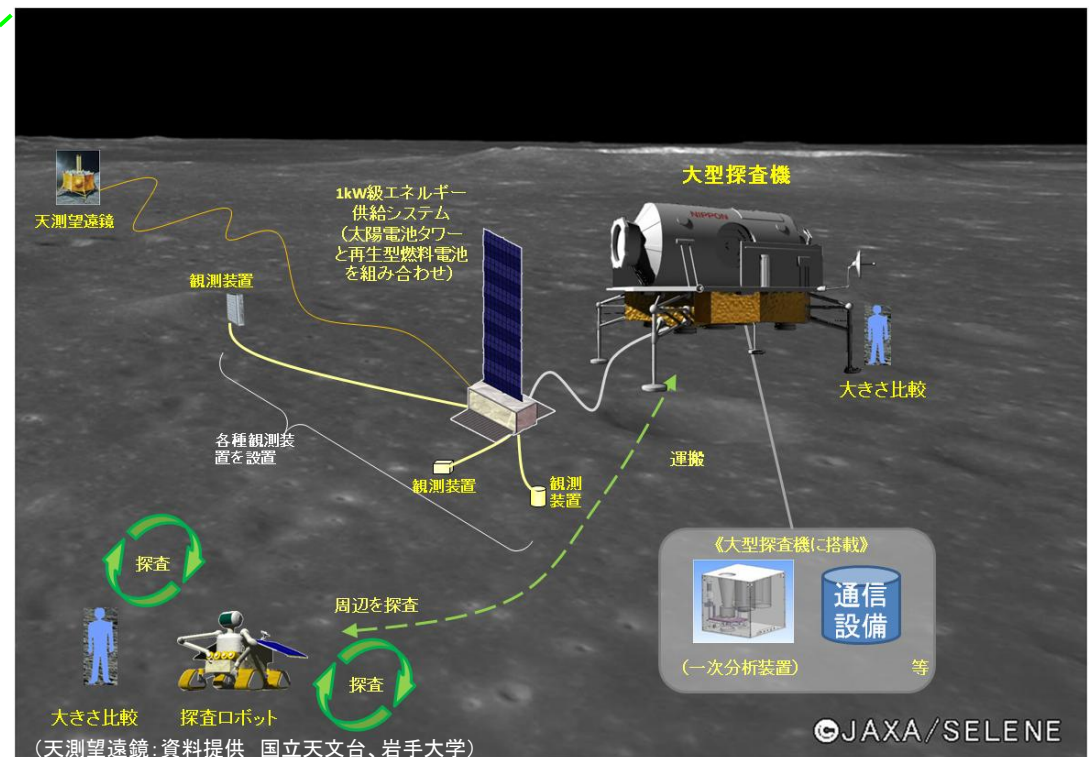
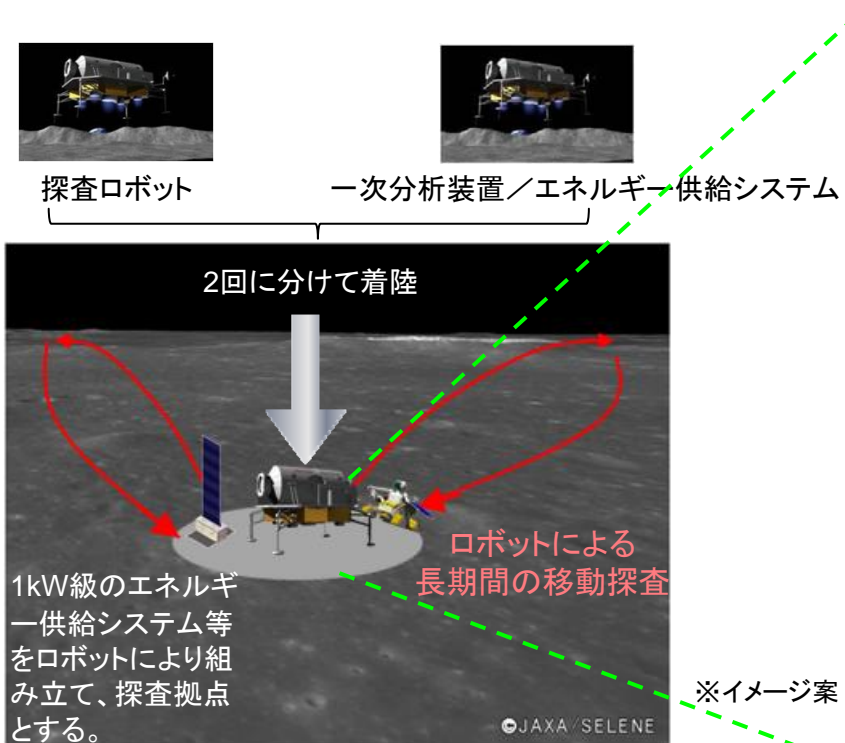
技術開発:大型探査機を着陸させるための大型可変推力エンジン

遠隔操作と自律機能を組み合わせたロボットにより、地球の白夜のように数ヶ月続く日照期間(夏期)にわたり、拠点を中心に周辺の岩石を集め、一次分析装置まで運ぶ探査ロボット技術(日照期間の合間(夜)の数日間(冬期)は活動を休止)

採取したサンプルを自動で処理、一次分析(切断、研磨、顕微鏡観測、分光観測)などを行う技術(数年間)

探査ロボットによる拠点組み立て技術

地震計、熱流量計等の観測機器群と探査ロボット、一次分析装置などが数年間稼動するための1kW級エネルギー供給システム(再生型燃料電池)の構築



# 2025年頃 探査拠点を活用した発展的探査と、月の極周辺への往還の実現(1)【Ⅱ案】

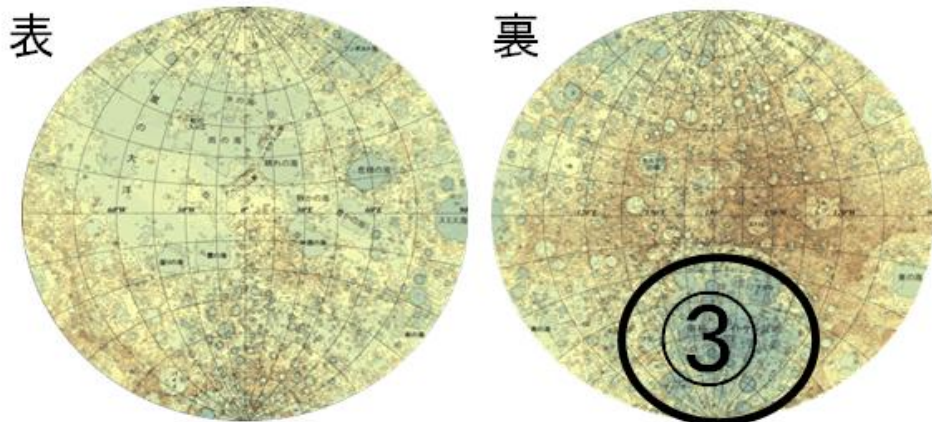
2020年頃に構築した拠点と探査ロボットを用いて継続して広範囲に探査を行い、岩石サンプルを収集・運搬・分析・保管を行う。月の裏側の南極エイトケン盆地に着陸し、長期間(夜を含む数ヶ月)にわたり探査ロボットを用いて岩石サンプルを採取し、拠点まで運び、極域の探査拠点の数kW級のエネルギー供給システムを利用し、高度化した分析装置で分析する。特徴のある岩石を選別し地上へ持ち帰る。探査ロボット、月面離陸装置、通信中継衛星を基幹ロケット大重量級3機分相当の輸送が必要。

## 科学観測目標

《地質探査(アプローチA)の観点から》

これまでの米口の探査でも、月の裏側からの岩石は持ち帰られていない。人類としては初めて、月の裏側からの岩石サンプルを地球に持ち帰って分析することにより、月の地殻形成の様子を知ることができる。特に、月の裏側の大規模衝突クレータである南極エイトケン盆地から岩石などを採取することで、月の深部のマントルや下部の地殻の様子を知ることができる。

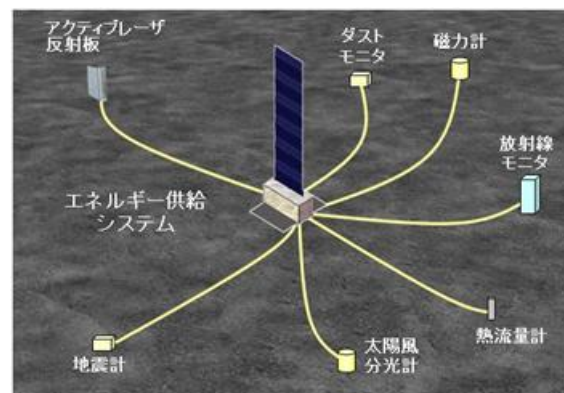
③大きな隕石の衝突により深部の物質が噴出している月の裏側の南極エイトケン盆地では、月の深部のマントルや下部の地殻の様子を知ることができる。この地域の物質を調べることにより、地殻形成のプロセスや内部物質を解明する。



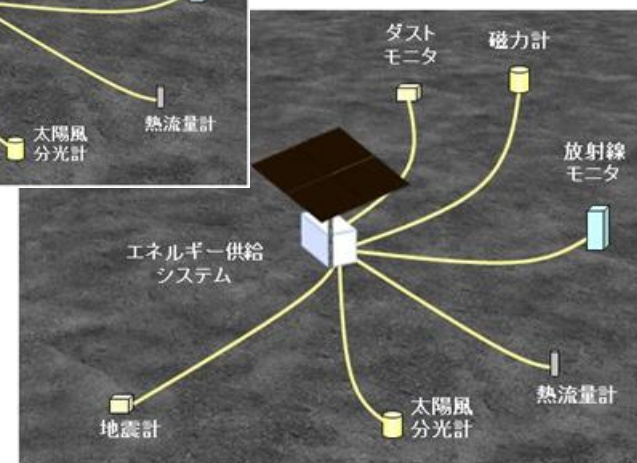
「かぐやが見た月の地形」(画像:国立天文台/国土地理院/JAXA)を基に処理。

《内部構造探査(アプローチB)の観点から》

月の内部構造を調べるため、地震計、熱流量計、磁力計等を着陸地点(南極エイトケン盆地)に設置して観測する。この頃は、世界各国の探査機が月面に着陸していると考えられるので、諸外国との協力により観測点数を増やし、月の構造の解明を行う。



探査拠点では2020年頃に設置したエネルギー供給システムをメンテナンス・再利用



南極エイトケン盆地にも観測機器を設置

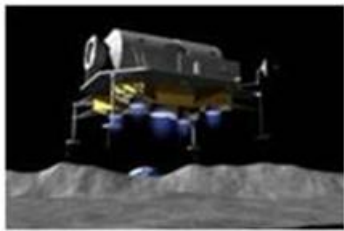
※イメージ案

# 2025年頃 探査拠点を活用した発展的探査と、月の極周辺への往還の実現(2)【Ⅱ案】

## 着陸地点と必要な技術

着陸地点： 南極周辺～南極エイトケン盆地

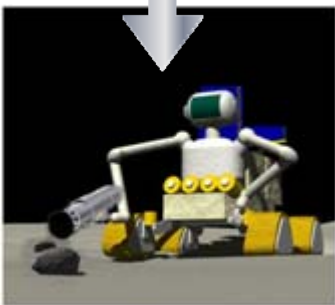
技術開発： 探査ロボットを遠隔操作するための月裏側との通信中継技術  
 探査ロボットが拠点以外の地域で、夜を含む数ヶ月間継続して移動探査するためのエネルギー供給技術  
 岩石サンプル等の地球への輸送技術、大気圏再突入技術  
 数kw級のエネルギー供給システム、及びそれを活用した高度な分析装置などの技術



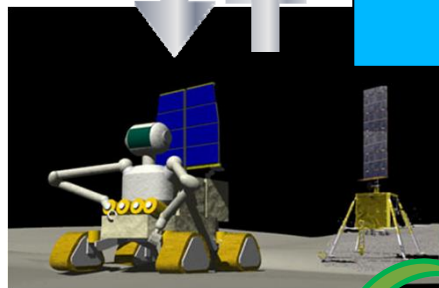
南極エイトケン盆地に着陸



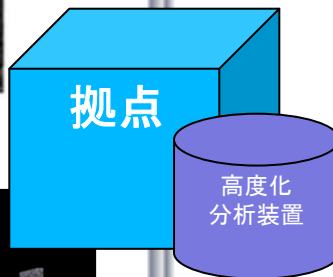
探査拠点に着陸



探査ロボットにより  
岩石サンプルの採取



南極の探査拠点へ輸送。拠点のエネルギー供給システム、分析装置を活用して分析した後、一部の石はサンプル回収機に積み込む。

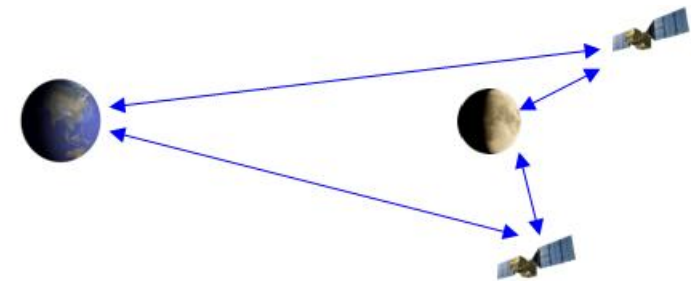


2020年頃以降、継続して周辺を探査し、採取しておいた岩石を積み込む。

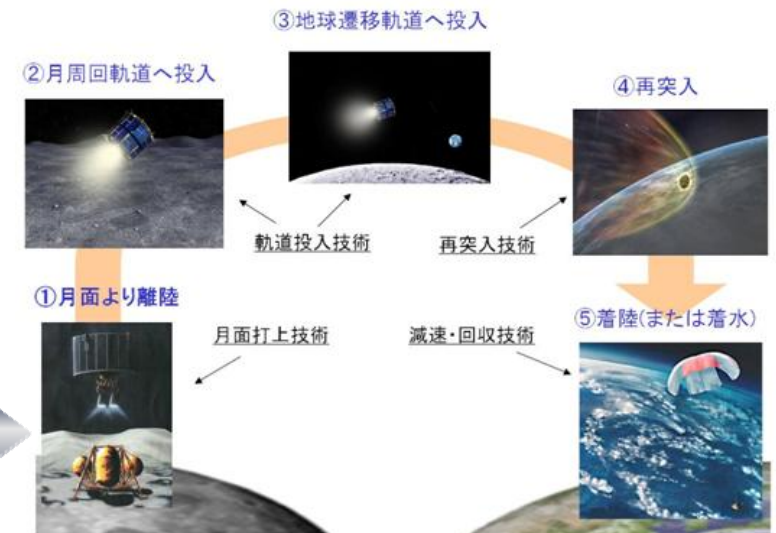
地球へ

## 〔通信中継システム〕

数機の通信中継衛星を月周回軌道に配置し、月裏側からでも常時地球と通信が可能にする。



## 〔サンプルリターン〕



※イメージ案

## 5. 技術的課題

- ◆ 全体ラフシナリオ案で示した、月探査における必要な技術は以下のように分類することができる。
  - 世界的には既にも実現されている技術であり、外国の後追いとなるが将来的に自立的な宇宙探査活動に必須の技術。
  - 世界的にも実現されていないが、我が国が先行している技術、民生技術等で高いポテンシャルを持っている技術など、いわゆる得意技術。
  - ☆ 世界的にも実現されておらず、我が国も海外と同等の技術レベルであり、挑戦する技術。
- ◆ 第一段階を実現するための技術を獲得していくことを技術開発の主目標とするとともに、適宜、その次の段階を見すえた技術開発を取り込んでいく。
- ◆ 次頁に月探査における必要な技術を分類。

# 第一段階の月着陸・探査の実現に必要な技術

- ◆ 月面着陸技術： 行きたいところに安全、確実に着陸する技術
  - 目標地点へ高精度にピンポイントで着陸する技術(○)
  - 障害物があったらそれを検出して避ける技術(☆)
  - 大型で精密制御可能なエンジンの開発(●)
- ◆ 探査ロボット技術： 表面を移動しながら作業する技術
  - 砂地、斜面、ダスト環境、高温・低温環境、放射線環境などに対応する技術(☆)
  - サンプル採取等の精密作業技術。(☆)
  - 構造物を設置する技術(☆)
  - 通信時間遅れ等の制約の下で、ロボットを遠隔制御する技術(○)
  - エネルギー確保等の制約の下で、移動ロボット(ローバ)を長距離移動・不整地走破する技術(●)
- ◆ 月面エネルギー技術： 2週間以上にわたる月の夜を越える技術※
  - 太陽電池による高効率発電システム(○)
  - 夜間電源技術(再生型燃料電池等)の開発(○)
  - 夜の低温から守る断熱設計、昼の高温にも耐えられる可変熱伝導(☆)
- ◆ 地球帰還技術： 物質のサンプルリターンに向けた技術
  - 月面から地球までの帰還機技術、誘導制御技術(●)
  - 大気圏再突入技術(●)
- ◆ 輸送系(ロケット)技術
  - 地球から月面まで探査機、観測機器等月探査に必要な物資を輸送する技術(●)
  - 基幹ロケットの輸送能力を向上化する技術(●)
- ◆ データ通信技術
  - 地球と月周回衛星を介しての月の裏側の機器(着陸機や探査ロボット等)とのデータを通信する技術(●)

《注記》末尾の●、○、☆は月探査における必要な技術の分類記号

## 6. 月・惑星探査に関する 海外の主な動向

## 6. 月・惑星探査に関する海外の主な動向(1/3)

(月探査に関する懇談会 第2回会合 資料1-2より抜粋し更新。)

### ○ 米国(NASA 米国航空宇宙局):

- ・ブッシュ政権では、新しい有人宇宙船の開発、有人での月再着陸、有人火星探査等を目標とする宇宙探査構想に基づく計画が進んでいた。オバマ政権では、探査構想の中核をなすNASAの有人宇宙飛行計画について「米国有有人宇宙飛行計画再検討委員会(Review of U.S. Human Space Flight Plans Committee)」を設置し、再検討を行った。スペースシャトル引退後の安全で革新的かつ適正な予算で持続可能な、有人宇宙飛行計画に関する選択肢等について検討し、2009年9月にサマリーレポートが、その後10月22日に最終報告書が公開された。
- ・上記までの米国の動向については、概ね以下括弧内のとおり。

- ・これまで、ブッシュ政権時代の宇宙探査構想に基づき、今後の探査計画について、国際宇宙探査協働グループ(ISECG: 16ページ参照)の枠組みに加え、ESA、JAXA等との協力に向けた2国間調整を行ってきた。
- ・これからのISS(国際宇宙ステーション)の利用計画の一つの柱として、ISSを将来の探査プログラムのための技術実証の場として利用することを構想中。
- ・有人月面拠点にむけた無人月探査として、2009年6月にLRO(ルナリコネッサンスオービター: 着陸地点の決定、資源調査、月環境調査)及びLCROSS(永久影域の氷の存在調査)の打上げを実施。南極域永久影で水の存在を確認。今後、LADEE(ダスト(塵)観測)及びGRAIL(重力場計測。着陸精度向上に貢献。)を予定(2011-12年頃)。
- ・ILN(国際月ネットワーク)構想(※)に、各国へ参加を呼びかけ、現在8機関が関心表明。  
※ 月面に6-8箇所の観測ポイントに観測機器(地震計や熱流計)を設置して科学観測を行うもの。  
8機関: ASI: 伊、BNSC: 英、CNES: 仏、CSA: 加、DLR: 独、ISRO: 印、JAXA: 日、KARI: 韓。左記のほかCNSA: 中もオブザーブ参加

### ○ 欧州(ESA 欧州宇宙機関):

- ・2030年頃の有人火星探査を最終目的とした「オーロラプログラム」の前段として、月への無人着陸機(MoonNext等)や有人月探査の検討を行っている。
- ・有人月探査に関しては、将来の有人宇宙飛行及び探査における欧州の役割を分析するためのシナリオ検討等が行われており、ISECGの枠組みにおいて積極的に活動中。また、NASAとの協力に向けた、2国間の話し合いも進めている。

### ○ 中国(CNSA 中国国家航天局):

- ・独自の月探査計画(嫦娥(じょうが)計画、有人月探査)を進めている。2007年に嫦娥1号の打ち上げ実施。2011年迄に嫦娥2号による月周回、2013年迄に月面着陸、2017年に月面サンプル回収、2030年に中国初の有人月探査、2040年に有人の月面短期滞在、2050年に有人火星探査を計画中。
- ・月探査の目的として、国威発揚と、将来の資源利用を念頭に置いている模様。

## 6. 月・惑星探査に関する海外の主な動向(2/3)

### ○ インド(ISRO インド宇宙研究機関):

- ・無人月探査計画として、チャンドラヤーン1号(2008年:月周回)、同2号(2013年頃:着陸予定)を展開中。国際協力により月探査を実施(1号には欧米センサを搭載、2号では月面探査車をロシアが開発)。チャンドラヤーン1号、月面に水が存在している証拠を発見。
- ・宇宙飛行士3名が搭乗可能な有人宇宙船の開発も計画している模様。

### ○ 韓国(KARI 韓国航空宇宙研究所):

- ・2007年11月に決定された「宇宙開発プロジェクト詳細ロードマップ」の下、2020年までに月探査衛星1号機(周回機)を、2025年迄に月探査衛星2号機(着陸機)の打ち上げを計画中。
- ・また、2008年8月6日の韓米首脳会談で、米国との宇宙探査や宇宙科学分野での協力強化に合意したことで、米国のILN計画への参加に積極的。

### ○ カナダ(CSA カナダ宇宙庁):

- ・2008年に探査計画(Exploration Core Program)を開始し、概念検討等を実施。2009年には月・火星の探査車のプロトタイプ開発等に向けて予算面も含めて探査計画下の活動が活発になる様子。
- ・将来の探査プログラムでは、ISS計画等での実績をベースにロボティクスを中心にカナダ独自の技術貢献をすることを目指しており、有人月面拠点構想に対しては、カナダ人が月面到達するための協力調整(探査車、資源利用、軌道上サービス等)をNASAと開始している様子。
- ・ISS計画では、有人宇宙技術(特に宇宙飛行士の搭乗、医学関係研究等)とカナダアームに代表されるロボティクスを中心に取り組んでいる。

### ○ ドイツ(DLR:ドイツ航空宇宙研究センター)

- ・ISECG等の国際枠組みに参加、広報普及WGを牽引するなど積極的。独連邦産業技術省(BMWi)は、2015年までの無人月面探査の実施の可能性について言及。想定予算は15億ユーロの見込み。
- ・その後、新政権が同計画に反対する立場をとった。国家宇宙戦略を1年以内に策定される予定であり、その中で、位置づけられる可能性あり。

### ○ ロシア(ROSCOSMOS ロシア連邦宇宙局):

- ・ソユーズに替わる新型有人宇宙船(低軌道用)を計画中。
- ・有人月面拠点については、ISECGに参加しつつ、様子を見ているところ。
- ・無人月探査に関しては、ペネトレーターを搭載するluna-glob(月周回・月着陸探査)や月面探査車(印との協力)等を計画中。



## 6. 月・惑星探査に関する海外の主な動向(3/3)

### ○イギリス(BNSC 英国国立宇宙センター):

- ・探査への関心はあり。オーロラプログラムが主。
- ・無人月探査では、NASAと協力しつつ、ペネトレータを積んだ月周回機(MoonLite)、着陸機(MoonRaker)を計画。

### ○ 多国間国際協力の動向:

#### <国際宇宙探査協働グループ>

- ・ブッシュ大統領の宇宙探査構想の発表を契機として、米国が世界の宇宙機関に対し国際協力を呼びかけ、2006年、14宇宙機関(日本はJAXA)による国際探査戦略(GES)の検討が開始された。その協働活動の枠組みとして、国際宇宙探査協働グループ(ISECG)が設立(インドを除く13宇宙機関が参加)。
- ・国際約束のような強制力を持った作業分担ではなく、各国の独自性を発揮しつつ、全体として整合性のあるプログラムの構想を目指す緩やかな分業が志向されており、主として国際協働の調整の場として活用されている。
- ・現在、各国において探査シナリオ等の検討活動が行われており、2010年6月頃を目処に、今後の検討にあたって参照すべき共通の国際探査構想のとりまとめが行われる予定だが、米国の有人宇宙計画の再検討の影響を受けるものと思われる。なお、会合には、各宇宙機関長の出席が求められている。

GES14宇宙機関: ASI(イタリア宇宙機関)、BNSC(英国国立宇宙センター)、CNES(フランス国立宇宙研究センター)、CNSA(中国、国家航天局)、CSA(カナダ宇宙庁)、CSIRO(オーストラリア連邦科学産業研究機構)、DLR(ドイツ航空宇宙研究センター)、ESA(欧州宇宙機関)、ISRO(インド宇宙研究機関)、JAXA(宇宙航空研究開発機構)、KARI(韓国航空宇宙研究所)、NASA(米国航空宇宙局)、NSAU(ウクライナ国立宇宙機関)、Roscosmos(ロシア連邦宇宙局)

GES: Global Exploration Strategy / ISECG: International Space Exploration Coordination Group

# 7. 月面技術からの 地上技術への応用例

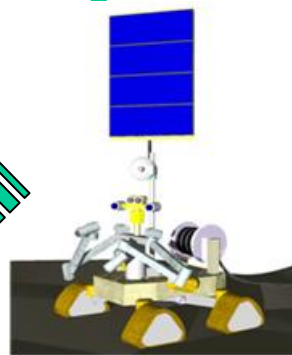
# 月探査技術の応用

新しい宇宙活動とその産業の要となる  
往還技術  
知能化誘導制御技術による  
乗り物の安心・安全

着陸技術  
大型月着陸用エンジン  
高精度誘導・障害物回避  
帰還技術  
大気圏突入技術



表面移動技術  
砂地、不整地走行  
操作・制御技術  
遠距離操作、自律機能  
作業技術  
把持、掘削、作業  
耐環境性技術  
高温低温、放射線、防塵

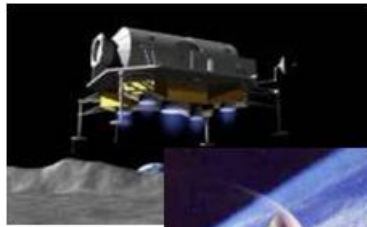


発電技術  
太陽光発電  
蓄電技術  
再生型燃料電池  
節電技術  
断熱保温設計

建設作業などのフィールドロボット  
遠隔医療、無塵工場でのロボット  
人を支援するロボット

自然エネルギー利用でCO2排出削減  
蓄電技術による使用電力平準化  
エコで快適な暮らし

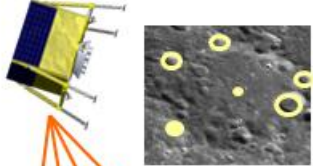
# 着陸技術・帰還技術の応用



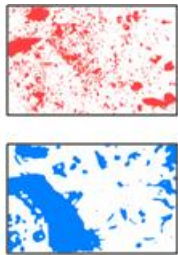
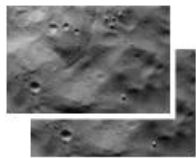
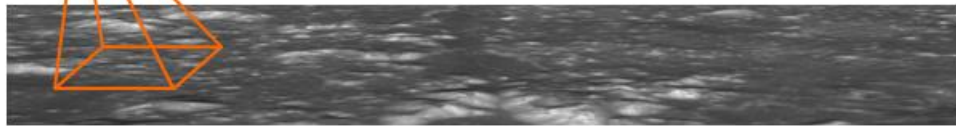
大型で精密制御可能なエンジン



地球帰還軌道への誘導技術  
大気圏再突入カプセル技術

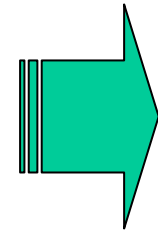
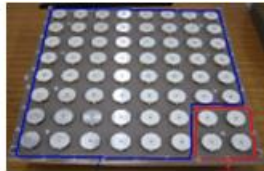


高精度ピンポイント誘導技術

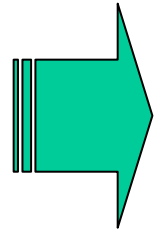
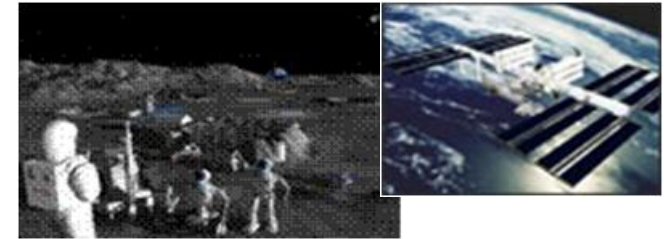


障害物回避技術

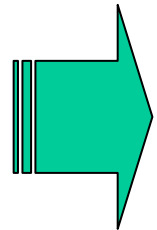
高性能距離・速度センサ



これからの本格的月惑星探査や  
宇宙ステーションへの往還輸送に  
必須の技術



航空機、自動車等の安全性向上、自  
動運転技術



航空機用高度計、速度計  
移動3次元測量



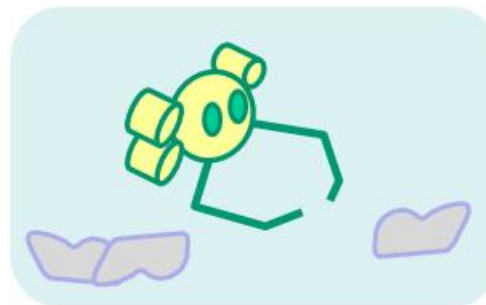
## 探査ロボット技術の応用

下表の産業分野への技術の応用が期待できる

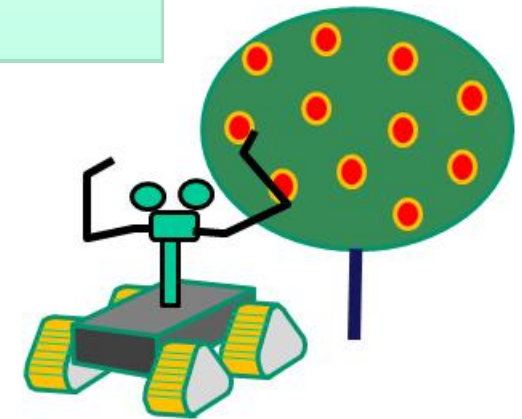
技術項目	応用が想定される産業分野
走行機構	農林業ロボット、建設ロボット、災害救援ロボット
機構要素(潤滑等)	極限環境ロボット、半導体製造装置、表示パネル製造装置
自動/遠隔制御系	海洋探査ロボット、医療ロボット、災害救援ロボット、ホームロボット
センシング	農林業ロボット、建設ロボット、災害救援ロボット



林業ロボット



海洋探査ロボット



農業ロボット

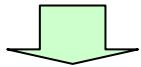
# エネルギー技術の応用

月探査は環境が厳しく、運搬できる重量も大幅に制限されるため、  
高効率、軽量、高性能な最先端のエネルギー技術が必須

CO<sub>2</sub>フリー、クリーンエネルギー社会の実現を先導

## 再生型燃料電池

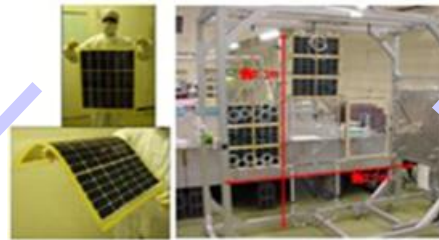
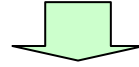
自動車用・家庭用燃料電池



水電解装置等と組み合わせ再生型燃料電池技術を確立

## 太陽電池

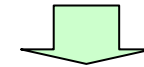
民生用のセル



宇宙利用に適した高効率・薄膜化

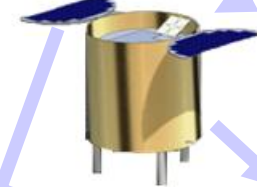
## リチウムイオン電池

民生用の高性能電池



©ジーエス  
ユアサ

夜間電力確保用  
小型電源装置(2015)



低温から高温まで対応可能な軽量・高容量・高信頼リチウムイオン電池

1KW級エネルギー  
供給システム(2020)



水素エネルギー社会の実現を牽引



太陽電池発電の高効率化・低価格化を牽引



厳しい環境をものともしない電気自動車  
やモバイル機器の発展を牽引