

資料7-3

科学技術・学術審議会
研究計画・評価分科会
宇宙開発利用部会
ISS・国際宇宙探査小委員会
(第7回)H26.9.26

国際宇宙探査に必要な技術について

2014.9.26

宇宙航空研究開発機構

執行役 田中 哲夫

1. 国際宇宙探査のシナリオ
2. 国際宇宙探査に必要な技術
3. 国際宇宙探査における技術ロードマップ
4. ISS(地球低軌道)と月・火星探査の違い
5. 国際宇宙探査に求められるキー技術
6. 宇宙探査に対する世界の動きとニーズ
7. 国際宇宙探査に必要なキー技術とそのレベル
8. 国際宇宙探査に向けたJAXAの取り組み

1. 国際宇宙探査のシナリオ



出典: ISECGのGERを参考にJAXAで作成。

✓ ISSを通じた有人長期滞在技術の獲得

- ・ 放射線対策
- ・ 水・空気再生
- ・ 宇宙医学・健康管理 等

✓ ISSを通じた探査技術の宇宙実証

- ・ 地球再突入
- ・ 深宇宙航法ランデブ、光通信
- ・ 再生型燃料電池 等

✓ 無人探査を通じた探査技術の獲得

小惑星

- ・ 深宇宙運用

月

- ・ 着陸・ロボット
- ・ 離陸
- ・ 電力

火星

- ・ 深宇宙運用
- ・ 突入／降下／着陸
- ・ ロボット

国際協働
有人宇宙探査
2025年以降

有人長期滞在

有人小惑星探査

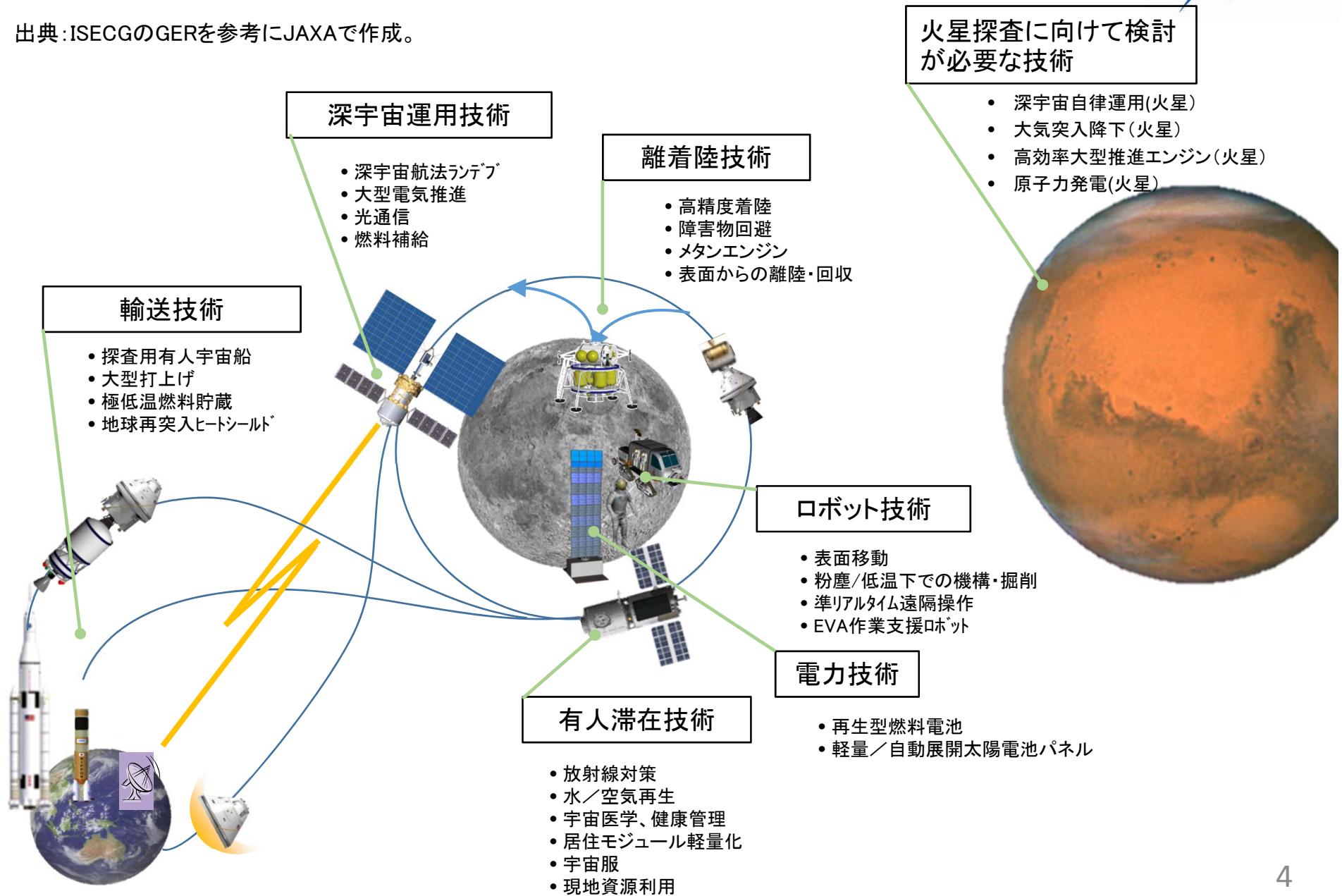
有人月面探査

有人火星探査
(国際協同)
2030年以降

2. 国際宇宙探査に必要な技術



出典: ISECGのGERを参考にJAXAで作成。



3. 国際宇宙探査における技術ロードマップ

ISS技術実証

無人月探査技術実証

2020

2030

2040



有人月面探査



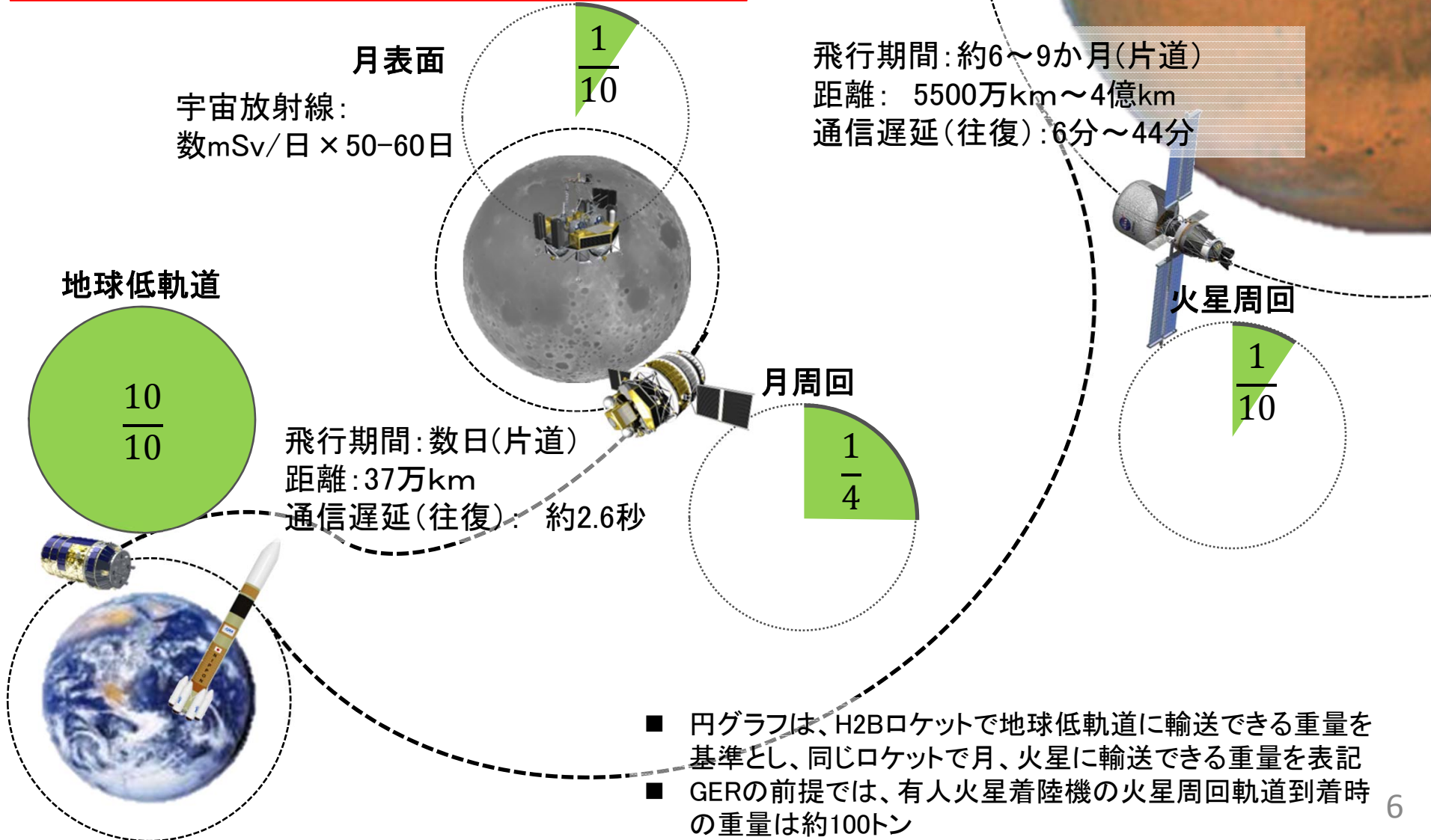
有人火星探査

出典: ISECGのGERを参考にJAXAで作成。

| | 2020 | 2030 | 2040 | | |
|-------|--------------|-------------|----------------|---------------------|----------------------|
| 輸送 | 探査用宇宙船 | 開発中(米) | LEO有人技術実証 | LEO以遠有人宇宙船 | LEO以遠有人宇宙船 |
| | 大型打上げ能力 | 開発中(米) | 大型化・有人化 | 打上げ能力(105t) | 打上げ能力(130t) |
| | 極低温燃料貯蔵 | 地上研究 | 技術実証 | 蒸発率(1%/day) | 蒸発率(0%/day) |
| | 地球再突入ヒートシールド | LEO帰還実証 | 月帰還速度対応(比重0.5) | 月帰還速度対応(比重0.5) | 火星帰還速度対応(比重0.3) |
| | 高効率大型推進エンジン | | 地上研究 | | LEO以遠有人宇宙船 |
| 深宇宙運用 | 深宇宙航法ランデブ | 技術実証 | 月近傍技術実証 | 月近傍/有人対応 | 火星周回/有人対応 |
| | 大型電気推進 | 地上研究 | 月近傍技術実証 | ホールスラスタ(数10kw) | ホールスラスタ(100kw) |
| | 光通信 | 技術実証 | 月近傍技術実証 | 月近傍(800Mbps) | 火星(250-500Mbps) |
| | 燃料補給 | 地上研究 | 月近傍技術実証 | 月近傍・極低温 | 火星表面・極低温 |
| | 深宇宙自律運用 | 技術実証 | 技術実証 | 月近傍/有人対応 | 火星周回/有人対応 |
| 離着陸 | 高精度着陸・障害物回避 | 地上研究 | 月着陸実証(100m) | 有人化対応(100m) | 有人化対応(100m) |
| | 表面からの離陸・回収 | 地上研究 | 月離陸技術実証 | 大型化対応(10t) | 大型化対応(30t) |
| | メタンエンジン | 地上研究 | 月着陸技術実証 | 大型化対応(1/6G) | 大型化対応(1/3G) |
| | 突入/降下 | 地上研究 | 技術実証(地球、無人火星) | | 有人化対応(60t) |
| ロボット | 表面移動・掘削 | 地上研究 | 移動/掘削技術実証 | 移動(500km)/掘削(10m) | 移動(1000km)/掘削(10m) |
| | 遠隔操作・有人支援 | 地上研究 | 月遠隔操作実証 | 自律/遠隔・有人対応 | 自律・有人対応 |
| 電力 | 再生型燃料電池 | 技術実証 | 1kW級(250wh/kg) | 10kW級(500wh/kg) | 100kW級(800wh/kg) |
| | 軽量太陽電池パネル | 地上研究 | 技術実証 | 軽量パネル(10kw, 1kw/kg) | 軽量パネル(100kw, 2kw/kg) |
| | 原子力発電 | | 地上研究 | | 有人火星(100kw級) |
| 有人滞在 | 放射線対策 | LEO放射線計測・防護 | 深宇宙放射線計測 | 放射線防御(60日) | 放射線防御(900日) |
| | 水・空気再生 | 技術実証(要素) | 技術実証(システム) | 水再生率(90%) | 水再生率(99%) |
| | 宇宙医学/健康管理 | 技術実証(180日) | 技術実証(360日) | 健康自律管理(60日) | 健康自律管理(900日) |
| | 居住モジュール軽量化 | 地上研究 | 技術実証 | 軽量化 | 軽量化 |
| | 宇宙服 | 地上研究 | | レゴリス対応・低重力 | レゴリス対応・低重力 |
| | 現地資源利用 | 地上研究 | 要素技術実証 | システム実証 | 実用化 |

4. ISS (地球低軌道) と月・火星探査の違い

ISSのある地球低軌道と比して、地球からの距離や宇宙環境などの違いが大きく、有人月・火星探査の実現には技術的チャレンジを必要としている。



5. 国際宇宙探査に求められるキー技術



1) 月以遠への効率的輸送

■ 輸送能力

月表面や火星周回への輸送量は地球低軌道の1/10。輸送技術の革新やシステムの軽量化が必要。

■ 限られた補給機会

火星への補給機会は26ヶ月に一回。補給物資の再利用や長期保管が必要

2) 遠くへの長期間の有人宇宙飛行

■ 宇宙放射線の増加

ISSでは1mSV/日。月では数mSV/日×50~60日、火星では数mSV/日×900日への対処が必要。

■ 宇宙航行・軌道

月へは片道数日、火星へ6~9か月(かつ帰還の機会も500日毎)。長期有人滞在技術が必要。

■ 通信遅延と宇宙航行支援

通信遅延(月:約2.6秒、火星:8~40分)とGPS等の航法支援が得られないため、深宇宙運用技術が必要。

3) 重力天体への安全な着陸と滞在、帰還

■ 重力天体への着陸と帰還

重力のある天体(月:1/6G、火星:1/3G)への安全な着陸と帰還には、効率的なエンジンや大気減速が必要。

■ 未知の場所へのアクセスと滞在

未知の場所へのアクセスはリスクがあるため、ロボットによる事前調査やクルー支援が必要。

■ 太陽光の影響、熱環境条件

月面の2週間に亘る夜や-200°C~+120°Cの温度変化、火星の弱い太陽光に対処する電力技術が必要。

6. 宇宙探査に対する世界の動きとニーズ



■ 米国および民間の動きとニーズ

- 月以遠の天体に安全に着陸し、表面で活動し、帰還する技術
 - NASA(小惑星、火星)
- 安価に人および物資を輸送する技術
 - 地球低軌道(ボーイング社、スペースX社、他)

■ 国際社会の中でのプレゼンス確保の動きとニーズ

- 国際プレゼンス確保を目的とした有人宇宙技術
 - 米国、ロシア、中国、他
- 地球以外の資源・エネルギーを利用する技術
 - 資源現地利用(NASA)、小惑星資源利用(米国プラネタリ・リソース社、他)

■ 世界共通の国家ニーズ

- 地上産業界の優位性を強め伸ばせる技術
 - ロボット技術、資源再生技術、材料技術、システム技術、他
- 宇宙産業技術の優位性を強め伸ばせる技術
 - 輸送技術、深宇宙大容量通信技術、他

7. 国際宇宙探査に必要なキー技術とそのレベル



| キー技術・能力 | | 有人探査に必要な要求 | | 世界の現状 | | 備考 |
|---------|------------------------|-----------------|------------------|------------|-----------------|---|
| | | 有人月探査 | 有人火星探査 | | | |
| 有人輸送 | 探査用宇宙船 [人数/突入速度] | 4名/11km/s | 6名/12km/s | 4-6名 | Orion[米] | <ul style="list-style-type: none"> 米が探査用宇宙船及び大型ロケットの開発を開始。(露も計画) 極低温燃料貯蔵やヒートシールドは多くの機関(日本含む)で研究中 |
| | 大型(LEO100t超)打上げ[LEO能力] | 105t | 130t | 130t(機体込) | シャトル[米] | |
| | 極低温燃料貯蔵[蒸発率] | 1%/day | 0%/day | 75%/day | SLS[米] | |
| | 地球再突入ヒートシールド[比重] | 0.5 | 0.3 | 0.5 | Apollo/Orion[米] | |
| | 高効率大型推進エンジン | — | 推力10t/Isp1000秒 | — | 研究中[米] | |
| 深宇宙運用 | 深宇宙航法ランデブ | 月近傍/有人 | 火星周回/有人 | 月近傍/有人 | Apollo[米] | <ul style="list-style-type: none"> Apolloでのランデブはマニュアル 大型電気推進は、米のほか、日・露・欧が研究中 光通信は、日・露・欧が研究中 ISS実証 |
| | 大型電気推進 [電力] | 数10kW | 100kW | 5kW | AJ[米] | |
| | 光通信[軌道/通信速度] | 800M級 | 250M-500級 | 月/622M | LADEE[米] | |
| | 燃料補給[種類] | 極低温液体 | 極低温液体 | 常温 | ISS[米露欧] | |
| | 深宇宙自律運用 | — | 必要 | 計画中 | ISS実証 | |
| 離着陸 | 高精度着陸 [精度] | 100m | 100m | 数km | 着陸[露米中] | <ul style="list-style-type: none"> 米・露・中が既に着陸実績があるが、精度は高くない。 火星大気突入実績は米のみ メタンエンジン研究は米・日のみ |
| | 障害物回避[無人/有人] | 必要 | 必要 | 月面 | 嫦娥[中]/Apollo | |
| | 表面からの有人離陸 [離陸機質量] | 10t | 30t | 5t | apollo[米] | |
| | メタンエンジン[推力/比推力] | 100kN級/350秒 | 500kN級/350秒 | 22kN/321秒 | Morpheus[米] | |
| | 火星大気突入・降下 [着陸質量] | — | 60t | 1t | Curiosity[米] | |
| ロボット | 表面移動 [距離] | 200-500km | 1000km | 41km(火星) | Opportunity[米] | <ul style="list-style-type: none"> 表面移動技術は多くの国が研究中。 機構・掘削技術は日本の他はカナダ・英国で研究中。 |
| | 粉塵・低温下での機構・掘削 [深度] | 10m(TBD) | 10m(TBD) | 292cm(月) | Apollo[米] | |
| | 準リアルタイム遠隔操作 | 遠隔 | 遠隔/自律 | 遠隔 | ISS | |
| | EVA作業支援ロボット | 作業支援 | 作業支援 | 移動支援 | ISS[米加] | |
| 電力 | 再生型燃料電池[電力,電力密度] | ~10kW, 500Wh/kg | ~100kW, 800Wh/kg | 160Wh/kg | Li-Ion電池 | <ul style="list-style-type: none"> 燃料電池は多くの国研究中。 太陽電池パネルは日・米が世界トップレベルの研究状況 |
| | 軽量/自動展開太陽電池パネル | 10kW級, 1kW/kg | 100kW級, 2kW/kg | 0.15 kW/kg | Orion[米] | |
| | 原子力発電[発電電力] | — | ~100 kWe | 125We | MMRTG[米] | |
| 有人滞在 | 放射線対策 | 数mSv/日 × 50-60日 | 数mSv/日 × 900日 | 1mSv/日 | ISS[米] | <ul style="list-style-type: none"> 探査では高エネルギーの銀河宇宙線への対処が必要 水/空気再生、宇宙医学/健康管理は多くの国が研究中 |
| | 水・空気再生[水再生率] | 90% | 99% | 80% | ISS[米] | |
| | 宇宙医学・健康管理[期間/支援] | 50-60日間/自律 | 900日間/自律 | 180日/地上 | ISS[米露] | |
| | 居住モジュール軽量化 | 軽量化 | 軽量化 | 20t/330m³ | BA 330[米] | |
| | 宇宙服(レゴリス、低重力対応) | レゴリス、低重力対応 | レゴリス、低重力対応 | 無重力対応 | ISS [米露] | |
| | 現地資源利用 | 実証 | 実用化 | 研究 | [米] | |

● 開発中(緑)。有人月探査においても技術開発(黄)が必要。有人火星探査はさらに技術的ハードルが高い(赤)。

8. 国際宇宙探査に向けたJAXAの取り組み(1/2)



- 国際宇宙探査の広範なキー技術に対し、我が国に相応しい技術を選択し集中的に取り組む。

- 技術の選択に当たっての考え方は以下の通り。
 - ① 国際宇宙探査を先導可能で、これまでの実績を更に伸ばし、科学技術立国日本の国力を世界にアピールできる技術
(例) 基幹技術である輸送系技術(軌道間輸送機、及びエンジンなどの要素技術)
国際宇宙探査をより安全でロバストとする為の複数の手段の確保(ロケットや通信技術)、等

 - ② 宇宙での実績は少ないが、日本の技術動向を踏まえた世界に貢献できる技術および産業への橋渡しができる技術
(例) 日本の優れた省エネルギーやクリーンエネルギー技術を生かした電力・エネルギー技術
最先端医療技術を生かした宇宙医学
高度な再生・リサイクル技術を生かした有人滞在技術 等

 - ③ 日本が将来的に優位(世界一)に立てる可能性が高い技術
(例) 基幹技術である着陸・回収技術
民生ロボット技術を生かした有人支援ロボット
安全運転支援技術を取り込んだ安全な有人ローバ、 等

8. 国際宇宙探査に向けたJAXAの取り組み(2/2)



ISSや「はやぶさ」での経験(参考)

■ 日本オリジナルの技術による輸送技術の「デファクトスタンダード」確立

- こうのとりの(HTV)のソフトランデブー・ドッキング技術

ISSから10mの位置にホバリングし、ISSロボットアームで把持、ドッキングする方式

⇒ 米国民間輸送機でも採用

- はやぶさの小惑星探査技術

障害を回避し指定の場所に安全に着陸する技術や、小惑星から地球に試料を回収する技術

⇒ 欧州のロゼッタ計画(彗星探査)や米国のOSIRIS-REX(小惑星サンプル回収)に先行

■ 日本の技術を生かした高信頼性、高品質

- こうのとりの： 定時打上げ、定時到着(4機連続)

- きぼう実験棟： 不具合は米国実験棟の半分以下

打上げから48カ月後の不具合件数比較




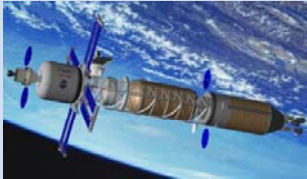
| | 不具合件数 |
|---------------------|-------------------|
| きぼう 2008年3月打上げ | 75件 2012年3月まで |
| 米国実験棟 2001年2月打上げ | 175件 2005年2月まで |

- はやぶさいオンエンジン： 4万時間運転(世界一)

参考資料

キー技術について(1/6) -有人輸送-



| キー技術 | 探査用宇宙船 | 大型(LEO100t超) 打上げ | 極低温燃料貯蔵 | 地球再突入ヒー トシールド | 高効率大型推進エ ンジン |
|----------|--|--|---|--|--|
| 概要 | 地球低軌道より 遠方に飛行士を 運搬する機能 | 大型重量物を地 上から低軌道に運 搬する能力 | 宇宙空間で極低 温燃料の蒸発を 防止し、長期間貯 蔵する技術 | 有人宇宙船の大 型熱防護材の軽 量化 | 電気推進や原子力 を用いた高効率、大 型の推進エンジン |
| 月探査目標 | 4名 | 105トン[LEO] | 蒸発率 1%/日 | 熱防護材比重: 0.3 | 不要 |
| 火星探査目標 | 6名 | 130トン[LEO] | 蒸発率0%/日 (再液化) | 熱防護材比重: 0.3 | 推力10t 比推力1000 秒 |
| 日本の強み | 無 | 無 | H-IIA/B上段エン ジン | はやぶさ帰還カ プセル、HTV-R | 無 |
| 例/イメージ 図 |  <p>(c)NASA 有人宇宙船 Orion</p> |  <p>(c)NASA 重量級打上げロ ケット</p> |  <p>極低温燃料タンク</p> |  <p>有人宇宙船の地 球帰還カプセル</p> |  <p>(c)NASA 熱核ロケットエンジ ンの例</p> |



キー技術について(2/6) -深宇宙運用-



| キー技術 | 深宇宙航法・ランデブ | 大型電気推進 | 光通信 | 燃料補給 | 深宇宙自律運用 |
|---------|--|---|--|--|---|
| 概要 | GPSが使えない宇宙機同士のランデブドッキングする技術 | ホールスラスタの大型化技術 | レーザを利用した高速宇宙通信技術 | 宇宙拠点に燃料を充填する技術 | 地上系に依存しない宇宙船運用 |
| 月探査目標 | ドッキング速度: 5~10cm/sec | 10kW/500mN | 800Mbps | 必要 | 不要 (通信遅延:2.6秒) |
| 火星探査目標 | ドッキング速度: 5~10cm/sec | 100kW/5N | 250-500Mbps | 必要 | 必要 (通信遅延:数分~最大44分) |
| 日本の強み | こうのとりの (低軌道) | はやぶさ (イオンエンジン) | 光通信技術衛星 (OICETS/低軌道) | こうのとりの (低軌道・補給) | はやぶさ他 (深宇宙運用) |
| 例/イメージ図 |  ランデブセンサ |  ホールスラスタ |  (c)NASA 月近傍光通信実験 (LADEE(米)) |  電動推薬ポンプ |  はやぶさ運用 |

キー技術について(3/6) -離着陸-



| キー技術 | 高精度着陸 | 障害物回避 | メタンエンジン | 表面からの有人離陸・回収 | 火星大気突入・降下 |
|---------|--|--|--|---|---|
| 概要 | 周回軌道から指定した場所に着陸する技術 | 安全に着陸するために、障害物を買回避する技術 | 動力降下で着陸制御する推力可変の大推力エンジン | 惑星表面から地球に帰還するための離陸技術 | 火星表面に着陸するために大気圏に突入し降下する技術 |
| 月探査目標 | 着陸精度: 100m | 必要 | 推力: 10ton@1/6G | 必要 | - |
| 火星探査目標 | 着陸精度: 100m | 必要 | 推力: 30ton@1/3G | 必要 | 必要 |
| 日本の強み | 地形照合による航法技術 | Flash LIDARによる高速検知(研究中) | LNGエンジン(研究中) | 無 | 無 |
| 例/イメージ図 |  <p>地形照合技術</p> |  <p>LIDAR(はやぶさ2)</p> |  <p>LNGエンジン</p> |  <p>(c)NASA 月面有人離着陸機</p> |  <p>(c)NASA 火星有人突入/降下</p> |


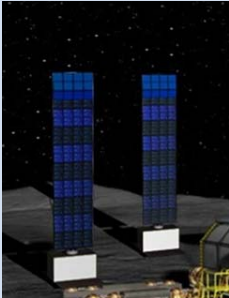
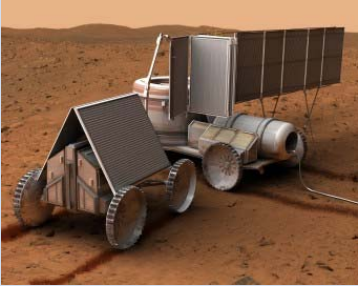
キー技術について(4/6) -ロボット-



| キー技術 | 表面移動 | 粉塵・低温化での機構・掘削 | 準リアルタイム遠隔操作 | EVA作業支援ロボット |
|---------|--|--|--|----------------------|
| 概要 | 傾斜を有する不整地環境を宇宙飛行士が移動する技術 | レゴリス、低温等の特殊環境において掘削等の機構を動作させる技術 | ロボットを近傍の拠点、及び地上から遠隔操作する技術 | クルーのEVA作業を支援するロボット技術 |
| 月探査目標 | 走行距離: 500km | 掘削深度: ~20m | 遠隔 | 作業支援 |
| 火星探査目標 | 走行距離: 1000km | 掘削深度: ~20m | 遠隔/自律 | 作業支援 |
| 日本の強み | 自動走行技術(地上技術) | 建設機械等の地上技術 | 災害対応等の地上ロボット技術 | |
| 例/イメージ図 |  有人与圧ローバ |  掘削ドリル(地上試験モデル) |  (c)NASA 有人支援ロボット | |




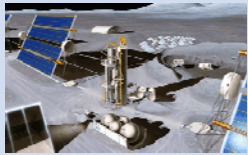
キー技術について(5/6) -電力技術-



| キー技術 | 再生型燃料電池 | 軽量／自動展開太陽電池 パネル | 原子力発電 |
|---------|---|--|--|
| 概要 | 水電解技術により酸素・水素を生成(充電)し、補給が不要な電池技術 | 自動展開可能な太陽電池パドルの軽量化・自立化技術 | 惑星面上で安定電力供給を可能とする原子力発電技術 |
| 月探査目標 | 10kW, 500Wh/kg | 1kW/kg | 極周辺: 不要 (中低緯度: ~40kWe) |
| 火星探査目標 | 100kW, 800Wh/kg | 2kW/kg | 100kWe |
| 日本の強み | 成層圏プラットフォームで開発した再生型燃料電池 | 人工衛星(低軌道)技術 IKAROSの薄膜太陽電池 | 超小型炉技術 |
| 例／イメージ図 |  <p>再生型燃料電池 (地上モデル)</p> |  <p>自立式自動展開太陽電池 パドル</p> |  <p>(c)NASA 火星原子力発電システム</p> |

キー技術について(6/6) -有人滞在-



| キー技術 | 放射線対策 | 水・空気再生 | 宇宙医学・健康管理 | 居住モジュール軽量化 | 宇宙服 | 現地資源利用 |
|---------|---|---|---|---|---|--|
| 概要 | 磁気圏外の厳しい放射線環境から人体を保護する技術 | 飛行士が使用した尿等の水分、二酸化炭素等を再利用する技術 | 宇宙飛行士が長期滞在する際の健康管理技術 | 惑星表面に設置され、クルーが滞在するための構造物の軽量化 | レゴリス・低重力環境に適応した船外用宇宙服 | 現地の物質の直接利用や、酸素等の生成を行う技術 |
| 月探査目標 | 60日 | 再生率:90% | 60日 | 軽量化 | 1/6G対応 | 実証 |
| 火星探査目標 | 900日 | 再生率:99% | 900日 | 軽量化 | 1/3G対応 | 酸素製造 |
| 日本の強み | 計測技術 | 水浄化技術 | 遠隔医療技術 | 軽量化技術 新素材技術 | 新素材技術 | プラント技術 |
| 例/イメージ図 |  ISSでの放射線計測 |  ISSでの水再生 |  ISSでの宇宙医学実験 |  (c)Bigelow Aerospace インフレイブル居住モジュール |  次世代宇宙服 |  (c)NASA 月面資源利用プラント |