

月面ラボを拠点としたその場資源利用

石川正道

内容

1. はじめに
2. 大目標: 宇宙惑星居住科学
3. 月面環境とその場資源利用
4. 先導する工学・技術の提言
5. まとめ

1. はじめに

本日は、月のその場資源利用に関して、数年来温めてきた考えをお話します。2018年、米国より我が国に Gateway 計画への参加が要請され、2019年3月には正式に国際協力のもとに進められることが表明されました。私は、国際宇宙ステーション計画の最初期から宇宙環境利用に携わることができ、本日に至るまで JAXA の方々を含め、多くの良い出会いに恵まれ、たくさんの経験と学びを得ました。ISS 計画から Gateway 計画への移行が円滑に進むことを願って、その一助になればと、これまでの経験を踏まえたお話をさせていただきます。

講演の内容は、我々の大目標である宇宙惑星居住科学について、月面環境とその場資源利用、先導する工学・技術の提言、及びまとめとなります。

2. 大目標: 宇宙惑星居住科学

日本人は、月に対する思いは昔から格別のものがある訳であります。これは主に詩歌、物語の世界の話であり、科学技術分野にて日本人の貢献が注目されたのは、かぐやのハイビジョンカメラをはじめとする各種観測に始まると考えています。実際のところ、月の科学は、アポロ計画以降にそれほどの進展があった訳ではありません。これからの活動によって十分キャッチアップできるのではないかと、自信をもらったのがかぐやの成果だと思います。

さて、JAXA は、宇宙科学研究の基本的スタンスを次のように整理しています。

●宇宙科学研究・戦略立案の基本的考え方

1. 宇宙・物質・空間は何故できたのかの解明
2. 太陽系と生命はどのように生まれて来たかの解明
3. 衛星・探査機などの宇宙機システム及び宇宙輸送システムに関わる宇宙工学技術の先導及び革新
4. 人類の活動領域を広げる研究開発

有人宇宙活動は、4番目の人類の活動領域を広げる研究開発として位置付けられます。それでは、これからの宇宙探査時代に向けて、私たちが誇れる蓄積はどこにあるかと言いますと、まさしく、四半世紀を越える国際宇宙ステーション(ISS)での宇宙環境利用の取組みなのです。ISSで得られた成果を基軸にいかに関宇宙探査にチャレンジするかが、本日の私の講演のメインテーマである大目標「宇宙惑星居住科学」の論点です。この大目標は、2016年に開催された「第30回宇宙環境利用シンポジウム」にて、私たち宇宙環境利用コミュニティがその総意として打ち出しました。そのミッションは、次の通りです。

●「宇宙惑星居住科学」のミッション

1. 宇宙環境を有効に利用して、ISSで研究されてきた重力の制約が無い物理・化学・生命現象の普遍性を追求し、地球以外の重力天体でも通用する科学知識の獲得を行う。
2. その成果に基づき、基礎科学、応用科学を惑星探査活動の観点から融合・発展し、人間科学、社会科学とも連携、英知を結集して、人類の活動を惑星へと拡大する長期居住を目指す。
3. 広く人類の生活・健康・医療・文化などへ還元し、生命を育む地球環境の成り立ちを深く洞察、保全する文明の発展に貢献する。

宇宙惑星居住科学の発想が必要なことは、最近富みに喧伝されているSDGs(持続可能な開発目標)の認識の高まりをみても明らかです。人口爆発、資源枯渇、地球温暖化など、どれをとっても、これから50年間で深刻な事態が生じるものです。宇宙惑星居住は、人類にとって不可避の選択肢となるに間違いありません。



図1 「宇宙惑星居住科学」のミッション

次に、宇宙惑星居住科学を目指すにあたって考慮すべき視点を、戦略と課題として整理しておきます。

●宇宙惑星居住科学の実行戦略

1. 月面の重力場(0.17G は、0G と 1G を補間する)を利用して ISS で行われた微小重力科学研究の成果を実証・発展させる。
2. 重力惑星環境での生物生存性、閉鎖型生命維持技術など、宇宙空間にて人が持続的に生存し、探査活動を可能とするための科学研究、技術開発、実証を推進する。
3. 月には大気がなく、重力も小さいことから、地球からの輸送と比べ大幅なコスト低減が可能となるなど、月の資源開発・利用による惑星探査の経済性を追求する。
4. 我が国が今後進める小型月着陸実証機計画およびその後継機を見据えた、次世代月探査計画と整合する月環境利用ミッションを提案する。

●課題：“宇宙科学・探査ロードマップと整合させる”

1. これまでの宇宙環境利用は、ISS 利用をミッションの最終目標としてきたが、ISS を人類が惑星進出するための飛び石としてその機能を活用する。
2. 「宇宙惑星居住科学」の当面の実行戦略は、月面および月周回軌道の利用とする。

3. 月面環境とその場資源利用

次の話題は、月面環境とその場資源利用です。月面環境の特徴を整理すると次のようになります。

- (1) 低重力場(0.17 G)
- (2) 極低温から高温までの大きな温度差 ($\Delta T=355$ K)
- (3) 極めて希薄な大気(極真空)
- (4) 無地場
- (5) 太陽風プラズマの下での強力な放射線
- (6) 遮られることのない強力な太陽光と地球と異なる日変動、季節サイクル
- (7) レゴリス(石質粒状物質)と呼ばれる月面土壌(粒径: 数ミクロン～数ミリ)

表1 月と地球の環境データ比較

特 性	月	地 球
1. 重力	1.62 m/sec ² (1/6 G)	9.81 m/sec ² (1 G)
2. 最低・最高気温	-248°C(南極) ~ 107°C(中緯度)	-89°C ~ 58°C
3. 大気	10 ⁴ (昼) ~ 10 ⁵ (夜) 分子/cm ³	2.5 × 10 ¹⁹ /cm ³
4. 磁場	0	24 ~ 56 A/m
5. 地震エネルギー	2 × 10 ¹⁰ J/Yr (隕石衝突を除く)	10 ¹⁷ ~ 10 ¹⁸ J/Yr
6. 自然放射線	100~7000 mSv (太陽粒子線)	2.4 mSv (世界平均)

人が月面活動をある程度の期間にわたって持続するには、必要となるインフラの整備が急務となります。活動の初期から中期の段階において、必要となるその場資源利用のニーズについて以下に列記しました。質量が大きく、輸送コストがかさむと思われるもの、かつまた安全安心の視点から、必要なものがすぐに調達できることに留意して整理しました。

● ミッションで消費される物資

- ① 燃料
- ② 燃料電池用反応剤
- ③ 生命維持システム関連消耗品

● 月面建設

- ① 放射線遮蔽構造
- ② 着陸サイトの整備
- ③ 微小隕石・離着陸時の粉塵防御構造

● 製造

- ① 交換部品の製造
- ② 質量の大きい単純物品（椅子、机、壁、パイプ、電線など）
- ③ 増加する資源プロセス需要に伴う現地生産システム

● エネルギー及び利用設備

- ① 太陽光発電
- ② 太陽熱エネルギー
- ③ 燃焼エネルギー
- ④ 廃棄物処理

この通り、少し考えただけでも、その場資源利用の準備が必要不可欠となる事情が理解できます。

それでは、まったく生産基盤のない月面において、具体的にどのような技術開発に着手したらよいのか。まずは、利用し易い元素資源について、見てみることにします。

月は、地球型の鉱物組成を持っていると考えられておりますが、実際に月面ですぐに利用可能な資源は、地球上とはかなりの違いがあります。試みに、アポロ計画時代に月面で見いだされた主要5鉱物(10%以上の存在度)について見てみましょう。

● 月面を構成する主要5鉱物:

Pyroxene(輝石: $\text{MgSiO}_3/\text{CaSiO}_3/\text{FeSiO}_3$)

Feldspar(長石: $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8/\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)

Olivine(かんらん石: $\text{Mg}_2\text{SiO}_4/\text{Fe}_2\text{SiO}_4$)

Ilmenite(チタン鉄鉱: FeTiO_3)

Spinel(スピネル: $\text{Fe}_2\text{TiO}_4/\text{FeCr}_2\text{O}_4/\text{FeAl}_2\text{O}_4/\text{MgCr}_2\text{O}_4/\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Mg}_2\text{TiO}_4$)

月面の黒い平原いわゆる海に多いイルメナイト(チタン鉄鉱、 FeTiO_3)は、鉄やチタン、酸素を製造することができるため、有益な資源として期待されています。

アポロ計画で持ち帰ったサンプルについて、その構成元素を分類いたしますと、次の6種に分類されます。興味深い元素群は、隕石の重爆撃によって濃縮された親鉄元素群です。先端技術において欠くことのできない、希少元素が数多く含まれております。

表2 アポロ採取試料に見出された元素資源

元素群	構成元素
1. 主要元素	O, Si, Al, Ti, Fe, Mg, Ca, Na ^(※)
2. 微量元素	P, Sc, V, Cr, Mn, Ga, Sr
3. 非共存性微量元素	アルカリ土類(Caを除く), REE, B, Zr, Nb, Sn, Hf, Ta, U, Th
4. 親鉄元素(隕石起源)	Fe, Co, Ni, Ge, Mo, Ru, Rh, Pd, Sb, W, Re, Os, Ir, Pt, Au
5. 揮発元素(太陽風・隕石起源)	H, He, C, N, S, F, Cl
6. マグマ活動・隕石衝突に伴って気化・移動する元素 ^(※)	Cu, Zn, As, Se, Ag, Cd, In, Te, Hg, Tl, Pb, Bi

(※)アルカリ元素(Kなど)は、マグマ活動によって気化、失われた可能性が高い。

現在、その場資源利用として最も期待されているのが太陽風・隕石起源の元素群です。特に、月面で利用可能な資源は、レゴリスと呼ばれる石質土壌です。数ミクロンから数100ミクロンの粒径で、数十億年にわたる月面への隕石衝突によって飛散した粒子が降り積もったものと考えられています。次に、月面上に大量に存在する月面土壌レゴリスに含まれる有用元素について見てみましょう。

●月面レゴリス中の揮発性元素の特性

- ・ 太陽コロナから放出される荷電粒子（太陽風）は、主にヘリウムと水素。
- ・ 月には地場がないため、直接レゴリス表面中（<1 μm）に取り込まれる。
- ・ 隕石衝突による攪拌によって表層から3mまでは存在度はほぼ一定。
- ・ 表面積の大きい微細粒子に濃縮する（例、H：150 μg/g、<20 μmφ）。
- ・ 700℃の加熱で容易に気体として捕集できる。

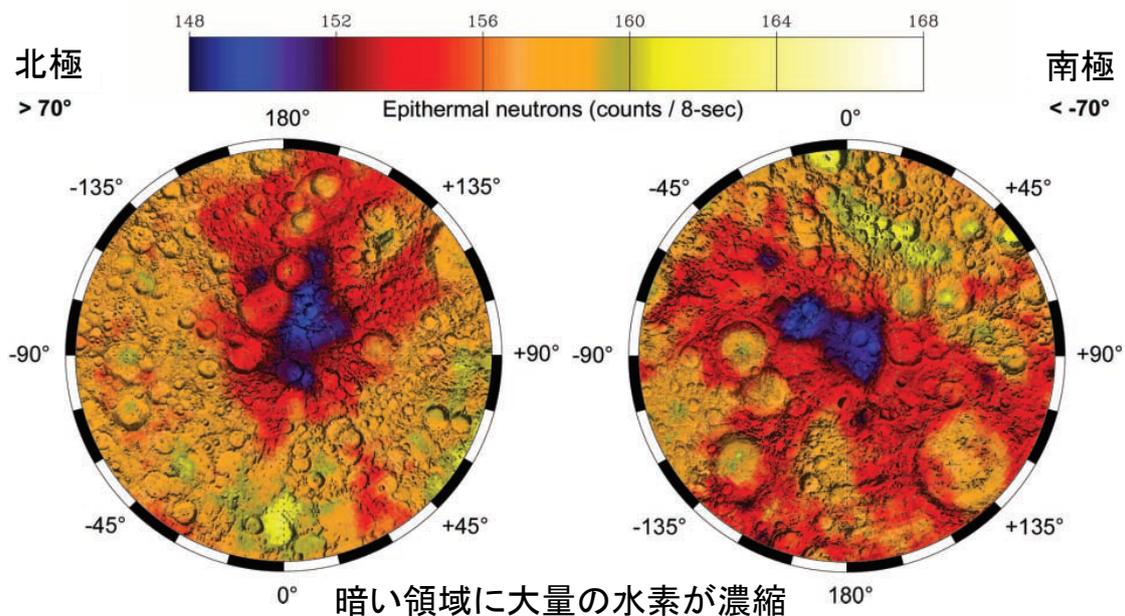
表3 月面レゴリス中の揮発性元素

元素	存在度(平均)	備考
ヘリウム(He)	4.2 ng/g	レゴリス： ³ He/ ⁴ He 4.8 x 10 ⁻⁴ 地球大気： ³ He/ ⁴ He 1.4 x 10 ⁻⁶
水素(H)	46 μg/g	H ₂ O 換算で、500 ml/m ³
炭素(C)	124 μg/g	火山/炭素質隕石を起源
窒素(N)	81 μg/g	同上
イオウ(S)	715 μg/g	他元素と比べて最大存在量
フッ素(F)	68 μg/g	サンプル毎の変動が大きい
塩素(Cl)	44 μg/g	同上

アポロ時代から興味を持たれているのが He です。He は、太陽風に最も多く含まれる成分であり、地球の存在度と比べて、レゴリス表面には多量の He が含まれます。注目されているのは、地球にはほとんどないヘリウム 3 の多さです。NASA が温めている構想の一つに、核融合炉で使用する燃料を月で採掘するというものがあります。重水素とヘリウム 3 との核融合は、中性子が発生せず、二次的に出る放射線量も少ないなど、比較的取り扱いやすいことから、核融合燃料として注目されています。

次に重要な元素が水素です。水の成分にである酸素はイルメナイトから比較的容易に抽出できますので、この水素が、現在月面で確実に利用可能な水資源となります。1立方メートル当たり 500cc が得られると推定されております。

水については、さらに楽観的な報告があります。ルナー・プロスペクター(NASA)による中性子分光データの解析から分かったことで、月の極地域の永久影の部分に大量の水素(あるいは氷)が存在する可能性がある、というものです。仮に、これを水に換算すると、土壌の 3~10%に相当すると推定されています。これが真実であるのであれば、人類にとっては大変ラッキーな贈り物となります。ただし、水として存在するかどうかは今のところ不明で、月の極域に水があるかどうかという問題は、月探査において最もホットな話題となっています。



Ref. National Research Council, The Scientific Context for Exploration of the Moon, The National Academies Press (2007)

図2 月極地域での水素分布

それでは、月の資源利用に向けて我々はどのような準備を進めたらよいのでしょうか。一言で言って、これから動き出す国際探査ミッションを見据えて、必要となるであろう合理的な開発プロジェクトを前もって準備することに尽きます。そのような考えの下に、私たちは Gateway 計画が発表される前から、宇宙惑星居住科学の大目標を掲げ、月周回衛星および月面ラボを進めるべき、研究課題の芽だしを行ってきました。

図3には、現在進められている、あるいは計画中の JAXA 及び国際宇宙探査プログラムと宇宙惑星居住科学との連携をまとめてみました。

ISS は、2024 年以降も運用を継続することが方針として出されています。ISS では、微小重力科学、生命科学、宇宙医学の研究が、2008 年以来コンスタントに進められております。探査計画と連携を進める上で重要な戦略は、ISS 利用をいかに Gateway 計画、月面活動で必要な技術開発につなげていくかにあります。

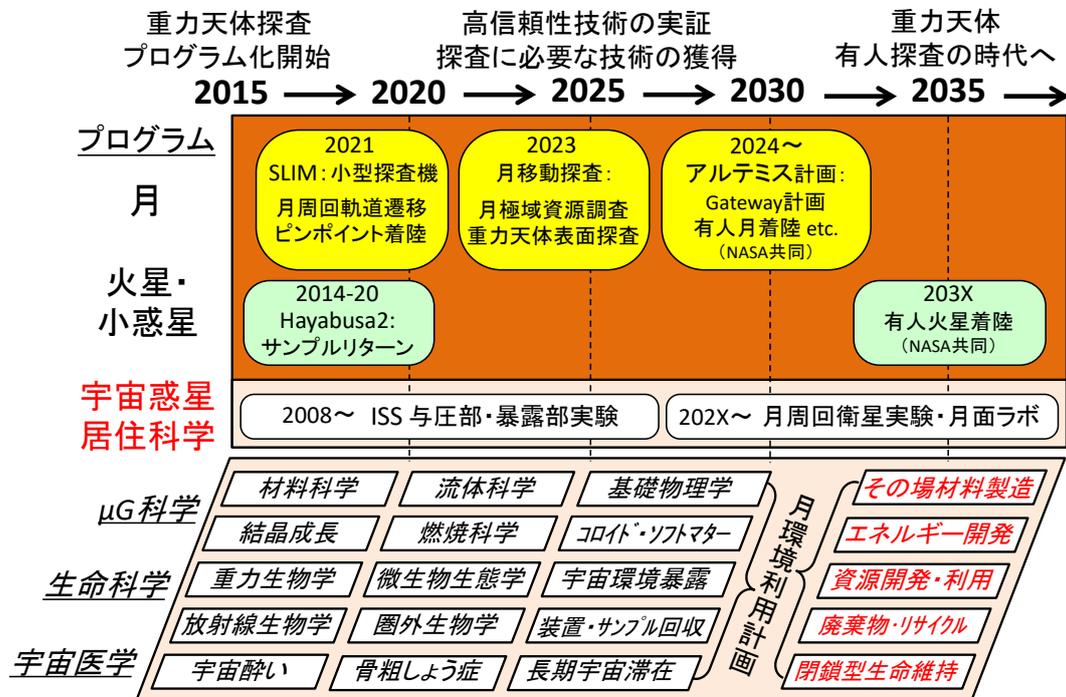


図3 ISSと国際宇宙探査プログラムとの連携

次に、これまでの ISS 利用研究で得られた研究成果を、月環境利用計画へと軌道修正することが可能で、探査において必ず役に立つ工学あるいは技術群を、いくつか提案してみたいと思います。

4. 先導する工学・技術の提言

私たちが今まさに進めている微小重力科学研究が、どのような探査技術の基礎となるかを、コミュニティでの議論を踏まえて表4に総括しました。

研究分野は、材料、流体、燃焼、化学工学、コロイド、基礎物理など多岐にわたります。ここでは、その場資源利用に絞って有望なテーマをご紹介します。テーマは、材料製造、エネルギー開発、資源開発、生命維持システム、廃棄物・リサイクル、資源探査に係るもので、特に、日本のプライオリティーが高いものを選びました。

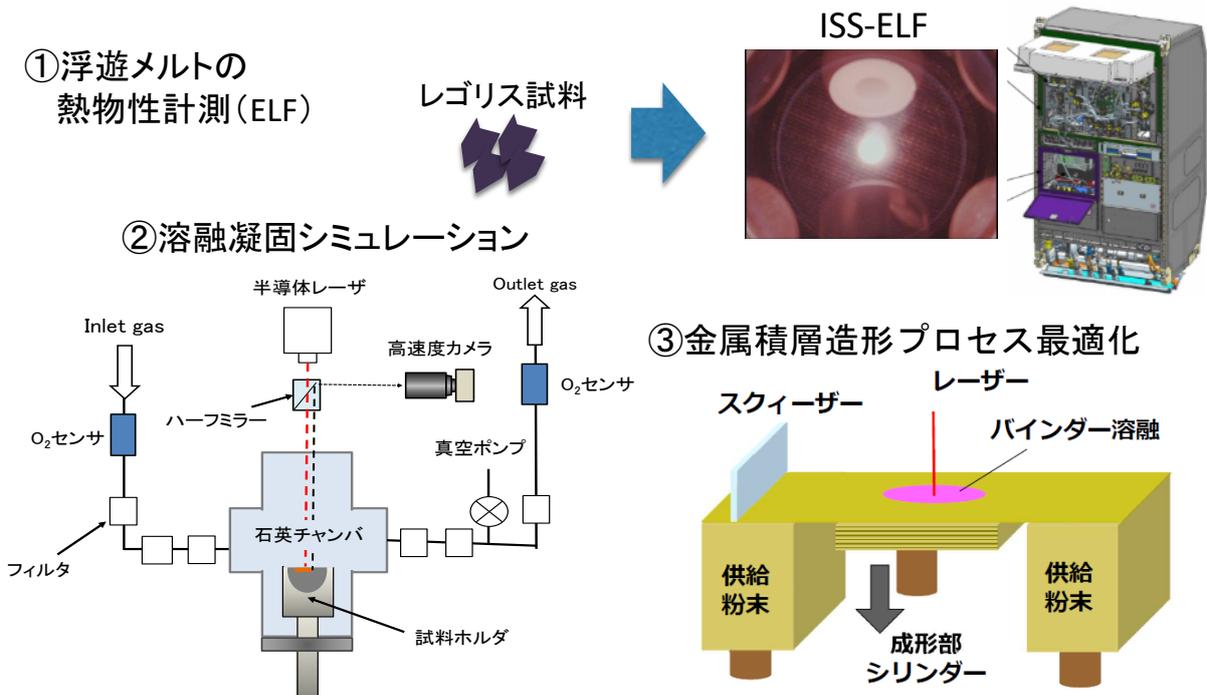
- (1) その場製造(3D プリンター)
- (2) 熱エネルギー開発
- (3) 月面資源開発(レゴリス利用)
- (4) 水・空気環境浄化
- (5) 生活安全・リサイクル
- (6) 時間標準(GPS 周波数標準)

表4 微小重力科学の宇宙探査技術への応用

分野	微小重力科学	探査技術応用テーマ
材料科学	無容器プロセスを用いた高温融液の熱物性計測およびそれを用いた材料プロセス設計	<ul style="list-style-type: none"> レゴリスなど惑星鉱物資源を原材料とした材料プロセス設計のための熱物性値取得 その場資源利用を可能とする鉱物製錬・精錬、材料加工技術の開発
流体科学	表面張力が支配的因子となる気泡・液滴・液膜に関連した気液界面現象の解明と熱物質輸送制御	<ul style="list-style-type: none"> 探査居住モジュール熱制御技術、宇宙機流体制御技術の開発 微小重力、低重力下での積層造形(3Dプリンター)技術の基礎となる溶融凝固過程のシミュレーション
燃焼科学	微小重力利用による燃焼素過程解明と燃焼限界の取得	<ul style="list-style-type: none"> 有人活動において必要な宇宙火災安全確保のためプロトコル確立 月面極域に存在する水素を利用した熱源の開発と利用システム設計 燃焼による廃棄物の減容処理
化学工学	重力変動の影響を受けにくい宇宙環境での持続可能なリサイクルシステムの構築	<ul style="list-style-type: none"> 有人探査に向けた空気再生および水再生など生命維持・リサイクル技術の高度化 水素、酸素、水の循環的利用を可能とする光触媒プロセスの設計 日本の強みである環境技術を微小重力、低重力、可変重力場での単位操作技術に再構築
コロイド界面科学	微小重力、低重力、可変重力場での物理、化学、生物など分野を横断するコロイド界面科学の再考	<ul style="list-style-type: none"> 粒子の自己組織化原理の材料プロセス、リサイクル技術への応用 界面活性剤による界面制御、物理表面の濡れ制御、電場効果のバイオテクノロジー応用 食品の保存処理、日用品など生活関連資材への応用
基礎物理	プラズマおよび低温環境における多体系量子・物理現象の解明	<ul style="list-style-type: none"> レゴリス粒子のプラズマ特性評価と材料プロセス技術への応用 生命と真空、高エネルギー環境との相互作用の解明 光格子時計を用いた超高精度時間測定と各種精密測定技術への応用
共通技術 実験手段	その場分析・観察、ロボット技術	<ul style="list-style-type: none"> 化学分析、ゲノム、プロテオーム、メタボローム解析など 実験の自動化、遠隔操作などテレサイエンスの高度化
	ISS, DSG, 小型衛星、月面ラボ	<ul style="list-style-type: none"> 有人、無人、衛星、月面実験など実験手段の多様化と連携運用

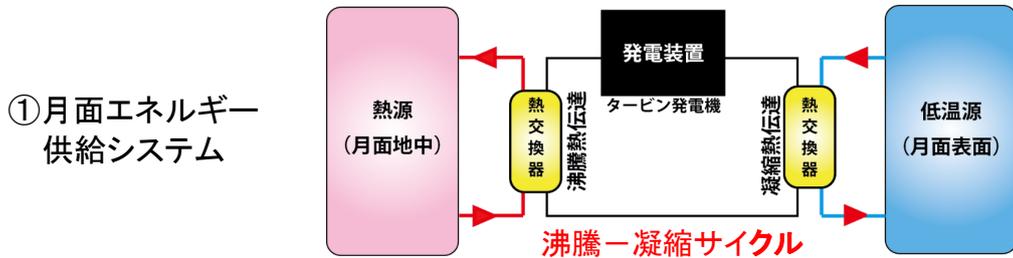
(1) その場製造(3Dプリンター)

- ① 月レゴリスの静電浮遊熱物性評価 (ISS 利用)
- ② レゴリス利用積層造形のための溶融凝固シミュレーション
- ③ 宇宙その場製造を目指した金属積層造形プロセスの最適化

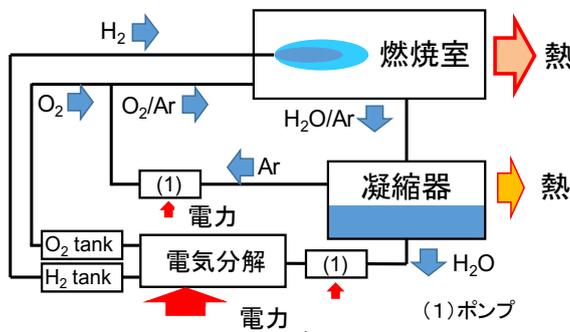


(2) 熱エネルギー開発

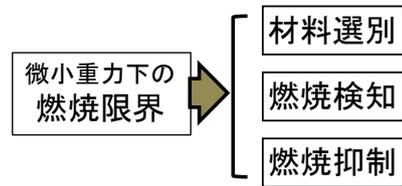
- ①ランキンサイクルを用いた月面エネルギー供給システム
- ②月で得られる水素を利用した循環型燃焼装置(熱源)の開発
- ③パーシャルグラビティ環境での火災安全プロトコルの構築



②水素を利用した 燃料循環型燃焼器



③火災安全プロトコル (ISS利用)



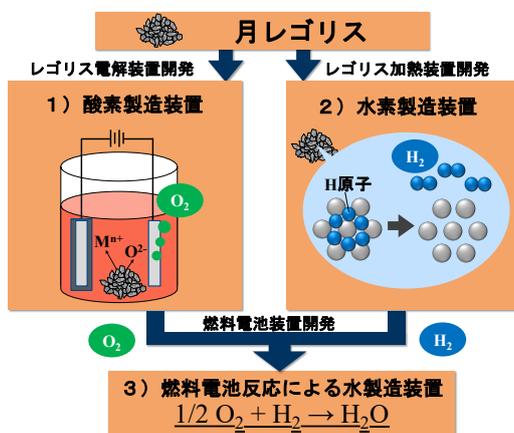
(3) 月面資源開発(レゴリス利用)

- ①プラズマ-レゴリス相互作用による微粒子制御と水素回収
- ②月レゴリスからの酸素、水素および水の製造技術
- ③その場資源利用を可能とする鉱物製錬・抽出プロセス

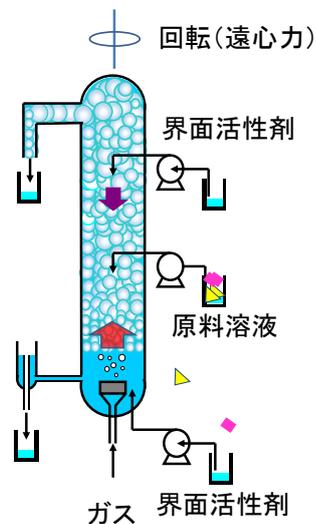
①レゴリス粒子のプラズマ制御



②酸素・水素・水の製造



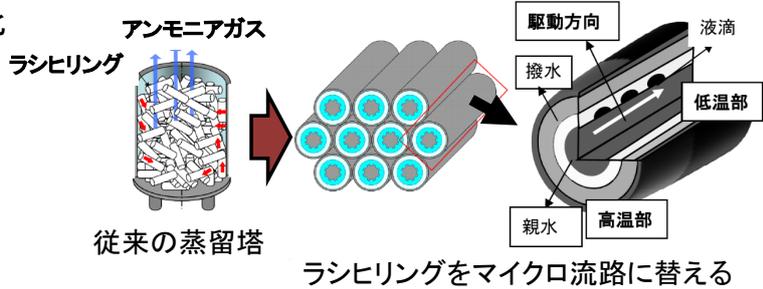
③鉱物製錬・抽出プロセス



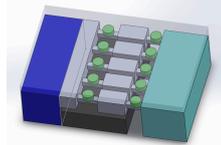
(4) 水・空気環境浄化

- ① マランゴニ流を用いた水浄化実験
- ② 匂い環境計測及び光触媒による浄化実験
- ③ 自己集積型コロイド光触媒

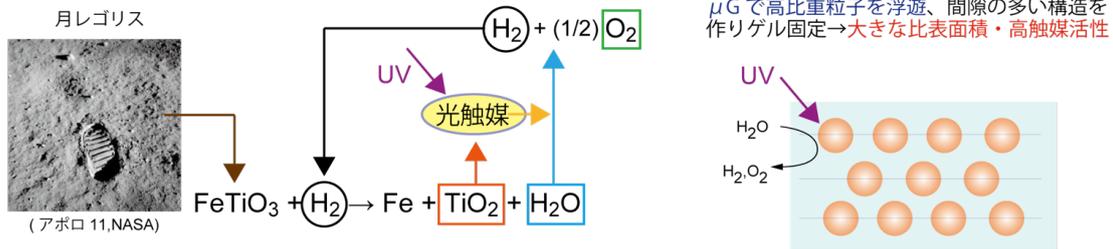
① マランゴニ流駆動水浄化



② 光触媒利用脱臭装置



③ 自己集積型高活性光触媒



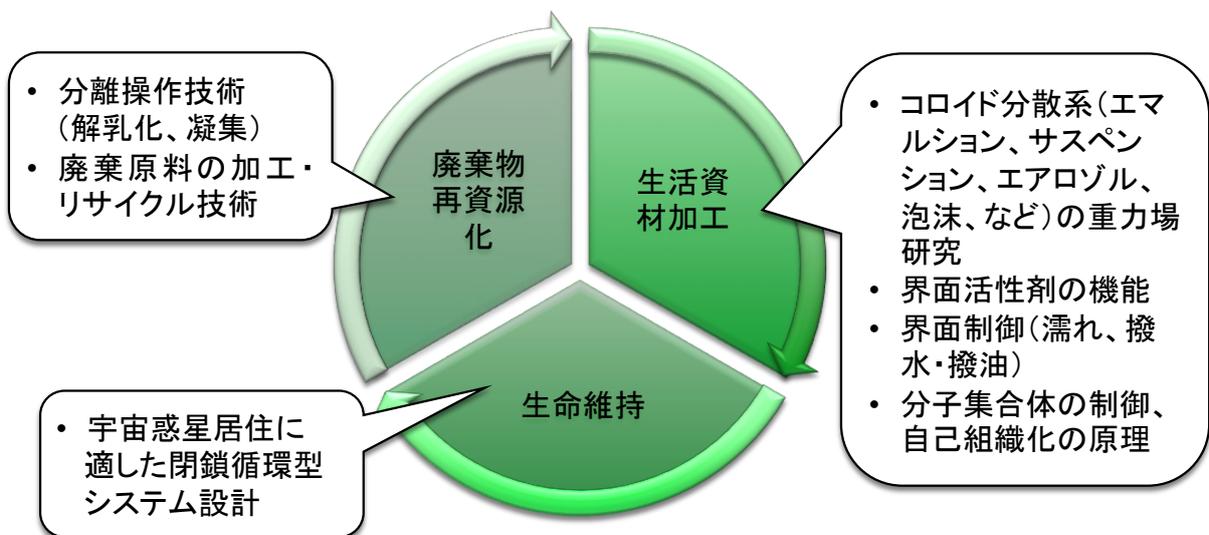
レゴリス中のチタン鉄鉱からのTiO₂合成と、その光触媒作用によるO₂生成(副成するH₂はTiO₂合成に利用可)

TiO₂粒子の自己集積構造と高効率光触媒

(5) 生活安全・リサイクル

非平衡コロイド分散系のダイナミクス実験(ISS 利用)

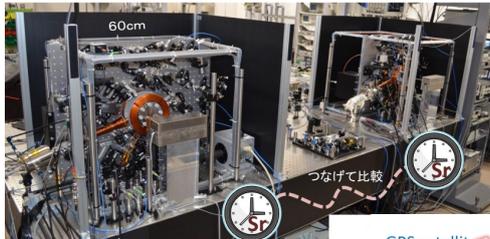
- ① 生活資材の加工
- ② 閉鎖循環型生命維持技術
- ③ 廃棄物の再資源化



(6) 時間標準 (GPS 周波数標準)

光格子時計による超高精度周波数標準 (共通時間標準)

- ① 天体観測や月・地球観測の精度向上
- ② 月面ローバー探査測位・精密自動制御
- ③ 月地殻変動の測定
- ④ 月面重力アノマリー観測に基づく資源探査、など



2台の低温動作・光格子時計を比較する

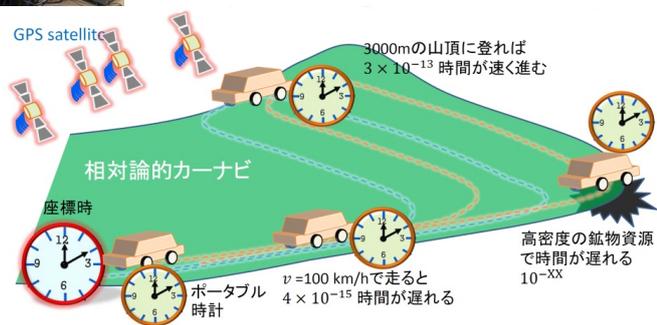


時間を18桁の精度で測定
※従来のCs時計は15桁

相対論測地学

超精密な光格子時計は
重力ポテンシャル計になる

2点間原子発光の周波数ずれを計測
親機と子機間で重力差計測が可能
※2cmの高低差を計測実証済み



5. まとめ

最後に、いよいよ始まる有人惑星探査の時代に向けて、微小重力科学研究コミュニティが連携して進めるべき方向性についてまとめておきます。

① ISS 科学研究の成果の実証・発展

月面の重力場 (0.17G は 0G と 1G を補間する) を利用して、ISS で行われた微小重力科学研究の成果を実証・発展させる。特に、極低温、低磁場、太陽放射線など月環境固有の特性と組み合わせることによって、地球環境では困難な科学研究 (物理科学、生命科学、応用科学) を推進する。

② 有人惑星探査の経済性・安全性の追求

有人宇宙活動を月及び火星にまで広げるためには、快適な衣・食・住、エネルギー供給、通信網、製造・リサイクル、その場資源利用など、惑星居住に関わる技術開発が避けられない。そのために我が国に優位性のある地上技術の橋渡しを進め、月惑星探査の経済性・安全性を高める技術の確立に貢献する。

③ JAXA・大学・民間の垣根を越えた宇宙実験プロジェクトの推進

国際協力の下に Gateway 計画・有人月探査計画が進む中、我が国の小型月着陸実証機計画、これに続く後継ミッションを見据えた研究プロジェクトを大学・国研・民間の協力の下に推進する。

謝辞

微小重力科学を惑星居住技術へと応用展開するにあたって、以下の皆様から極めて示唆に富むご提案をいただきました。この場を借りて、篤くお礼申し上げます。

領域	工学・技術提言	提案者
材料科学	・月レゴリスの静電浮遊熱物性評価	JAXA 石川毅彦
	・その場資源利用を可能とする鉱物製錬・精錬プロセス	大阪大 岡野泰則
	・宇宙その場製造を目指した金属積層造形プロセスの最適化	千葉工大 小澤俊平
流体科学	・レゴリス利用積層造形のための熔融凝固シミュレーション	JAXA 松本 聡
	・ランキンサイクルを用いた月面エネルギー供給システム	兵庫県立大 河南 治 室蘭工大 今井良二
燃焼科学	・パーシャル重力環境での火災安全プロトコルの構築	北海道大 藤田 修
	・月で得られる水素を利用した循環型燃焼装置の開発	日大 野村浩司
化学工学	・月レゴリスからの酸素、水素および水の製造技術	同志社大 後藤琢也
	・マランゴニを用いた水浄化実験	大阪大 岡野泰則
	・匂い環境計測及び光触媒による浄化実験	東京理科大 木村真一
コロイド 界面科学	・自己集積型コロイド光触媒材料	名古屋市立大 山中淳平
	・非平衡コロイド分散系のダイナミクス実験	千葉科学大 山下裕司
基礎物理	・プラズマレゴリス相互作用による微粒子制御と水素回収	京都工繊大 高橋和生
	・地球・宇宙空間を含めた超高精度周波数標準の構築	理化学研究所 香取秀俊
実験手段	・多様な小規模実験プラットフォームの確立	神戸大 上野宗孝