

# 微生物研究から見た惑星保護の現状と 持続可能な有人活動との両立について

木村駿太

JAXA 宇宙科学研究所 学際科学研究系 / 宇宙探査イノベーションハブ

1. 惑星保護の概要
2. 月に関わる惑星保護方針
3. 月面有人活動における微生物
4. 惑星保護と微生物利用の両立について
5. まとめ



## 惑星保護 (planetary protection)

**地球のもので他の星を汚さない、  
他の星のもので地球を汚さない**

- ・ 国際宇宙空間研究委員会 (Committee on Space Research; COSPAR) の規定する惑星保護方針 (Planetary Protection Policy; PPP) に準拠した宇宙機の開発および運用に係るアクティビティであり、主として**探査対象天体の保全**と、**対象天体から帰還あるいはサンプルを回収する際の地球-月系の環境保護**から構成される。
- ・ 宇宙条約の6条および9条を根拠としている。
- ・ 惑星探査方針そのものは法律ではないが、国際条約に準ずるものとして取り扱われる。
- ・ 非政府団体が実施する活動を含めて、惑星保護の最終責任は政府が有する。
- ・ 我が国においては、**人工衛星の管理に関わる許可に関わる法律およびガイドラインにおいて**、「**宇宙開発利用は**、条約や国際約束の定めるところに従い、宇宙開発利用が環境に与える影響に配慮して行わなければならない。地球以外の天体に人工衛星やその一部を投入する際、また投入した人工衛星やその一部を地球に回収する際には、**COSPARのPPPに準拠すること**」と記載されている (一部抜粋)。

WE WERE BETTER OFF ALONE



JAKE GYLLENHAAL

REBECCA FERGUSON

RYAN REYNOLDS

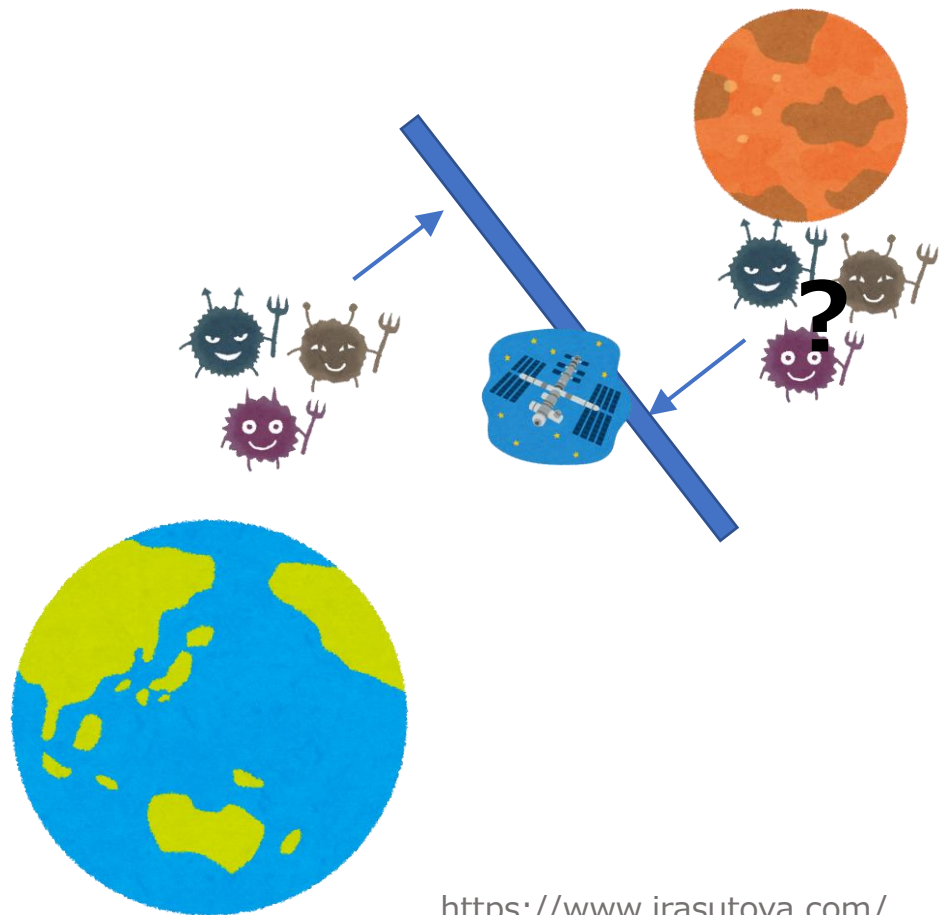
L I F E

MARCH 24

COLUMBIA PICTURES AND SKYDANCE PRESENT A SKYDANCE PRODUCTION A FILM BY DANIEL ESPINOSA JAKE GYLLENHAAL REBECCA FERGUSON RYAN REYNOLDS "LIFE" MIROYINKI SAKAGA  
ARIYON BAKARE OLEGA DUDYCHNAYA \*\*\* JON ESKRAND DESIGN JENNY DEVAAN \*\*\*FRANCES PARKER ASC MARY JO MARKEY ASC \*\*\*CHRISTOPHER PHELPS  
PRODUCED BY SEANUS McGARVEY ASC EXEC PRODUCED BY DON GRANGER VICKI DEE ROCK \*\*\*BRIETT REESE & PAUL WERNICK \*\*\*DAVID ELLISON DANA GOLDBERG BONNIE CURTIS JULIE LYNN  
SKYDANCE #LifeMovie SONY

エイリアンがいた際に、  
地球に来ないようにするのも  
惑星保護の範疇

現状は微生物汚染を防ぐことが主眼



<https://www.irasutoya.com/>

<https://www.medicalexpo.com/ja/prod/esco/product-75366-542305.html>

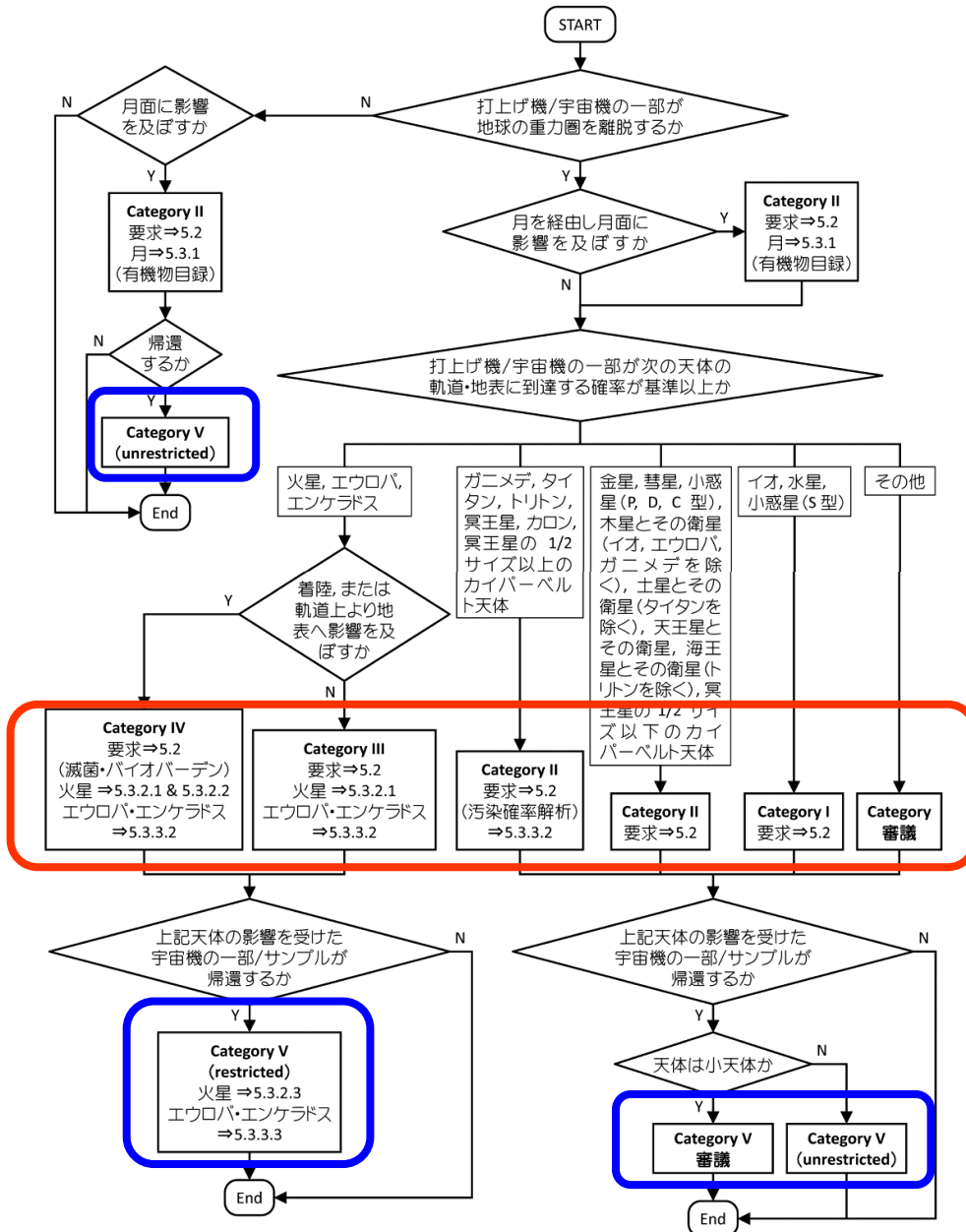
惑星保護モノのSF (ホラー) 映画

# 惑星保護 (planetary protection)

**フォワード** (往路側)  
**バックワード** (復路側)  
 それぞれの汚染を防ぐ取組み

惑星保護方針は、  
 対象天体の汚染が将来の調査に  
 悪影響を及ぼすことへの  
 重要性と懸念を反映して、  
**カテゴリ分け**されている

**火星、木星の衛星エウロパ、  
 土星の衛星エンケラドス**  
 →地球から生命を持ち込んだ  
 際に増殖してしまう可能性が  
 比較的高いので厳しい基準  
**(保護すべき天体)**



## 惑星保護カテゴリ（フォワード汚染側（1/2））

### <カテゴリⅠ>

S型小天体，木星の衛星・イオ，水星

要求：なし

### <カテゴリⅡ>

はやぶさ2など

(1)金星，彗星，小惑星小天体（P型，D型，およびC型），木星，木星の衛星（イオ，エウロパ，およびガニメデを除く），土星，土星の衛星（タイタン，エンケラドスを除く），天王星，天王星の衛星，海王星，海王星の衛星（トリトンを除く），冥王星の1/2サイズ以下のカイパーベルト天体.

(2)月.

(3)木星の衛星・ガニメデ，土星の衛星・タイタン，海王星の衛星・トリトン，冥王星／カロン，冥王星の1/2サイズ以上のカイパーベルト天体.

要求：惑星保護文書要求をテーラリングした簡易な文書作成. 適用対象2（月）については**有機物目録**. 適用対象3については汚染確率解析.

## 惑星保護カテゴリ（フォワード汚染側（2/2））

### <カテゴリⅢ>

保護される太陽系天体へのフライバイおよび周回ミッション。  
火星，木星の衛星・エウロパ，土星の衛星・エンケラドス。

**要求：**惑星保護文書要求に準拠した詳細な文書作成。有機物目録。衝突確率解析，汚染確率解析。

→これまでのノウハウで達成可能か

### <カテゴリⅣ>

Mars2020など

保護される太陽系天体への地表ミッション。  
火星，木星の衛星・エウロパ，土星の衛星・エンケラドス。

**要求：**惑星保護文書要求に準拠した詳細な文書作成。有機物目録，有機物サンプルの保管。材料，部品，組立品，および設備に対するバイオバーデン（生物汚染量）管理および滅菌バリデーション（定量的評価）

→データ取得・開発が必要

## 5.3.2.2. 火星着陸表面ミッション要求

### 5.3.2.2.2. 一般要求

a) 着陸システム全体のバイオバーデンは、露出した内面および外面において、細胞芽胞 $3 \times 10^5$ 個以下であること。 b) 着陸システムの平均バイオバーデンは、露出した内面及び外面において、細胞芽胞密度 $300$ 個/ $m^2$ 以下であること。

#### ・生命探査を伴う表面ミッションに対する要求

生命探査を伴う表面ミッションは、惑星保護カテゴリIVbと定義される。

a) 以下の条件のうちいずれかを満足しなければならない：

1. 地表システム全体のバイオバーデンは、露出した内面および外面において、細胞芽胞 $30$ 個以下であること。または、目的とする生命検出調査の性質と感度によって要求される汚染レベル以下であること。

2. 生命検出調査に用いるサンプルの採取、輸送、および分析に關与するサブシステムの平均バイオバーデンは、次のいずれかとする：

(a) 細胞芽胞密度 $0.03$ 個/ $m^2$ 以下であること、または

(b) 目的とする生命検出調査の性質と感度によって要求される汚染レベル以下であること。さらに、これらのサブシステムおよび分析対象となるサンプルの再汚染防止措置を、生命検出調査が終了するまで維持すること。

#### ・火星特別地域にアクセスする表面ミッションに対する要求

火星特別地域にアクセスする表面ミッションは、惑星保護カテゴリIVcと定義される。

a) 着陸地点が3.1.22項に示される火星特別地域内である場合、地表システム全体のバイオバーデンは、露出した内面および外面において、細胞芽胞 $30$ 個以下であること。

## 惑星保護カテゴリ（バックワード汚染側）

### <カテゴリV>

はやぶさ、はやぶさ2など

#### a) 制約のない地球帰還

金星，月，S型小天体（B型，C型，およびS型），木星の衛星・イオ，水星など等。ただし，小天体については原則として都度判断する。

#### b) 制約付き地球帰還

MSR（予定）

火星，木星の衛星・エウロパ，土星の衛星・エンケラドス。ただし，原則として都度判断する。

**要求**：a) **制約のない地球帰還**：往路行程のカテゴリに対応して（一般にはカテゴリIまたはII），当該フェーズにおける惑星保護要求のみを有する。

b) **制約付き地球帰還**：**(1)** 対象天体，あるいは対象天体に由来する物質で滅菌されていないものに直接接触したハードウェアのうち，**帰還するものすべてについて，全帰還フェーズにおいて封じ込めを行う**こと。対象天体に影響を受けた宇宙機，宇宙機の一部，あるいはサンプルであって，滅菌されていないものについては，帰還するものすべてについて，全帰還フェーズにおいて封じ込めを行うこと。ここで封じ込めとは，滅菌されていない10 nm以上の粒子1個が外部へ漏洩する確率を $10^{-6}$ 以下とすること，を指す。**(2)**採取され地球へ帰還するすべての滅菌されていないサンプルに対して，封じ込めを行うこと。**(3)**採取され地球へ帰還したすべての滅菌されていないサンプルに対して，**厳格な封じ込め環境において，最も感度の高い手法によって，適時分析を実施すること**。地球由来ではない増殖体の存在の徴候が認められる場合，**有効な滅菌法によって処理しない限り，帰還したサンプルは封じ込めたままとすること**。ここで厳格な封じ込めとは，滅菌されていない10 nm以上の粒子1個が外部へ漏洩する確率を $10^{-6}$ 以下とすること，を指す。

→封じ込め、滅菌に関する設備の獲得等が必要



## 基本方針：

火星、木星の衛星エウロパ、土星の衛星エンケラドスに行く場合は、厳密な微生物制御が必要。

それ以外に行く場合は、探査機が制御不能になった際にも上記の天体に衝突しないことを示すことなどが必要。

有人に関してはまた別途検討が必要。

惑星保護における主要な3つの技術：

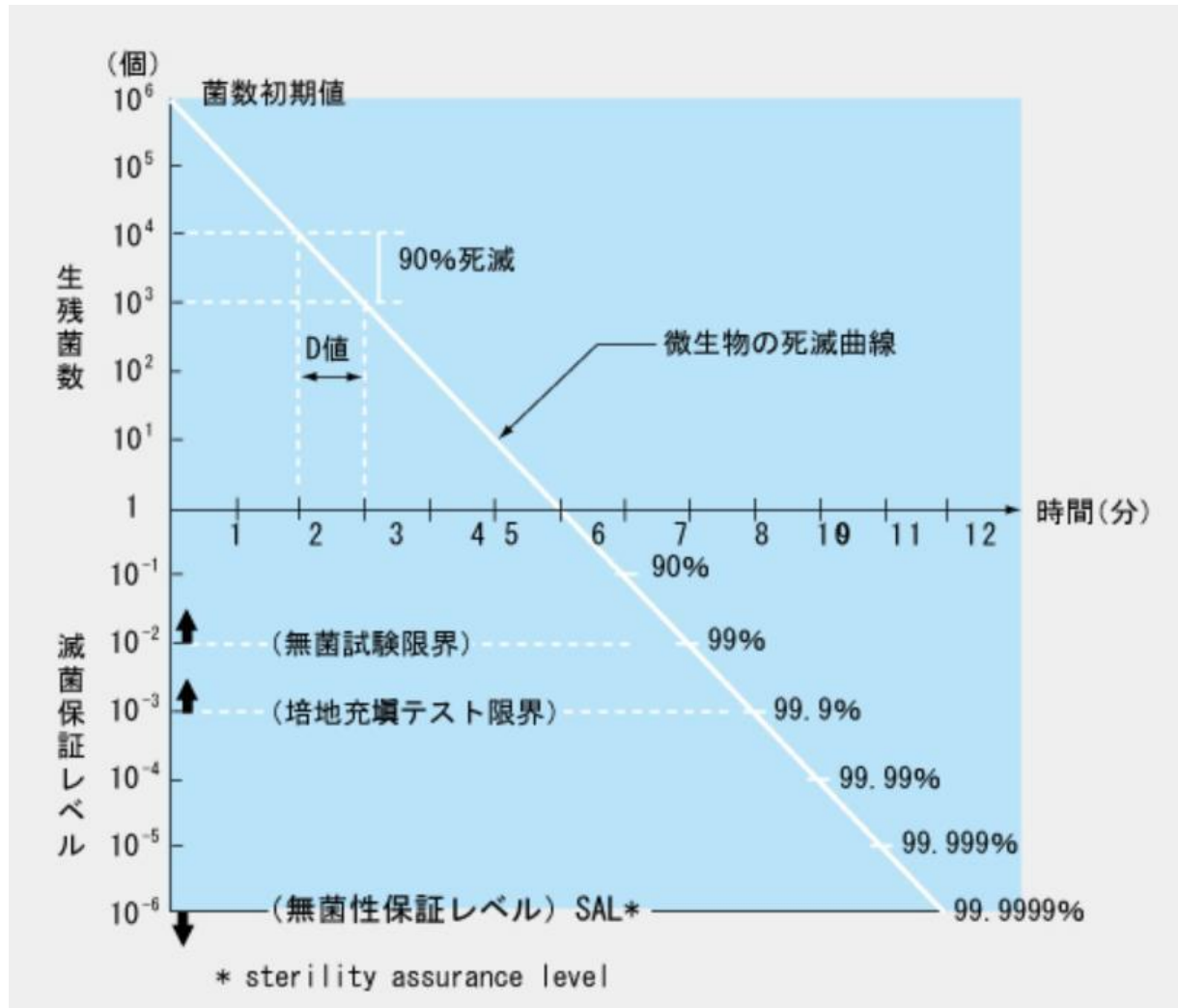
- ① 宇宙機の衝突確率解析・汚染確率解析
- ② 滅菌バリデーション（定量的評価）
- ③ バイオバーデン（生物汚染量）管理

①は「のぞみ」や「はやぶさ」をはじめとするプロジェクトにおいて技術的な蓄積がある。一方、過去に火星着陸探査を実施したことがない我が国は、②及び③の技術を保持していない。

今、②を獲得中。

## 惑星保護に係る微生物研究において有力な滅菌手法の例


	長所	短所
紫外線	低コスト、短時間	表面のみ。素材の劣化。
高圧蒸気（オートクレーブ）	低コスト、短時間、液体の滅菌可	対象が濡れる。大型の滅菌は困難非耐熱性熱素材は不可（115-134°C）。
アルコール	低コスト。短時間。	表面のみ。対象が水とアルコールで濡れる。
乾熱	COSPARに承認されている。簡便。	高コスト、長時間。非耐熱性熱素材は不可（160-190°C）。
過酸化水素蒸気（VHP）	COSPARに承認されている。低温（常温）、短時間、有害ガス排出が少ない。	日本の宇宙科学コミュニティは未獲得。高コスト。布、紙類、液体、粉体、狭空物は不可。
各種プラズマ滅菌	低温（常温）、狭空物への適応可能性。可搬可能性。	日本の宇宙科学コミュニティは未獲得。高コスト。布、紙類、液体は不可。



滅菌法・消毒法概説 ([http://www.yoshida-pharm.com/2012/text02\\_01/](http://www.yoshida-pharm.com/2012/text02_01/))

JMR-014

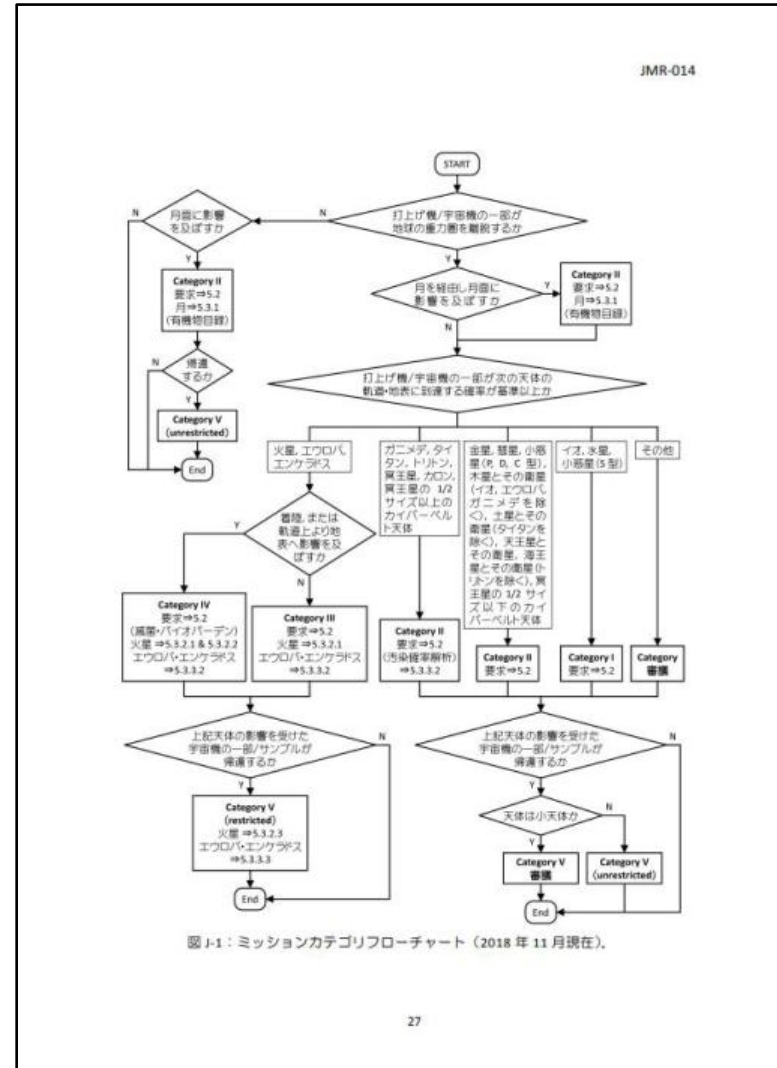
限定なし



## 惑星等保護プログラム標準

平成 31 年 2 月 21 日 制定

宇宙航空研究開発機構



### 5.3.1. 月ミッション要求

a) プロジェクトは、宇宙機上で使用されているものを積算した総量が、惑星等保護審査部会長と合意している上限値（通常は1 kg）を上回る有機物について、付録HのDRDを遵守し、**有機物目録を提出**すること。

#### 付録 H. (適用) 有機物目録 – DRD

##### H.1. DRDの識別

###### H.1.1. 要求の識別および根拠文書

このDRDは、本標準の5.3.1a項および5.3.2.1a項の要求による。

###### H.1.2. 目的および目標

有機物目録の目的は、宇宙機が有する有機物を文書化することである。

##### H.2. 期待する対応

###### H.2.1. 内容

a) 有機物目録は、規定の上限値を上回る有機物それぞれについて、以下の項目を含むこと。

1. 識別名.
2. 化学組成.
3. 製品ツリーの中における位置付け・使用形態.
4. 質量.
5. JMR-010（コンタミネーション管理標準）ならびにJERG-0-019（コンタミネーション管理ハンドブック）に準拠したアウトガスの評価値およびその根拠となる参照資料.
6. 製造業者.

b) フライバイおよび重力アシスト・マヌーバを含む月ミッションに対しては、推進システムおよび生命維持システムを使用する場合、これらのシステムから月の影響圏へ排出される生成物について、以下の内容を含め記載すること。

1. 主要な化学物質の定量的および定性的な説明
2. 微量な化学物質およびその量の提示

**月：かつては、帰還カプセルの消毒、クルーを隔離して月の病原菌にかかっていないか確認、月の石を隔離して生命がいるか調べたりした → 今は軽微な対応**



*COSPAR updates its Planetary Protection Policy for missions to the Moon's surface*

15 July 2021

embargoed until

for immediate release

COSPAR, the Committee on Space Research, and its Panel on Planetary Protection (PPP) have recommended on 18 May 2021 that missions to the Moon would remain under the general terms of COSPAR Planetary Protection Policy Category II, but have **added two sub-categories** for lunar surface missions.

### II a

#### ほぼ全ての領域（99%以上）

推進システムによって  
放出される有機物に限定

### II b

#### 永久影領域（1%未満）

Shadowed Regions (PSRs) and the lunar poles, in particular latitudes south of 79° S and north of 86° N

完全な有機物目録が要求される

推進システムおよび生命維持装置によって月環境に放出される可能性のある有機物、および宇宙船によって運ばれる総質量が1kgを超える有機物が含まれる。

**月の惑星保護は負担軽減傾向。有人活動や、民間も含めた月面探査には追い風。**

（ただし、ムーンビレッジ級は想定していないと思われる）

惑星保護要求として滅菌・洗浄は必要ないが、科学要求や安全面からは、その都度検討されるべき。

- ・ 滅菌対象としての微生物
- ・ 共存対象としての微生物
- ・ 利用対象としての微生物

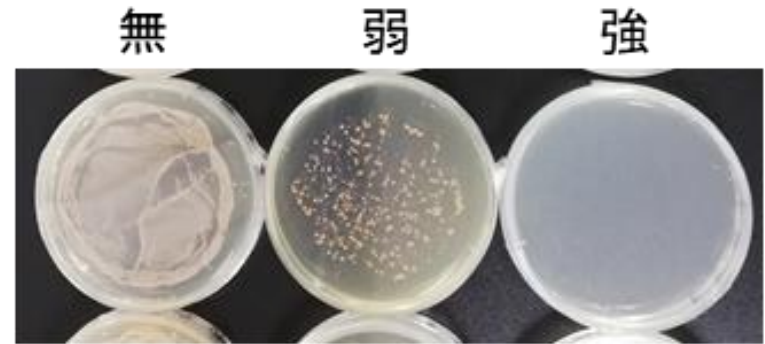


図2：滅菌操作の無（左）、弱（中央）、強（右）後の微生物の生育

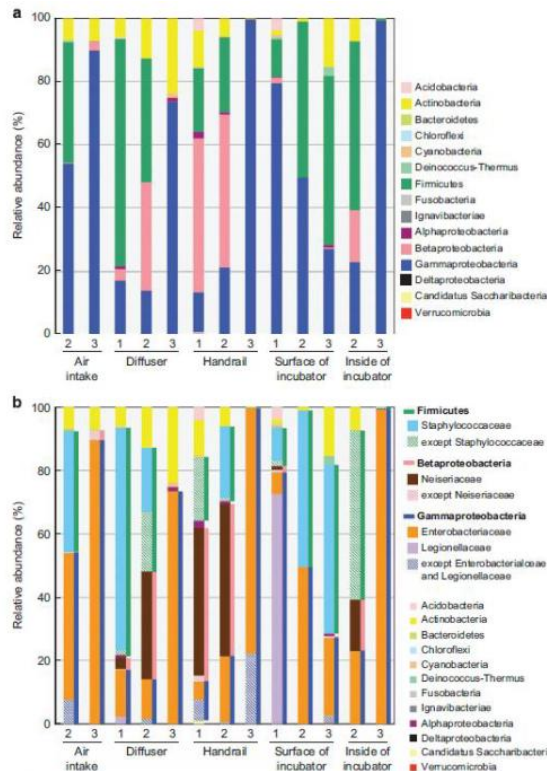
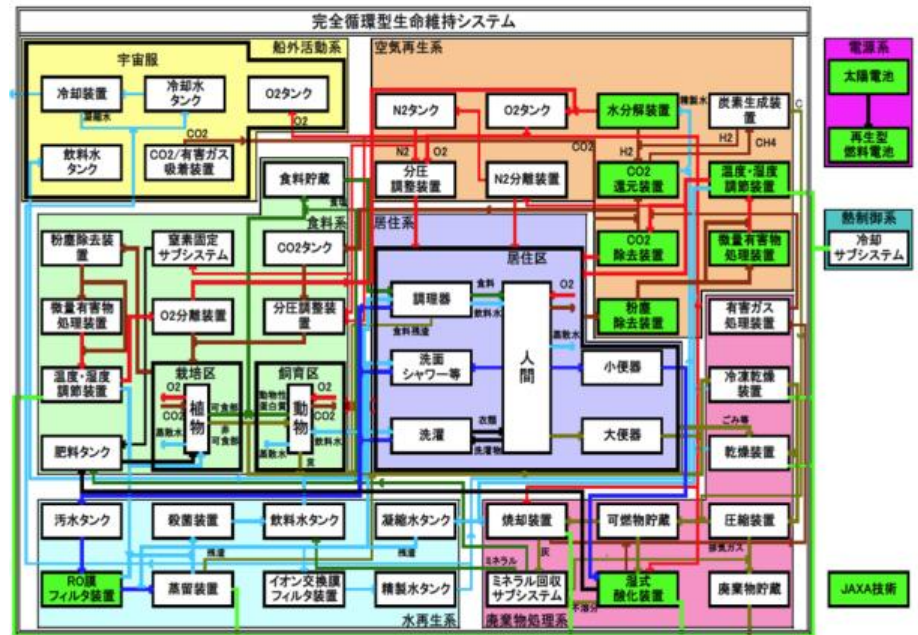


Figure 1. Bacterial community structure on the interior surfaces in Kibo. (a) At the phylum level. (b) Expanding beta- and gamma-Proteobacteria and Firmicutes to the family level.

(Ichijo+2016)



(大西, 2007)

#### 滅菌対象としての微生物：

**基本方針（私見）：**（現在の惑星保護方針では規定されていない部分の議論）

- ・ 持ち込む量を少なくすること（その技術・設備をもっていること）
- ・ 想定していない種類を持ち込まないこと（その技術・設備をもっていること）
- ・ 微生物をモニターすること（その技術・設備をもっていること）
- ・ 必要に応じて滅菌すること（その技術・設備をもっていること）
- ・ 万が一に備えた対策を決めておくこと（その技術・設備をもっていること）

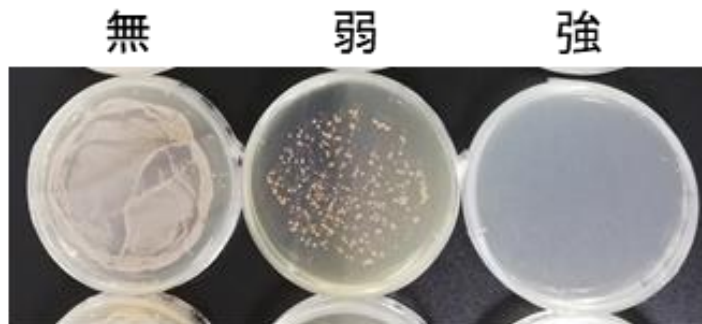
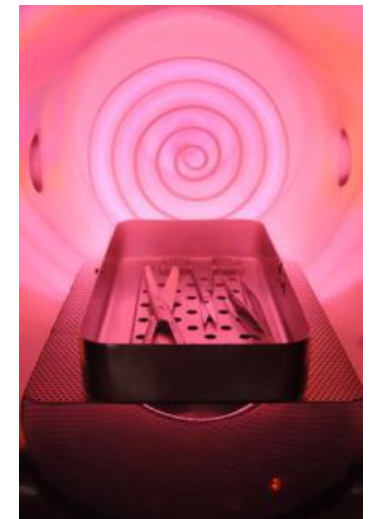


図2：滅菌操作の無（左）、弱（中央）、強（右）後の微生物の生育

（木村ら, 2022）

ムーンビレッジのような  
ステップでは、  
宇宙での医療行為に伴う  
滅菌も必要か





## 宇宙利用に望ましい滅菌技術とは

- ・ 効率的、効果的
- ・ 休眠細胞にも適用可能
- ・ 生体分子も分解可能
- ・ 探査機素材へ悪影響を与えない
- ・ 無人運用可能
- ・ 低残存性
- ・ 特別な試薬を用いない
- ・ 滅菌効果が検証可能（再現性があること）

### 宇宙探査イノベーションハブでは滅菌・検出研究を募集、実施中



研究テーマ	企業・機関名
可搬型大気圧プラズマ表面消毒装置の開発とその効果を簡便に目視判定する新しいバイオリジカルインジケータの提案	九州大学
人と環境とに完全に安全無害な高速低温酸素プラズマ滅菌器	株式会社ウドノ医機
無菌化およびバイオシグニチャー物質の除去を目的とした探査機の高度洗浄技術	関西大学

第9回研究提案募集（RFP）の課題設定に向けた情報提供の締切：2022年7月28日（木）

#### 共存対象としての微生物：

ヒトが行くならば無菌は不可能

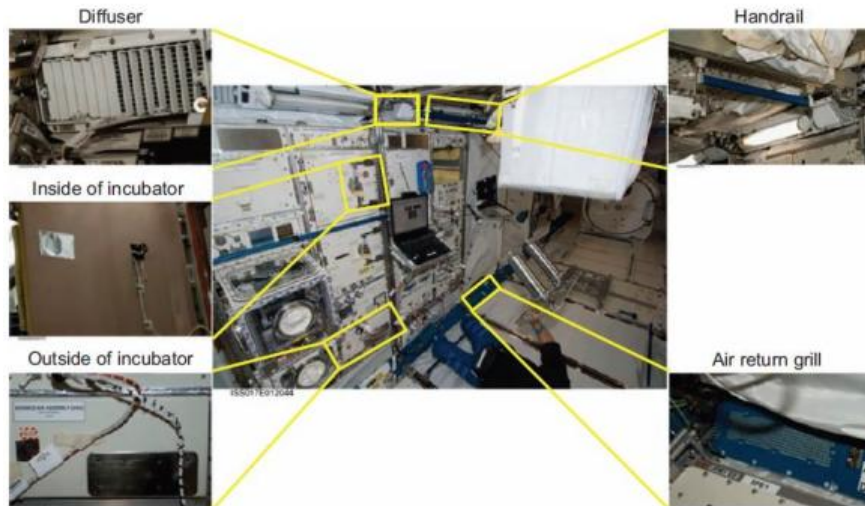


Figure 2. Photographs of sampling points in Kibo ((c) NASA/JAXA).

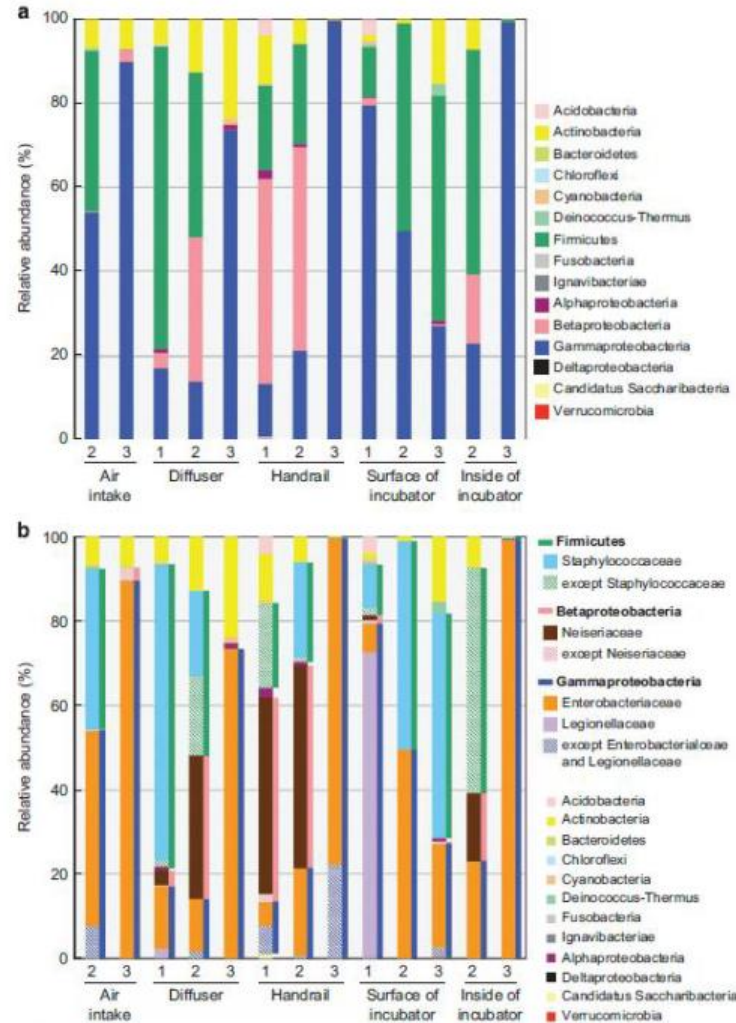


Figure 1. Bacterial community structure on the interior surfaces in Kibo. (a) At the phylum level. (b) Expanding beta- and gamma-Proteobacteria and Firmicutes to the family level.

ISS与圧室内：ヒトの常在微生物が優占

(Ichijo+2016)

## 共存対象としての微生物：

# 宇宙船内水環境微生物のオンボードモニタリング法の開発

Home / きぼう利用テーマ / 科学利用（生命医科学）

公開 2020年3月17日

## Micro Monitor

Development of the on-board monitoring system for microorganisms in potable water on manned spacecrafts



実施中

宇宙利用/実験期間

2021年～

研究目的

地球上空400kmを飛行するISS内の飲料水は極力再生水を使用しており、微生物がいないか培養検査で定期的に確認を行っています。しかし月・火星探査では、飲料水を地球に戻す機会が少ないことに加えて、検査までの時間的な遅延が課題となります。

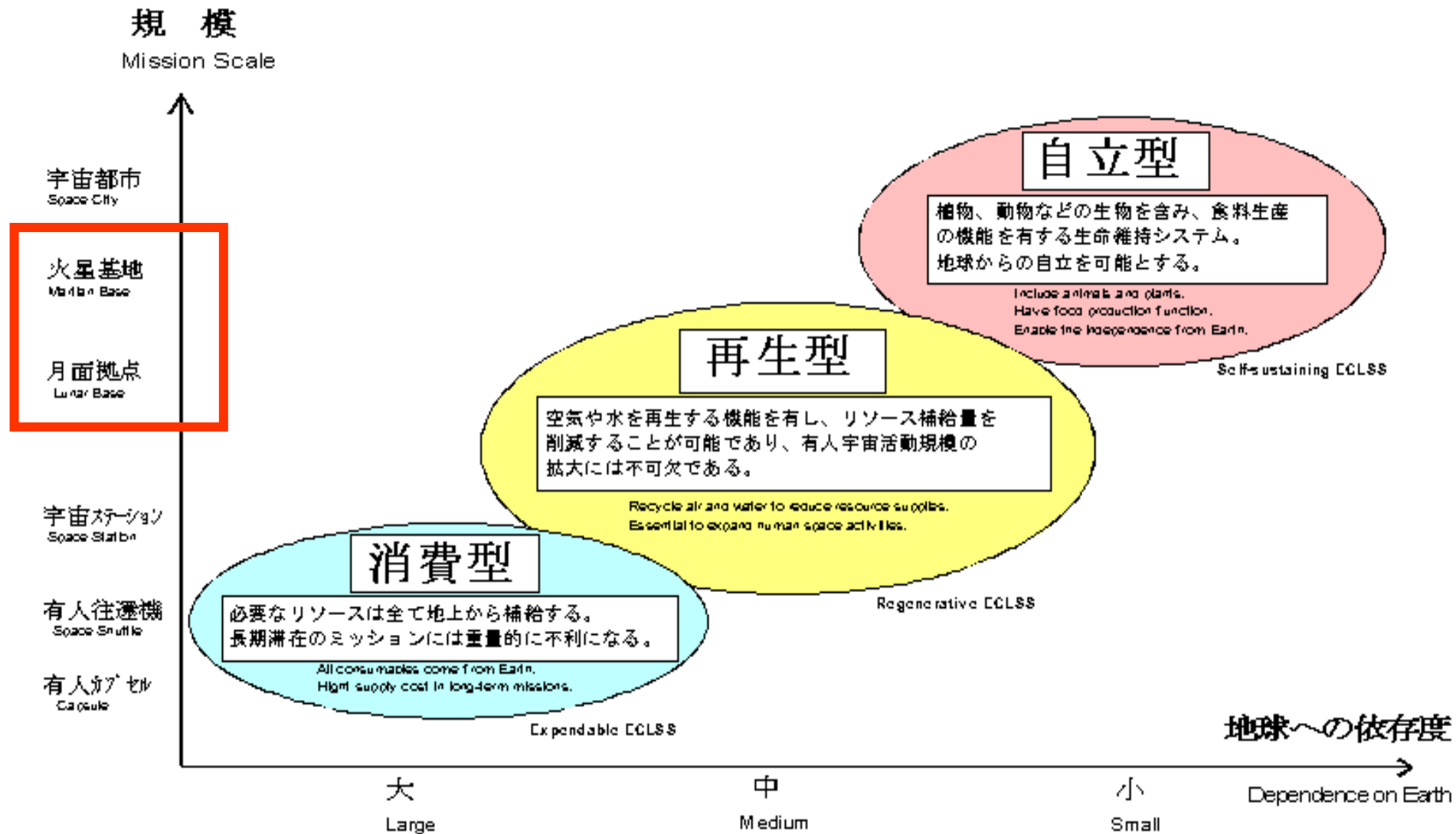
そこで、飲料水中の微生物の異常増殖を防ぐために、早い段階で軌道上の飲料水製造装置内の微生物を検出できる高精度なリアルタイムモニタリング法の開発が進められています。

この研究は、リボフラビン活性をもつ生物粒子を選択的に数えられる生物粒子計により微生物の量的変動データを計測することで、宇宙船内の飲料水に適用できる、新たな微生物管理法を提案することが目的です。

ISS水環境：モニタリング実施中

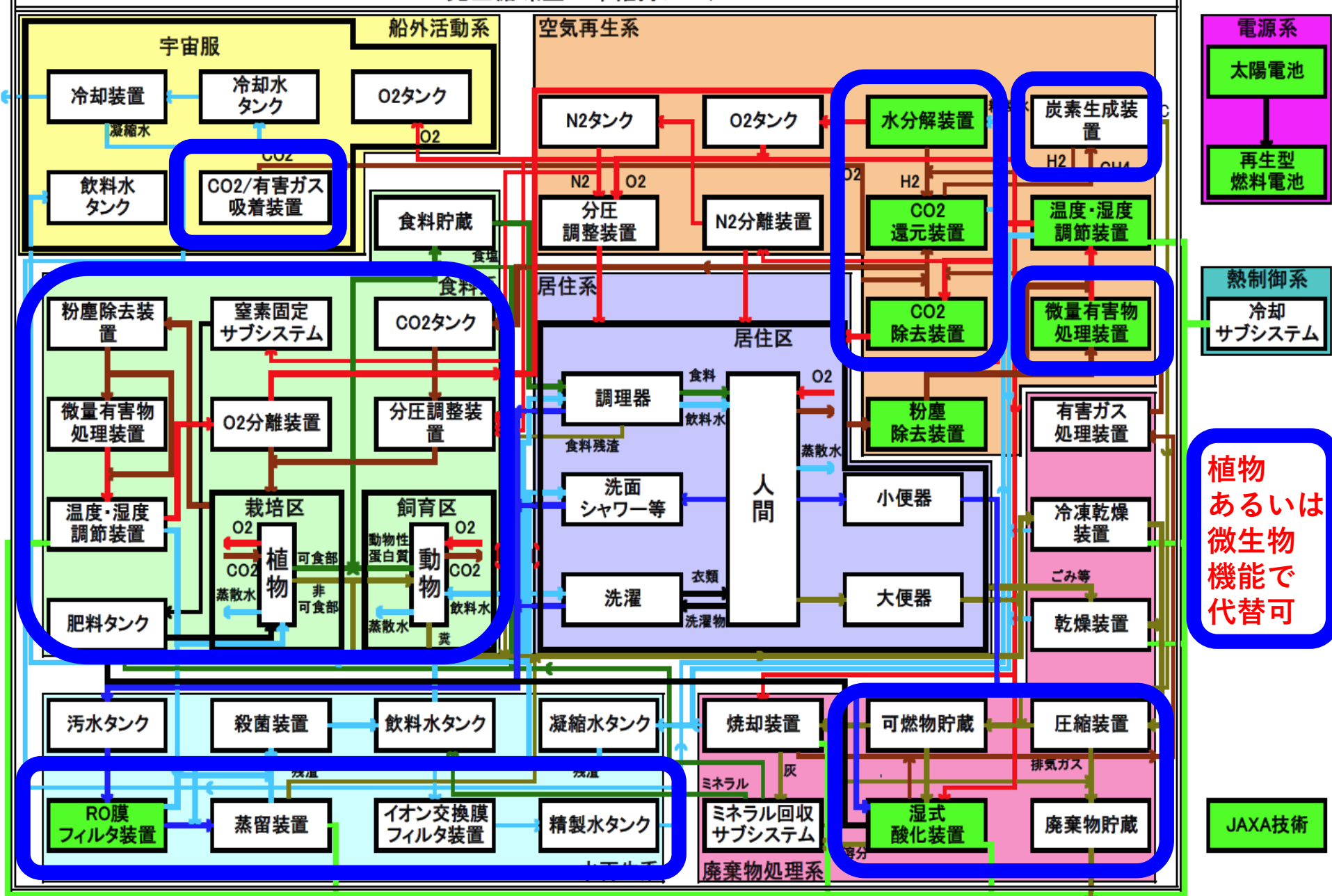
<https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/subject/life/70655.html>

#### 利用対象としての微生物：



(桜井, 2010; 下田, 2014)

# 完全循環型生命維持システム



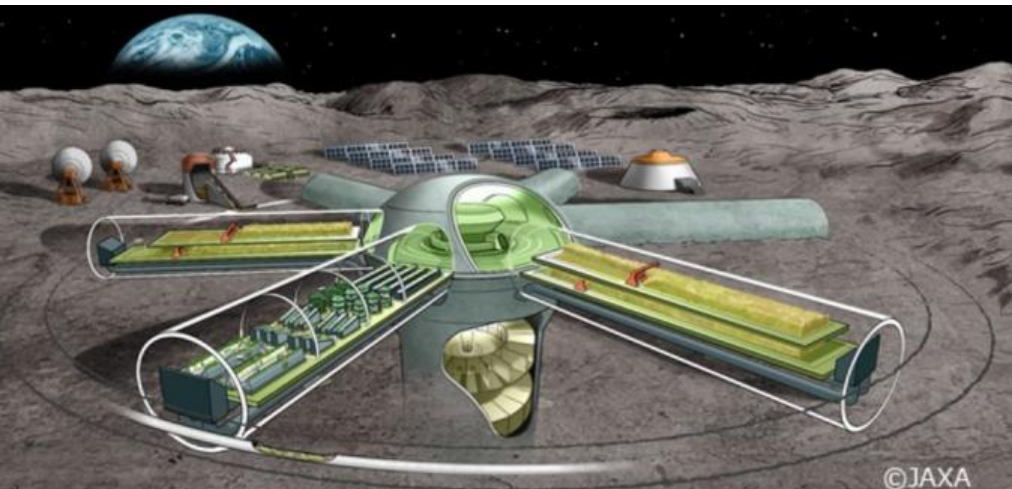
完全循環型生命維持システム (ECLSS) のイメージ (大西, 2007)

生物、使い放題（ばらまき放題）でいいのだろうか  
→ これから考えていく必要がある

不必要に月面を汚染することは避けるべきであると思われる。  
一方で、社会の形成には生物資源の利用は極めて有効である。

→きちんと区分けをすること、すなわち、隔離区画内で利用するけれども、ばらまかない、かつ、ばらまかれた際のリスクを下げることで、が両立に向けたポイントか。

アルテミス合意（2020年10月）の中で、  
宇宙資源の保護やデブリの軽減など、  
8か国間で認識の共通化と署名が行われた

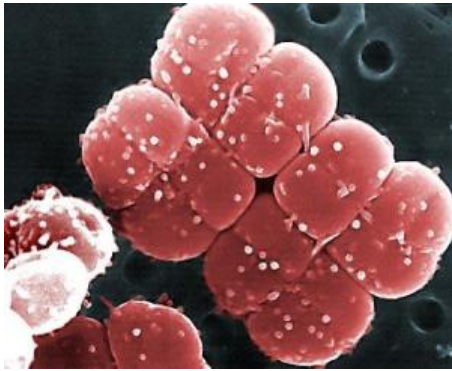


各国代表による署名の様子

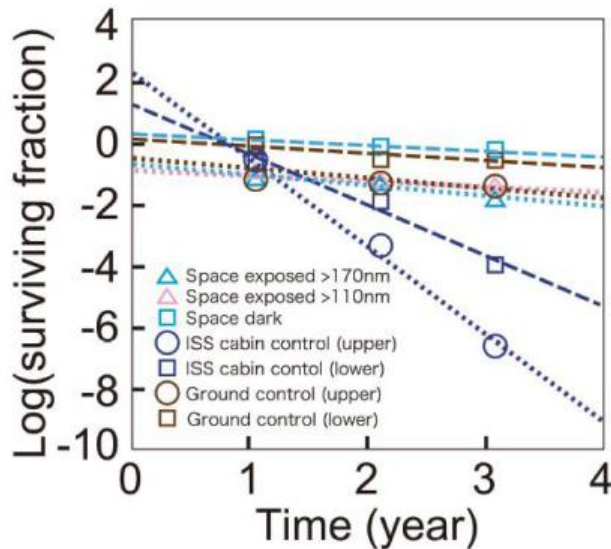
<https://www.nasa.gov/specials/artemis-accords/img/Artemis-Accords-signed-13Oct2020.pdf>

[https://www.mext.go.jp/b\\_menu/activity/detail/2020/20201014.html](https://www.mext.go.jp/b_menu/activity/detail/2020/20201014.html)

## Deinococcus の宇宙曝露 (たんぽぽ計画)



[https://microbewiki.kenyon.edu/index.php/File:D\\_radiodurans.jpg](https://microbewiki.kenyon.edu/index.php/File:D_radiodurans.jpg)



**TABLE 1** | Survival time estimated from the survival time course of *Deinococcus radiodurans* R1.

Space exposure condition	Thickness ( $\mu\text{m}$ )	Survival time* (year)	Expected survival time range in interplanetary space** (year)
MgF <sub>2</sub>	500	35.6 $\pm$ 0.5	4.3–6.1
	1,000	<b>43.4 <math>\pm</math> 0.2***</b>	5.2–7.5
	1,500	45.3 $\pm$ 0.5	5.5–7.8
SiO <sub>2</sub>	500	<b>14.8 <math>\pm</math> 0.5***</b>	1.8–2.6
	1,000	24.6 $\pm$ 0.7	3.0–4.2
	1,500	30.8 $\pm$ 0.7	3.7–5.3
Dark	1,000	<b>48.1 <math>\pm</math> 0.1***</b>	48.1 $\pm$ 0.1

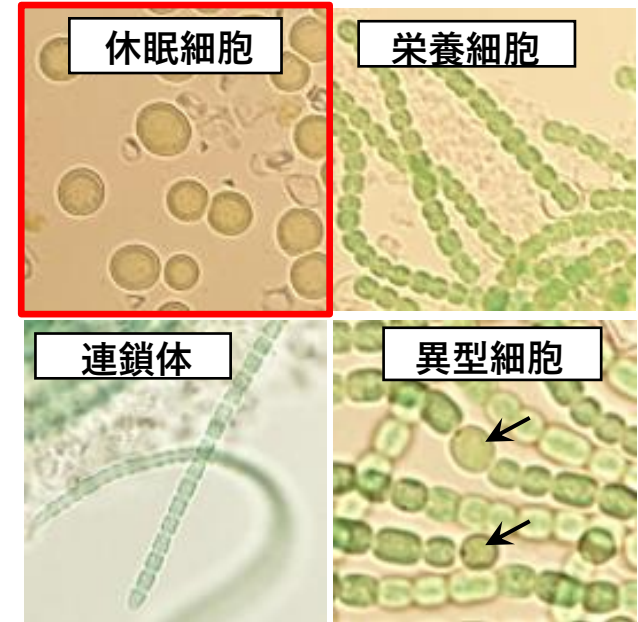
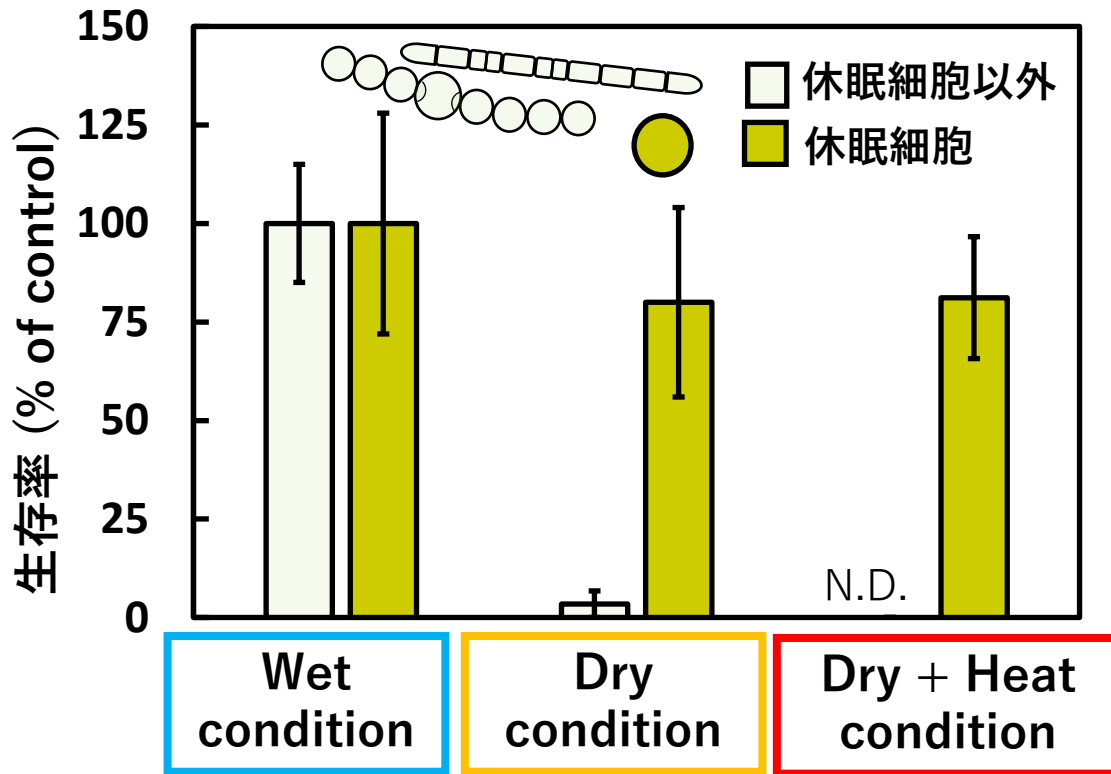
\*Survival time with 95% probability was estimated from the survival time course and initial cell numbers (**Supplementary Table 2**).

\*\*Expected survival time range was estimated from the survival time and the UV dose of the experiments (between 44 and 63 equivalent solar day (ESD)/year under MgF<sub>2</sub> window and between 41 and 58 ESD/year under quartz window in interplanetary space, **Supplementary Table 4**).

\*\*\*Expected survival time with the R<sup>2</sup> (coefficient of determination) higher than 0.7 (**Supplementary Table 5**) is shown in bold letters.

(Kawaguchi, Yamagishi et al., 2020)

遮光されている、あるいは菌体に500  $\mu\text{m}$ ほどの厚みがあれば、数年-数十年ほどの期間、宇宙空間で生き残ることが示された



乾燥耐性・乾熱耐性は、休眠細胞にのみ備わる

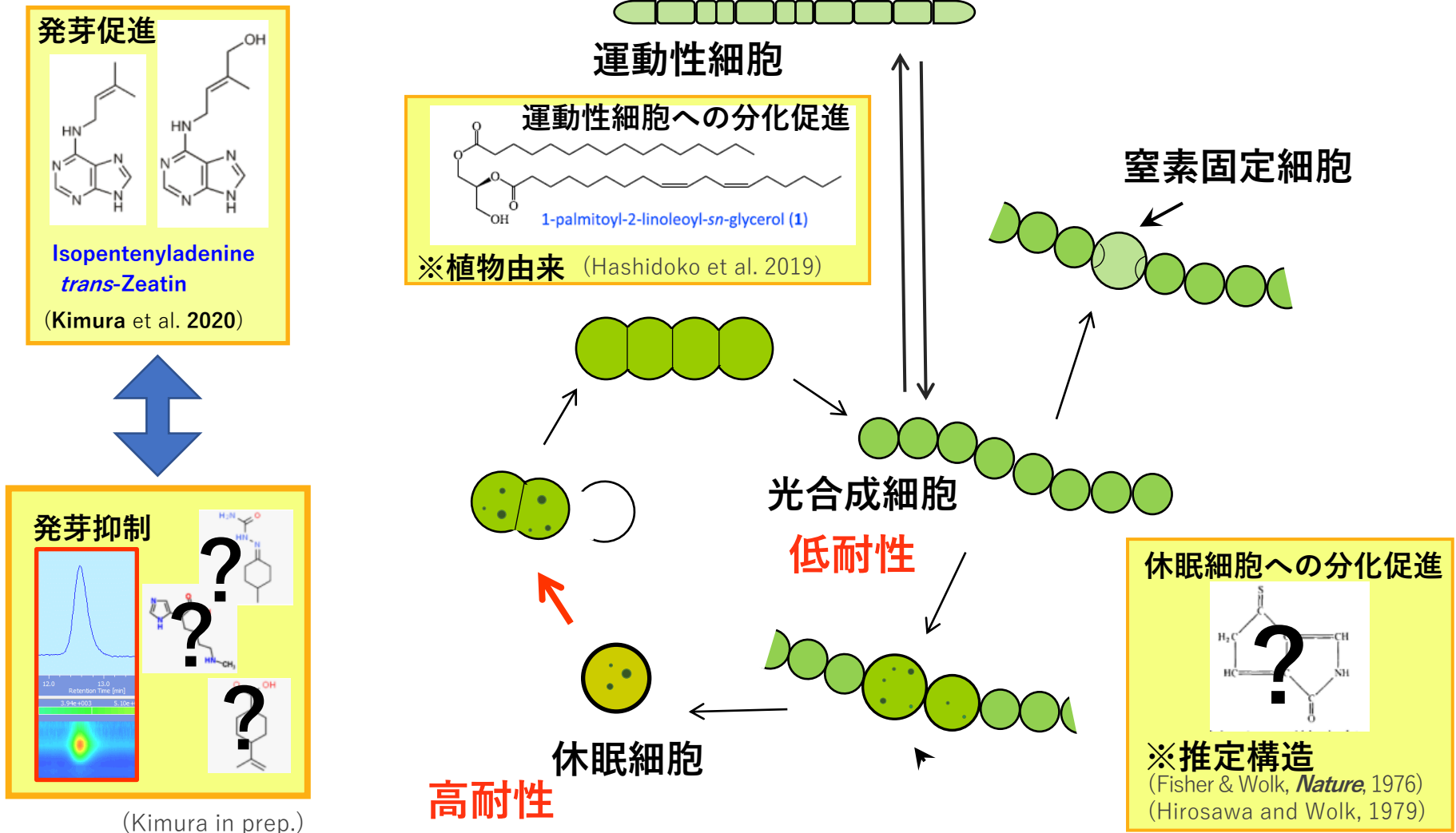
$$\text{生存率 (\%)} = \frac{\text{蛍光細胞数}}{\text{全藍藻細胞数}} \times 100$$

同じ微生物種であっても  
細胞の状態によって耐性が異なる

(Kimura, Tomita-Yokotani *et al. Biol. Sci. Space*, 2015 and 2017)



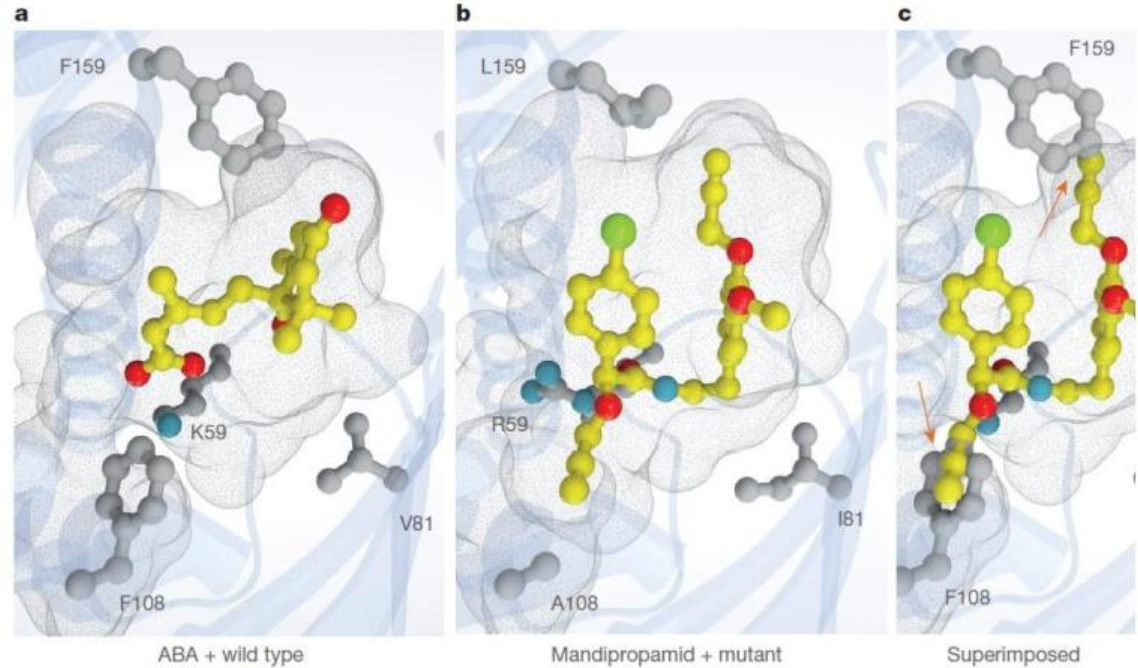
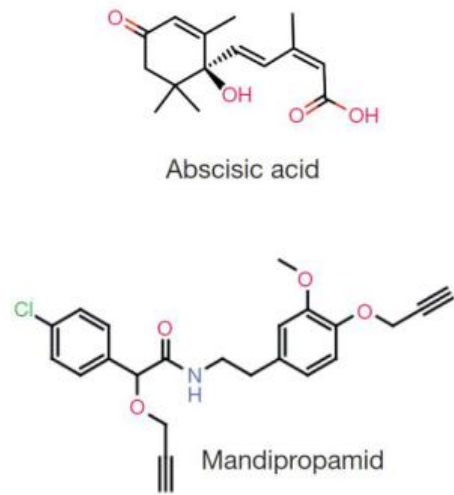
生長を制御できれば、容易・確実な滅菌も可能？



# 休眠研究を通じた 汚染リスクの少ない生命の開発 も可能になるかもしれない

## Agrochemical control of plant water use using engineered abscisic acid receptors

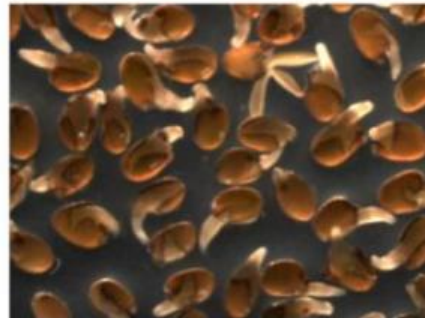
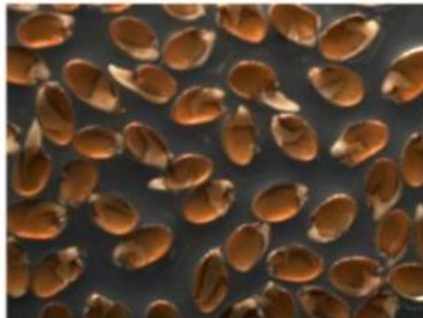
Sang-Youl Park<sup>1,2\*</sup>, Francis C. Peterson<sup>3\*</sup>, Assaf Mosquina<sup>1,2†\*</sup>, Jin Yao<sup>1,2</sup>, Brian F. Volkman<sup>3</sup> & Sean R. Cutler<sup>1,2</sup>



PYR | MANDI  
Line 1

PYR | MANDI  
Line 2

WT



惑星保護方針：現状は微生物汚染を防ぐことが主眼

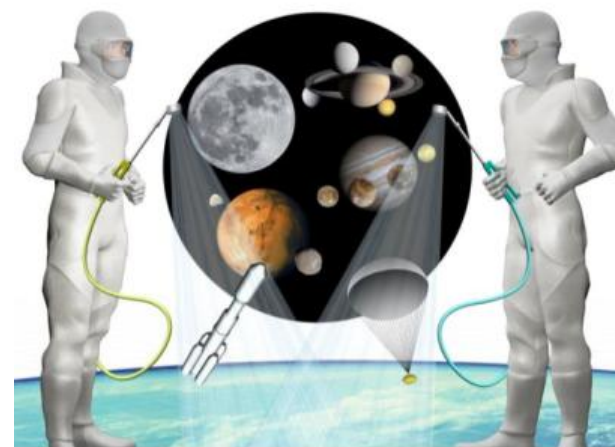
日本が火星、木星の衛星エウロパ、土星の衛星エンケラドスに行くためには、滅菌バリデーション（定量的評価）バイオバーデン（生物汚染量）管理の技術の獲得が必要

月の惑星保護方針は負担軽減傾向。有人活動や、民間も含めた月面探査には追い風。

有人宇宙活動における微生物は、滅菌対象、共存対象、利用対象それぞれの側面がある。

月面において生物を使い放題（ばらまき放題）で良いかは、これから考えていく必要がある

生長を制御できれば、管理・滅菌がかなり楽になるのでは



謝辞：筑波大 横谷香織 博士、筑波大 市川創作 博士、東大 中嶋正敏 博士、  
東大 浅見忠男 博士、JAXA 鈴木志野 博士、JAXA 稲富裕光 博士、ほか多くの方々