

# 月面居住に向けたフードシステムの研究開発状況

～月面農場の実現を目指して～

JAXA宇宙探査イノベーションハブ 大熊隼人

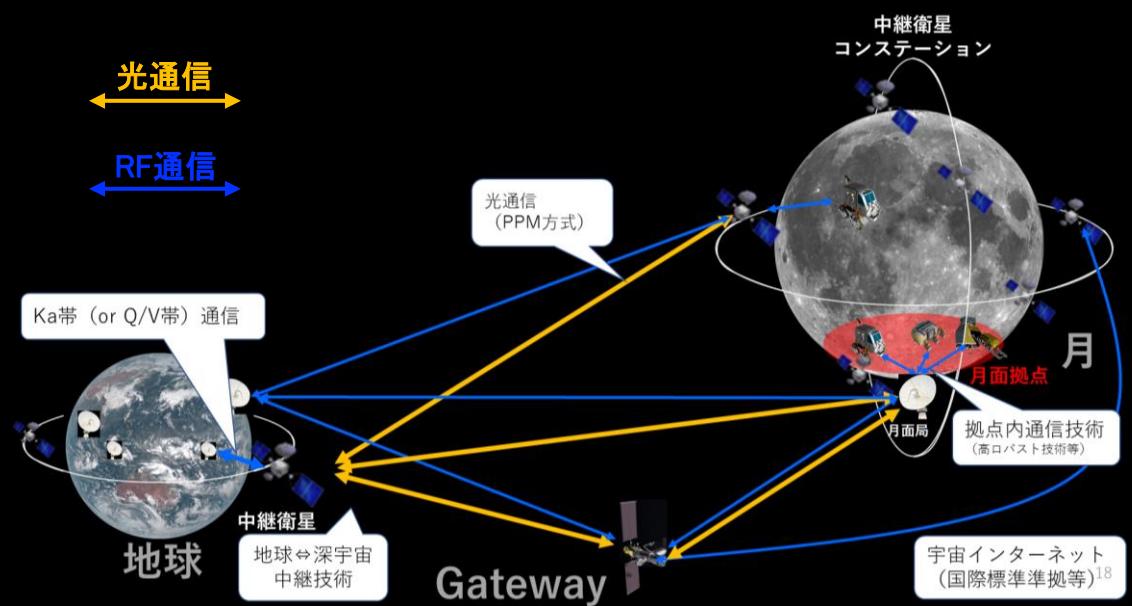
# 宇宙探査計画



# 宇宙探査に向けた5つの重点課題

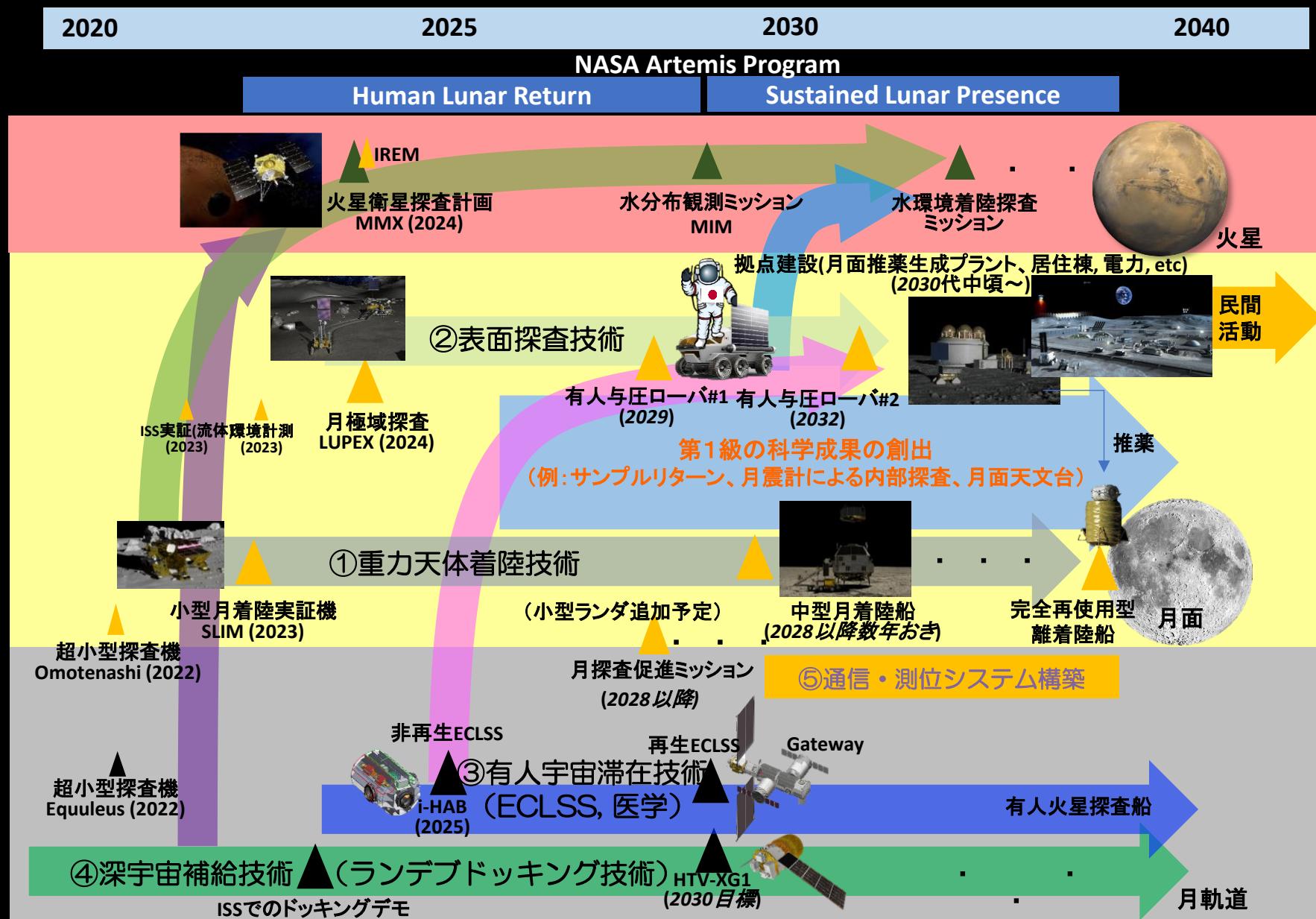
宇宙基本計画工程表で重点課題とされた4つの技術に関し、全体アーキテクチャを実現するため技術目標を設定。また、探査シナリオ2021年度版で通信・測位技術に関する技術目標を追加。

- ① 重力天体着陸技術
- ② 重力天体表面探査技術
- ③ 有人宇宙滞在技術
- ④ 深宇宙補給技術
- ⑤ 通信・測位技術



通信アーキテクチャの概念図

# ミッションシナリオ



# 宇宙探査における食料生産分野



# 『地産地消』探査技術と食料生産技術

- ◆人類が地球外天体に生活圏を築くためには、地球とつながる「へその緒」を少しずつ切ることが必要
- ◆地球からの全指令型・全補給型から脱却した自立探査の実現を目指す
- ◆自動化による地上からの指令の最小化と現地調達による補給量の低減



アポロ

建設: なし  
現地調達: なし  
再利用: なし

宇宙飛行士は着陸船に滞在。滞在に必要な機材等は全て地球から運搬。



国際宇宙ステーション

建設: 宇宙飛行士  
現地調達: 電力  
再利用: 空気、水の一部

モジュールを順次打上げ地上の指示により結合して建設。電力は自給自足。



今後の探査

建設: 無人化・自動化  
現地調達: ≈100%  
再利用: ≈100%

初期段階から無人化(遠隔化)・自動化を導入。燃料、空気、水、食料の地産地消。

# 食料生産に関連した宇宙探査技術



## 探る

- 着陸、移動する
- 自律(人工知能)で効率のよい探査をする
- 資源(水氷、鉱物)を見つける、採取・分析する
- 多数の小型ロボットで協調探査する
- 惑星検疫技術を確立する

## 作る

- 水、燃料等を現地で生産する
- 現地から資源を抽出し、資材等を製造する (ISRU)
- 食料を省資源で生産する

## 共通技術

- 省電力、熱制御
- 通信、エネルギー

食料生産では多岐にわたる  
技術開発が必要

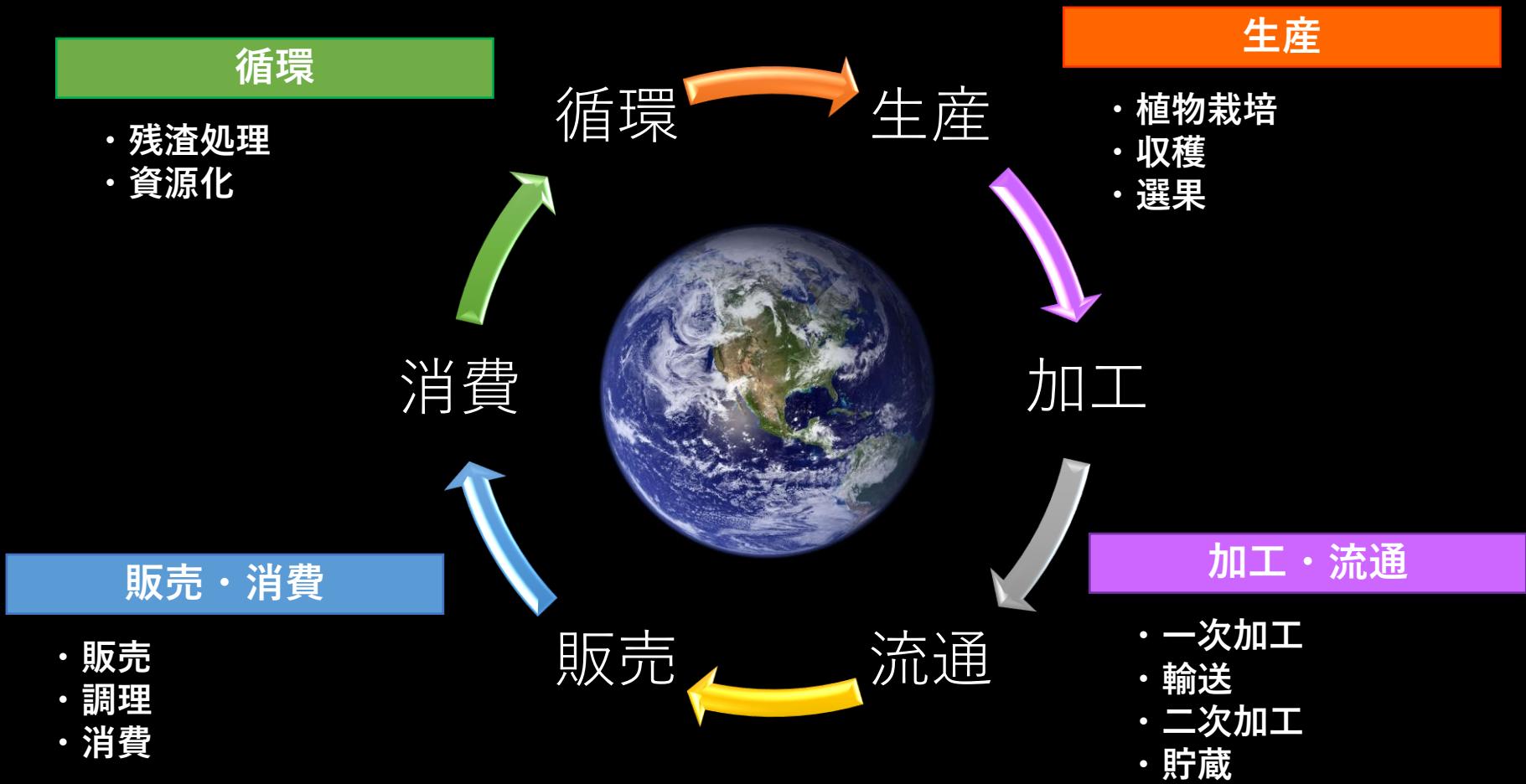
## 建てる

- 無人／遠隔／自動でスマートに建設する
- 小型軽量システムで地盤調査・掘削・整地する

## 住む

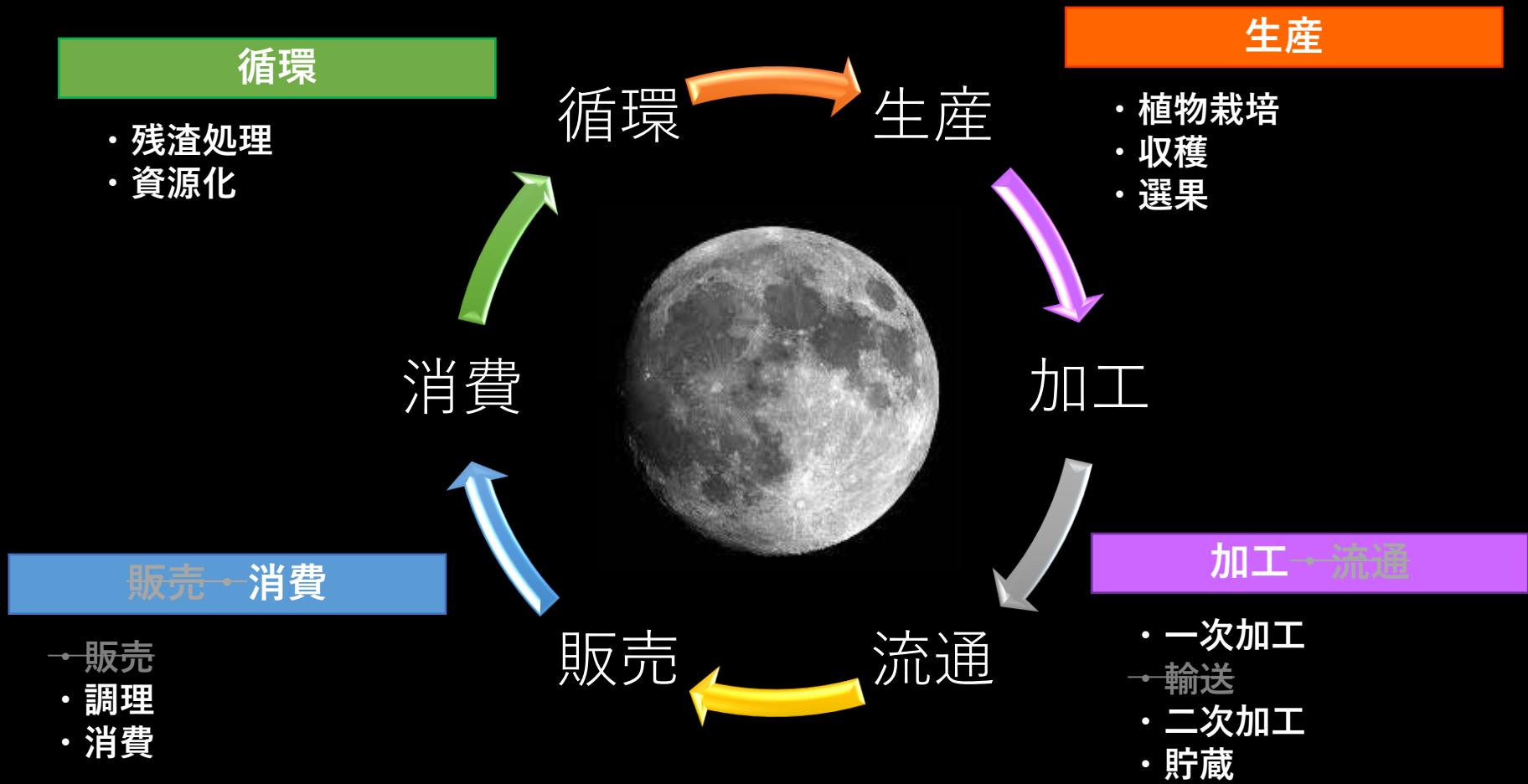
- 生命維持・環境制御を実現(ECLSS)
- 電力網を整備する
- 資源をリサイクルする

# 地上のフードシステム



農業を中心としたフードシステム

# 宇宙のフードシステム



農業を中心としたフードシステム

# 月面農場構想



# 月面農場構想

## ◆ コンセプト

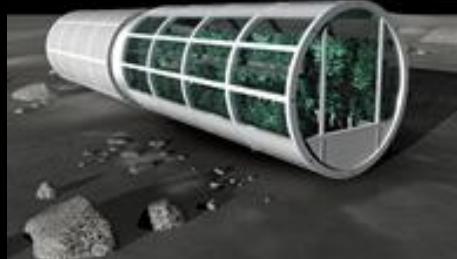
地産地消型技術のうち、地上の最先端の技術を活用した月面での食料生産を実現する植物栽培システムの構想立案を目指す。

## ◆ 月面農場に向けてチャレンジする課題とは

- ・ 地球から供給する物資の最小化
- ・ 宇宙飛行士(作業者)の作業の最小化
- ・ 必要なリソース(水、エネルギー)の省力化



月面農場のコンセプトは、未来の地球上の社会課題解決を抽出するシステムとなり、宇宙と地上の共通の技術課題解決に繋がる。

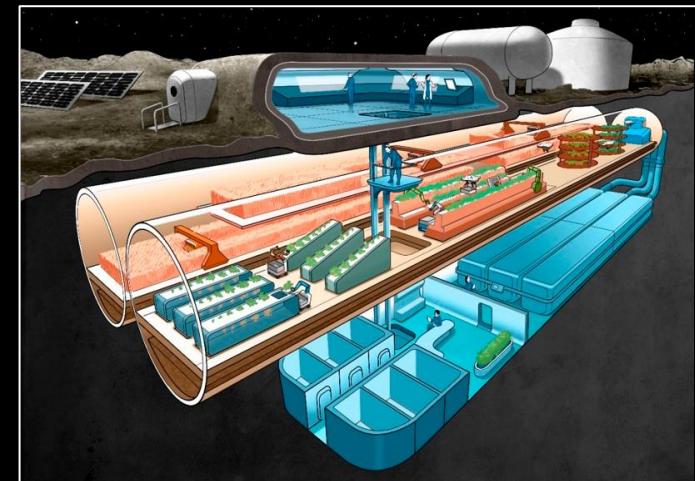


# 月面農場の全体イメージ

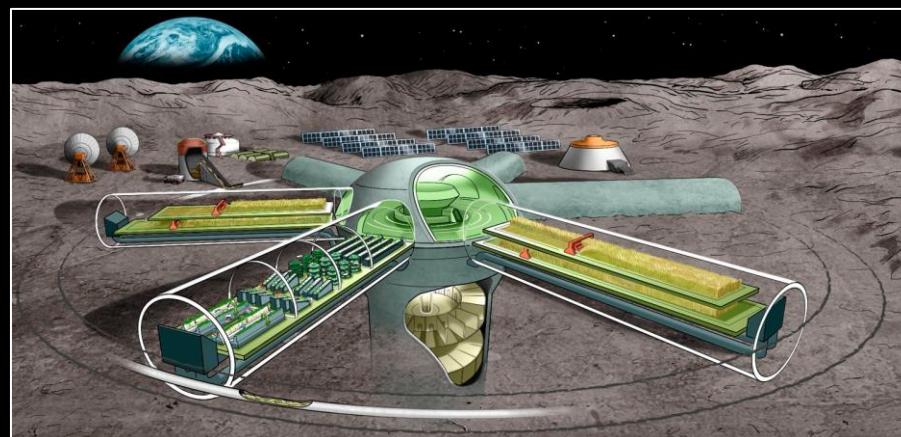
## ■ 月面農場の全体像

・月面滞在初期フェーズである6人規模においては、生活エリアは盛り土で覆い、栽培エリアは地下部に埋め立て、更にその下に最も安全性の高い区画として居住エリアとする

・100人規模では、長い距離をとった円筒形の栽培エリアとし、これを6区画展開することで、収穫物を中央に集めるルートや、リサイクル施設に搬入される残渣などを外周で運搬できるような構造とする



月面基地イメージ（6人規模）



月面基地イメージ（100人規模）

# 月面農場システム

## ■ 植物栽培環境制御

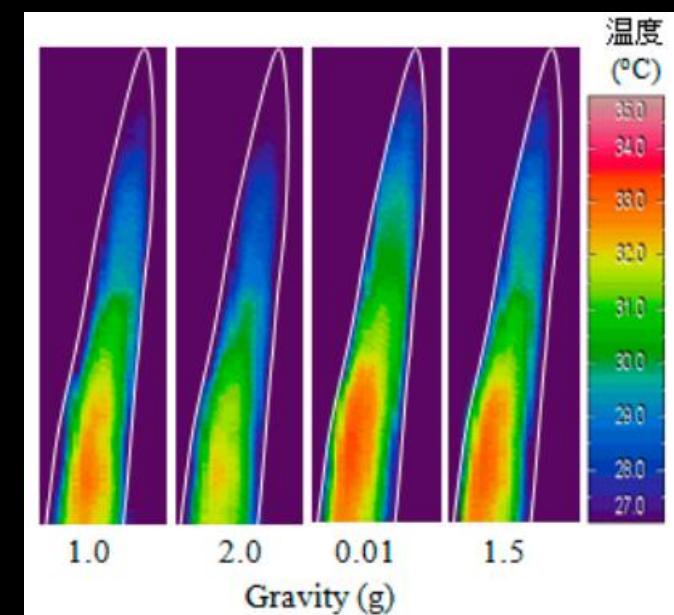
効率的な植物生産を行なうための環境制御技術を確立するためには、植物のガス交換および成長に対する物理的環境要素(光強度、明暗周期、光の波長、気温、湿度、CO<sub>2</sub>濃度、気流、培地水分、培地通気性など)の影響に加えて、微小重力や低圧環境など宇宙特有の環境条件の影響についても検討しなければならない。

### <温度環境>

光合成反応には最適温度があり、一般に純光合成速度が最大となる葉温は、20~30°Cの範囲にある。葉温は、葉で吸収されるエネルギーの増加や葉から外気へ輸送されるエネルギーの低下に等よって変化する。従ってこれらのエネルギー収支に関する環境要因は葉温に影響し、ひいては光合成・成長に影響するため、複合環境制御の考え方方が重要となる。

### <湿度環境>

相対湿度と純光合成速度の関係は、他の環境条件(たとえば気流速度など)によって変化するが、一般に相対湿度75~85%で純光合成速度は最大となる。



重力変化にともなうオオムギ  
葉表面の温度分布の変動

# 月面農場システム

## ＜光環境＞

宇宙での植物栽培では空間容積、エネルギー使用量などが限られるので、植物密度を高め、同時に照明効率を高める必要がある。光源には、発光効率、耐久性、安全性に優れ、また広範囲で正確な波長制御が可能な発光ダイオード(LED)を用いる。

## ＜CO<sub>2</sub>環境＞

一般にCO<sub>2</sub>濃度の上昇により純光合成速度は増加するが、CO<sub>2</sub>飽和点を超えると純光合成速度は増加しなくなる。

植物の光合成に対するCO<sub>2</sub>濃度の影響は、光強度や温度など、他の環境要素により大きく異なる。

## ＜気流環境＞

栽培空間の環境条件を均一にし、また純光合成速度や蒸散速度を高めて生育を促進するために、栽培空間の空気を攪拌する必要がある。気流速度が低下すると葉面境界層抵抗が増大し、光合成や蒸散が抑制され、その結果生育が抑制される。



LED水耕栽培システム

# 月面農場システム

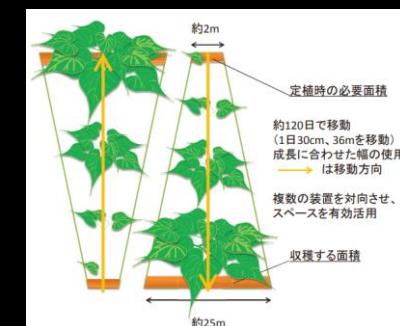
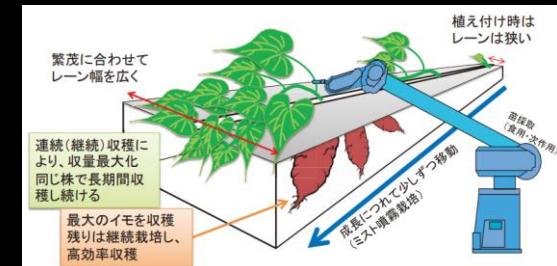
## ■ 高効率食料生産 <省リソース栽培>

・栽培は土を使用しない水耕栽培がベースとなる。ただし月面では水は非常に貴重な資源であり、培養液を循環させることによるロスや、培養液中の肥料成分の偏りを避けるためにも植物の生育に最低限の給水にとどめる必要がある。そこで作物栽培にはドライミストによる噴霧水耕栽培システムは有効な栽培方法の一つであると言える。

・作物は成長するにつれて必要な栽培面積が増えていくが、最初からある程度の広さを確保することは空間利用効率の観点ではあまり合理的ではない。しかし作物の成長に合わせて広げていくのは人的リソースの問題から避けたい。そこで省スペースで高効率な栽培方式である連続栽培方式を採用することで、必要な栽培面積を削減できるとともに人作業の軽減も図ることが可能である。



ドライフォグ栽培システム



連続栽培における株間拡大による面積使用効率の上昇

# 月面農場システム

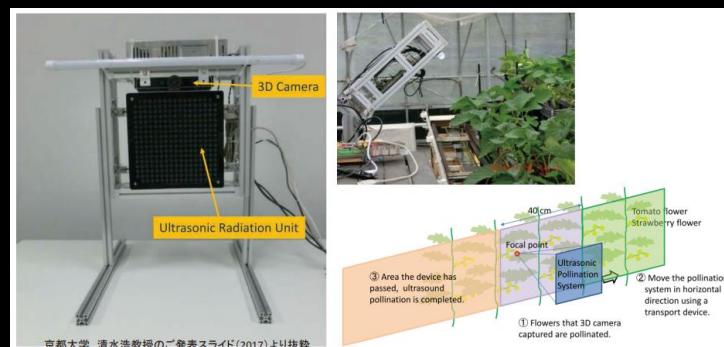
## <人作業の削減>

・食料生産にかかる作業量を最小にするためにはできるだけロボット等に頼った自動化システムが必要となる。農作物のうち可食部を的確に認識し収穫を確実にこなしたり、生育の状況や収穫タイミングなど栽培上必要な情報を得たりするために人工知能に裏付けされた画像解析・認識技術の導入は不可欠である。



自動収穫システム

・またイチゴは結実させるために受粉が必要であり、農業の現場においてもハチを利用して受粉させたりしているが月面においてはハチの利用は個体の確保や維持が問題となる可能性が高いことから、自動で機械的に受粉させる技術が望まれる。有望な技術として、フェーズドアレイを3D画像認識と組み合わせ、超音波のパルス圧を利用してイチゴの花を揺らし、受粉させる非接触のシステムが考えられる。

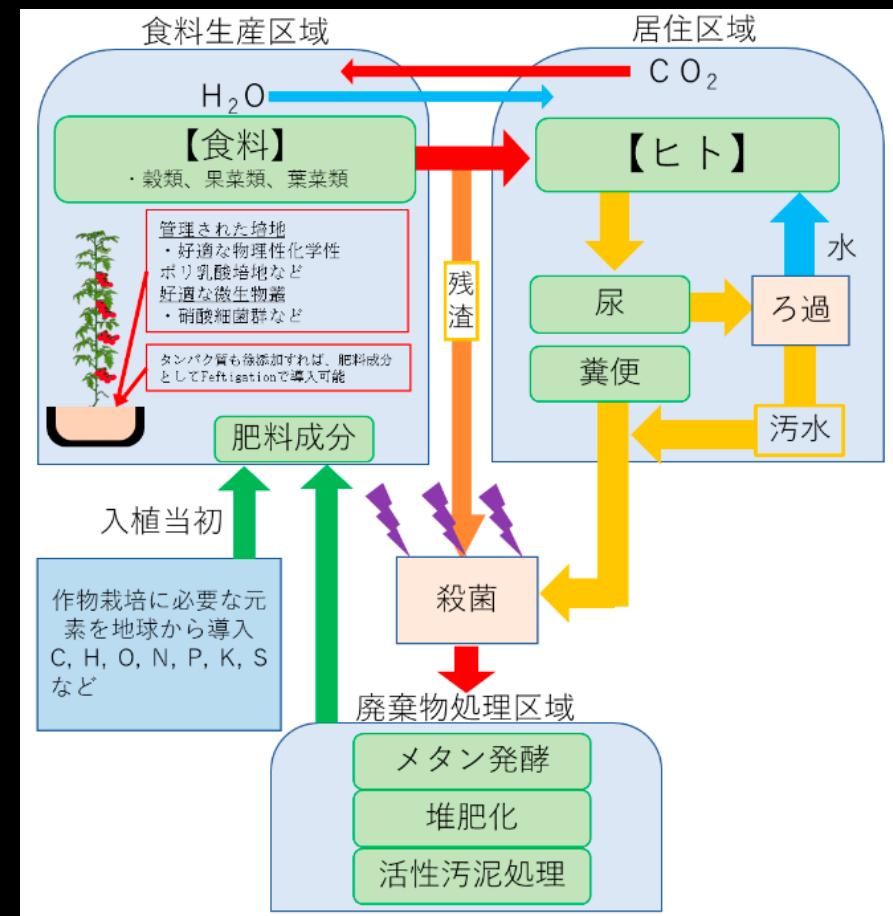


イチゴの非接触受粉システム

# 月面農場システム

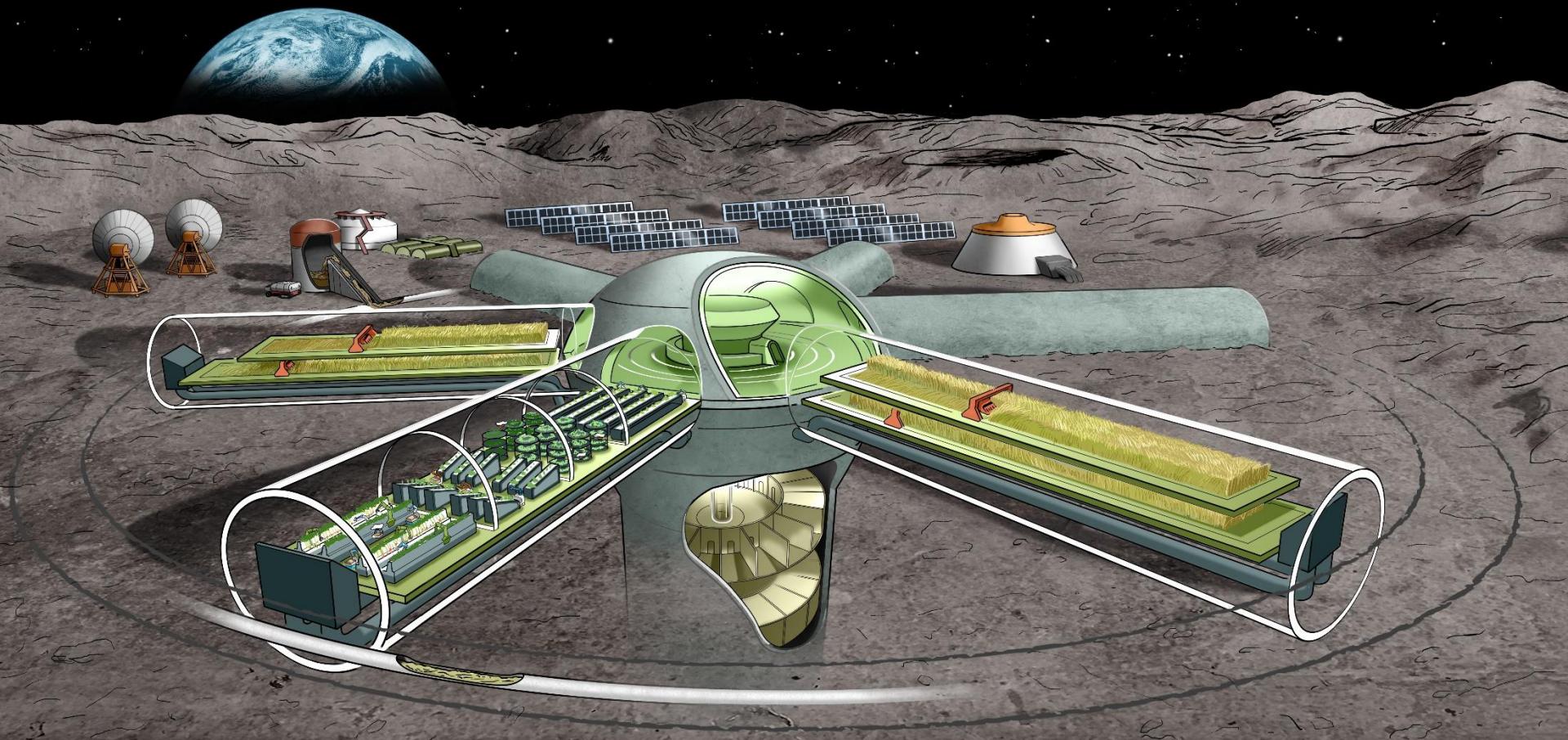
## ■ 物質循環システム

- ・月—地球間の輸送は莫大なコストがかかるため、作物を生産するために必要な炭素や窒素などの元素は、その都度の交換輸送ではなく、月面での生活において生じる作物残渣などの有機性廃棄物から、効率的に回収して循環利用する必要がある。
- ・資源循環システムの中核処理技術として、微生物を利用した生物化学的物質変換を想定する。月面においては、窒素、炭素、水が少なく、これらの元素は植物の必須元素でもあるため、資源として効率的に再利用する必要がある。そこで、ヒトが居住する区域と植物群を生産する区域、廃棄物処理区域をある程度独立させることで、効率的な資源循環が行えると考えられる。



月面における食料生産と物質循環

# 月面農場WG検討報告書



月面農場イメージ©JAXA月面農場ワーキンググループ  
月面農場ワーキンググループ検討報告書第1版(2019年6月発行)  
<http://www.ihub-tansa.jaxa.jp/Lunarfarming.html>

# 月面フードシステム検討



# 月面フードシステムWG

## ◆ 目的

- ・ 現在の国内外における宇宙食料生産に関する研究開発状況、月面探査シナリオおよびSFSにおける研究開発ロードマップをベースとして今後の月面食料生産の全体像を描き、ロードマップをアップデートする。
- ・ 前回の月面農場WGで検討した植物栽培システム構想をベースに省リソース化にフォーカスした実現可能なシステムを検討する。
- ・ フードシステムにおける食料生産後のプロセスである調理・加工・貯蔵に適した方法を検討する。
- ・ これまであまり検討されてこなかった分野(作物以外の食料生産)に関して有効性と実現性を検討する。

## ◆ 実施項目

- ・ 月面での食料生産へと接続する持続的な全体ロードマップ策定
- ・ 月面基地における省リソース食料生産システム検討
- ・ 月面のフードシステムに適した調理/加工/貯蔵方法の検討
- ・ 作物以外の食料生産のフィージビリティ整理

# WGの構成

Group	担当分野	内容
Group1	 全体構想	栽培・循環・実証などの技術ロードマップ策定
Group2-A	 高効率栽培（自動化）	自動化・省リソース化・デジタルツイン
Group2-B	 調理・加工・貯蔵	食材の長期保存と加工技術を検討
Group3-A	 月面養殖	動物性タンパク供給と栄養循環の構築
Group3-B	 月面きのこ栽培	副産物利用と食の多様性確保を追求

# JAXAにおけるこれまでの研究成果



# 研究成果

## 水利用効率を高めた屋内型ドライフォグ栽培システムの開発

### 【課題概要】

- 人口増加や工業化、気候変動などで世界的に深刻な水不足が起きている中、世界の水消費の約7割が農業用水に使われている。また、植物工場は水資源の乏しい地域でのニーズが高く、限られた水資源を有効に活用する節水、再利用に繋がる新しい農業システムが求められている。そこで将来の月面農場での栽培を目指した、節水型栽培システムの研究を行う。

### 【研究内容】

- 噴霧栽培システム(セミドライフォグ)により、水耕栽培よりも節水型の栽培システムの構築を目指す。



ドライフォグ栽培システム

# 研究成果

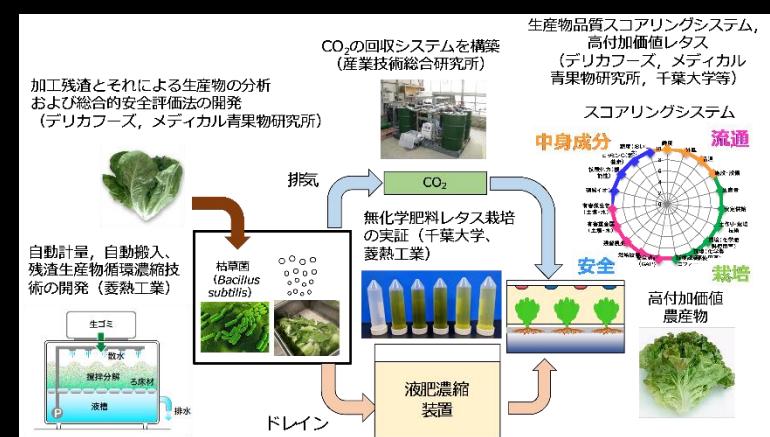
## 閉鎖型生物残渣高速液化技術と環境浄化型養液栽培技術の確立

### 【課題概要】

- 月面での長期滞在や地球上での持続可能な農作物生産を可能にするためには、作物残渣などの有機性廃棄物に含まれる、炭素や窒素などの元素を効率的に回収して循環利用する必要があります。月面や地上において生じる有機性廃棄物を効率的に循環させるためには、地球上で実用化されている微生物を利用した処理等が考えられます。
- 現代社会における問題としても、大量生産、大量消費、大量廃棄が課題となっており、植物残渣のリサイクル等の循環型社会に向けた活動の重要度が増しています。

### 【研究内容】

- ・将来の月面農場での活用を目指した省リソース及び高効率な植物残渣リサイクル技術を実証する。
- ・レタスを含む7種の植物残渣や排液を処理することでレタスの栽培に再利用できる液肥を生成する。
- ・排液処理時に発生するCO<sub>2</sub>を回収し、それを植物栽培に活用する。



# 研究成果

## レーザー励起光を用いた小型蛍光画像センサによる栽培作物の生育状態モニタリング装置の開発

### 【課題概要】

- 高齢化や後継者不足が原因で、日本の農業は深刻な労働力不足に陥っており、その解決手段の一つとして農業ロボット、作業支援装置等の重要性が高まっています。
- 宇宙飛行士の作業を最小限とするための作業の自動化、高効率化を目指した技術開発の重要性が識別されています。その中でも非専門家が栽培するための、植物の状態、病虫害診断、収穫適期判断などを行う要素技術開発を目指します。

### 【研究内容】

- 将来の自動化農業や月面農場での適用を想定し、レーザー等を励起光とした小型軽量蛍光検出画像センサの研究開発をおこなう。この装置は蛍光量子効率をベースに、栽培作物の最も蛍光感応の良好な励起波長と蛍光発光波長を用いて画像解析をおこなうもので、作物の健康状態、果実の収穫適期、棚持ち予測等をリアルタイムで判別可能な、生育状態モニタリングシステムを構築することを目的とする。



# 研究成果

## 袋培養技術を活用した病害虫フリーでかつ緊急時バックアップも可能な農場システムの研究

- 意義：軌道上での新鮮野菜の供給や無菌状態での苗栽培における袋栽培方式の実現性実証
- 実験目的：袋栽培でレタスが育つ、食品衛生の問題がないこと  
栽培後の培養液がISS水循環システムで処理可能であることの成分評価
- 実験の袋数：3袋（培養液500mL/袋）



袋培養状況

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構  
株式会社竹中工務店  
キリンホールディングス株式会社  
国立大学法人千葉大学  
東京理科大学  
2021年10月22日

**国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟で世界初となる袋型培養槽技術による栽培実験を実施**

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（理事長：山川 宏 以下、JAXA）、株式会社竹中工務店（取締役社長：佐々木 正人 以下、竹中工務店）、キリンホールディングス株式会社（代表取締役社長：磯崎 功典 以下、キリン）、国立大学法人千葉大学（学長：中山 俊義 以下、千葉大）、東京理科大学（学長事務取扱：岡村 総一郎 以下、東京理科大）は、将来の月面探査等での長期宇宙滞在時における食料生産に向けた技術実証を目的として、世界初となる宇宙での袋型培養槽技術の実証実験を、国際宇宙ステーション（ISS）「きぼう」日本実験室内で実施しました。

密閉した袋内で栽培されたレタス  
(左：収穫前の様子 右：地上に回収する前の様子)



■ 実験の背景  
近年、月や火星などの天体へ人類の活動領域の拡大を目指す機運が高まっています。そのため技術の一つとして、JAXAは、地球からの補給に頼らず、月面に農場を設営し長期滞在のための食料を生産するという構想を立てて研究を行っています。将来的に月面に農場を設営することになれば、作物を安定して生産するために病害虫防止と緊急時食料の「バックアップ」の対応が求められます。また、地球からの輸送にあたっては栽培システムの積載重量低減も求められます。

そこで、JAXA、竹中工務店、キリン、千葉大、東京理科大は、JAXA 宇宙産業イノベーションハイの共同研究提案公募の枠組みにて、2017 年から宇宙での適用も想定した袋型培養槽技術の共同研究を行ってきました（※1）。袋型培養槽技術は、小さな袋の内部で植物を保護する点が特長的です。この技術を用いた栽培方式は、密閉した袋内で植物を栽培するため、雑菌の混入を防ぎ、臭気発生がない点が特徴です（※図 1）。また、設備も簡易でメンテナンスしやすく、省エネルギー性があり、人数に合わせた数量調整も容易です。これまでの共同研究の結果を踏まえ、さらに宇宙空間の微小重力環境下や閉鎖環境下における本栽培方式の有効性や、水耕栽培と比較した際の優位性を確認するため、「きぼう」船内の袋型培養槽技術によるレタス生育の実証実験を実施しました。

■ 実証実験の概要  
今回の実験は、2021年8月27日（金）から10月13日（火）までの48日間とし、期間中に培養液の供給および空気交換を行い、生育の促進を行いました。9月10日（金）にはレタスの本葉を確認し、その後も順調な生育を続け、収穫期に至りました。

実証実験用に開発した栽培装置は、打ち上げ時の積載重量低減のため、大きさ（幅 44 cm × 高さ 20 cm）と重量（5kg）を抑えながらも、3 袋の栽培が可能です。内部には、ISS の飲料水から培養液を作成し無菌化して各培養袋へ供給できる給液システムおよび生育状況を定期的に自動撮影できるシステムを備えています。



実証実験用栽培装置