

ポストISSを見据えた 現ISSの科学的利用促進 ～微小重力科学の立場から～

2025年 1月15日

石川 正道(特別客員教授、同志社大学)



日本マイクロ重力応用学会

The Japan Society of Microgravity Application

はじめに～宇宙惑星居住科学～

●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。

●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**を実施する。
3. 地球からの資材等の輸送を極力減らし、大幅なコスト低減を可能とする**月のその場資源開発・利用**を発展させ、惑星探査の経済性を追求する。

大目標からプロジェクト化へ

大目標

宇宙惑星居住科学

微小重力科学

- ・微小重力、低重力、極高真空、極低温など宇宙特有の環境条件をツールとした研究
- ・人類の活動を惑星空間にまで拡大し、地球社会に貢献する科学技術を構築

宇宙生命科学

- ・生命の起源やその地球環境への適応、進化の本質的な仕組みの解明
- ・人類が宇宙に進出するために必要な基本知識・技術の獲得
- ・地球の急激な環境変化への適切な対処による環境保全と人類の長期生存実現

研究戦略

テーマ

- ・微小重力科学実験
- ・月資源利用プロセス要素技術の構築

- ・低重力科学実験
- ・月環境を利用した精密科学研究
- ・月資源開発/利用システム開発

- ・太陽系惑星環境での生物生存研究
- ・人間活動/生物影響のない隔離研究
- ・閉鎖型生命維持等、技術システム開発

- ・月面での生命科学 μ G対照実験
- ・物質循環型生命維持システム等、要素技術試験

プロジェクト

地球低軌道宇宙ステーション
 μ G・生命科学実験

月面ラボ
生命科学・理工学実験

惑星居住科学の研究テーマ

居住要素	構成品	技術課題	μG研究分野
衣	放射線防御・環境適応装備 健康管理・医療機器	放射線防御素材 バイタルデータ取得	細胞損傷, 放射線医学 健康科学, 創薬, 医工学
食	植物栽培 食品加工・保存	植物工場 食品加工・保存技術	バイオテクノロジー コロイド界面科学
住	居住施設・設備 温湿度空気環境制御器 生命維持システム	各種部材製造 快適環境制御技術 空気再生・水再生技術	材料プロセッシング 空気環境制御 化学反応プロセス
エネルギー	熱源: 混合気・噴霧燃焼器 発電: 太陽光発電、熱電発電 排熱: 高効率大型熱交換器	安定燃焼、火災安全 発電デバイス高効率化 大容量・長距離熱輸送	燃焼工学 材料プロセッシング 伝熱制御
通信	大容量・高速通信 測位	光通信 小型衛星利用	量子通信 空間位置・時間計測
製造	3Dプリンター 加熱炉、焼結炉	自動製造プロセス 小型省エネ炉	積層造形技術 溶融・凝固シミュレーション
リサイクル	廃棄物減容処理 汚水浄化 二酸化炭素回収利用	焼却炉 光触媒浄化プロセス 触媒反応プロセス	燃焼工学 触媒化学 化学反応プロセス
資源開発	レゴリス利用 水素、酸素分離 金属製錬・精錬	レゴリス物性評価 膜分離 酸化還元プロセス	熱物性計測 気液分離操作 電気化学プロセス

微小重力科学の宇宙探査技術応用(2019)

分野	微小重力科学	探査技術応用テーマ
材料科学	無容器プロセッシング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, Gateway, 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

目標・戦略・工程表

●目標(ビジョン)

- ・微小重力という宇宙でしか得られない環境をツールとして、地球社会に貢献する科学技術を構築する。
- ・1) **基礎研究の追求**、2) **応用へのフィードバック**、3) **宇宙実験ミッション**を三位一体とする、JASMAのこれまでの成功パターンを継承、深化する。

●戦略

- (1) **基礎**: 新しい学術領域を提案し、科研費等、競争的資金を獲得する。
日本宇宙生物学会など、他学会との連携を促進する。
- (2) **応用**: エネルギー、グリーン、ライフイノベーションに係わる課題解決型研究、産業応用を推進する研究プログラムとの連携を深める。
- (3) **宇宙**: ISSなど実験手段の運用を最大化する課題提案、惑星探査ミッションに貢献するテーマの設定(0~1Gの可変重力現象など)。

●工程表(ロードマップ)

- ・ロードマップ検討WGを設置し、今後10~20年の学会活動を可視化する。
- ・宇宙環境利用科学ロードマップ(JASMA版)の認知を図る。

“日本発”月面開発・利用技術の提案

- (1) 月面資源開発(レゴリス利用) 材料・資源開発
- (2) 熱エネルギー開発 エネルギー開発
- (3) 水・空気環境浄化 生命維持システム
- (4) 生活安全・リサイクル 廃棄物・リサイクル

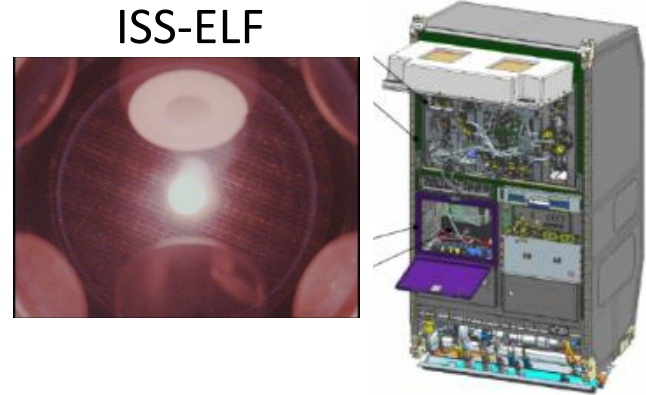
参考文献：石川正道, 宇宙環境利用の大目標 “宇宙惑星居住科学”,
Int. J. Microgravity Sci. Appl., 34(2), 340205 (2017)

(1) 月面資源開発(レゴリス利用) 材料・資源開発

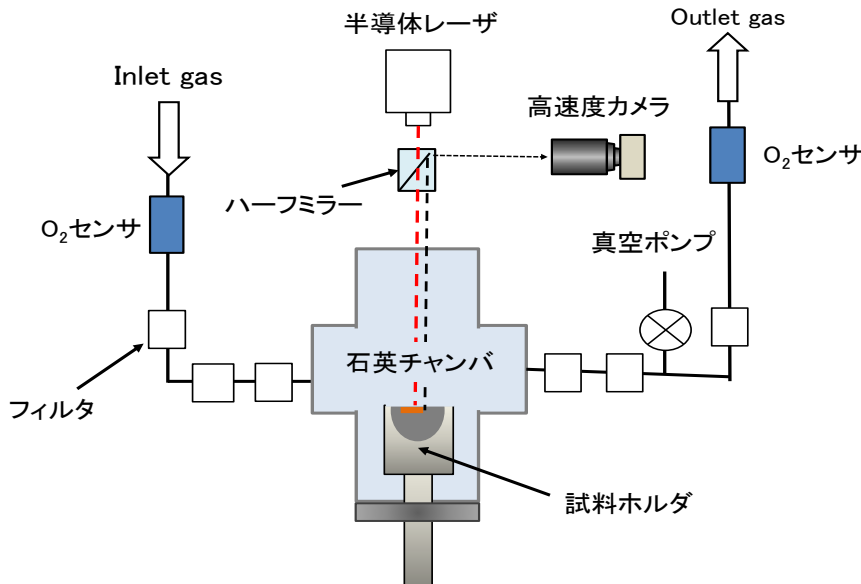
- ① 月レゴリスの静電浮遊熱物性評価 (ISS利用)
- ② レゴリス利用積層造形のための溶融凝固シミュレーション
- ③ 宇宙その場製造を目指した金属積層造形プロセスの最適化

① 静電浮遊炉を用いた浮遊メルトの熱物性計測 (ELF)

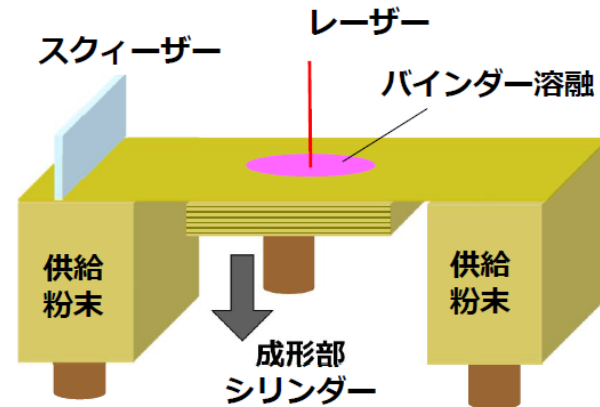
レゴリス試料



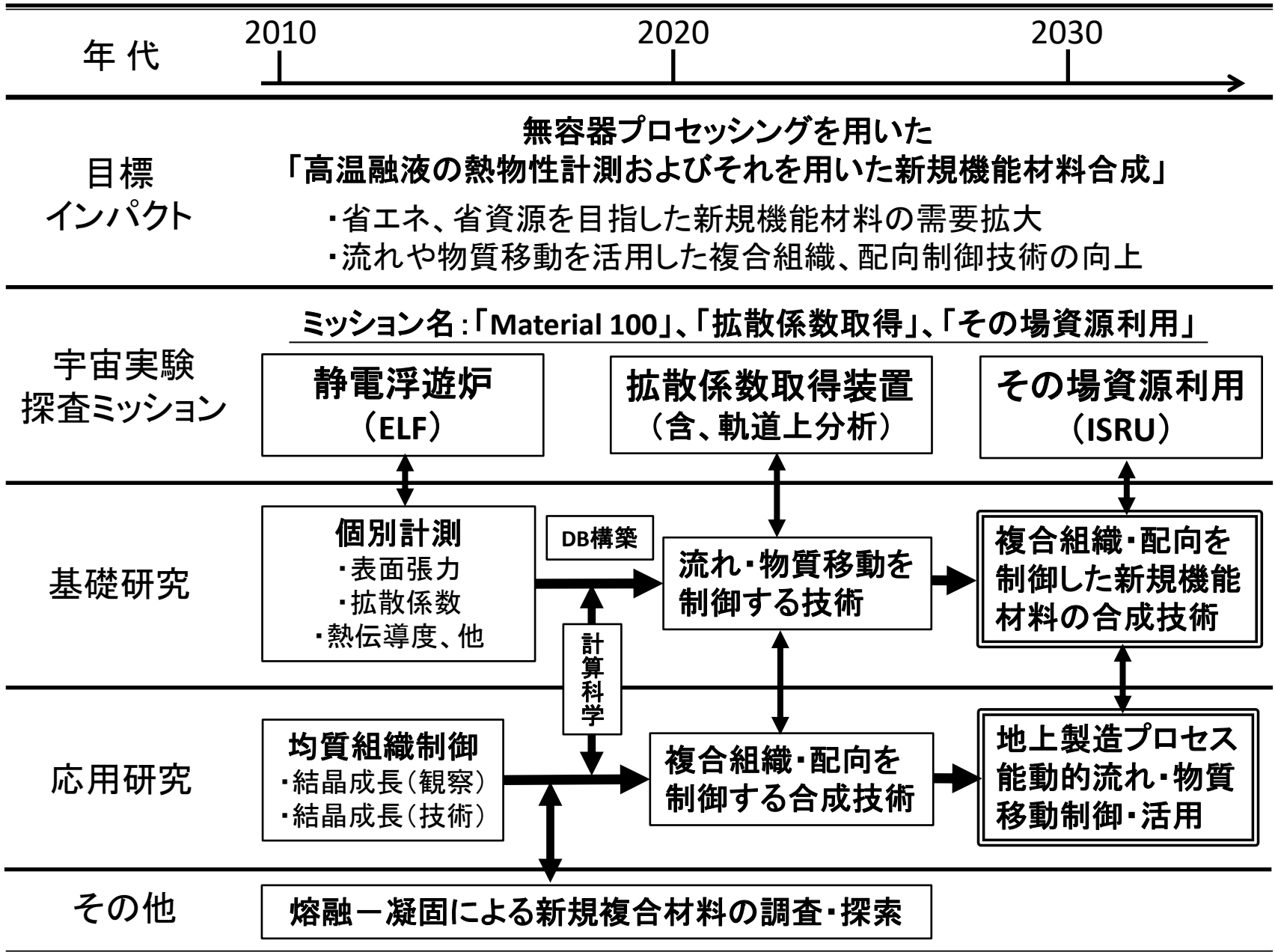
② 溶融凝固シミュレーション



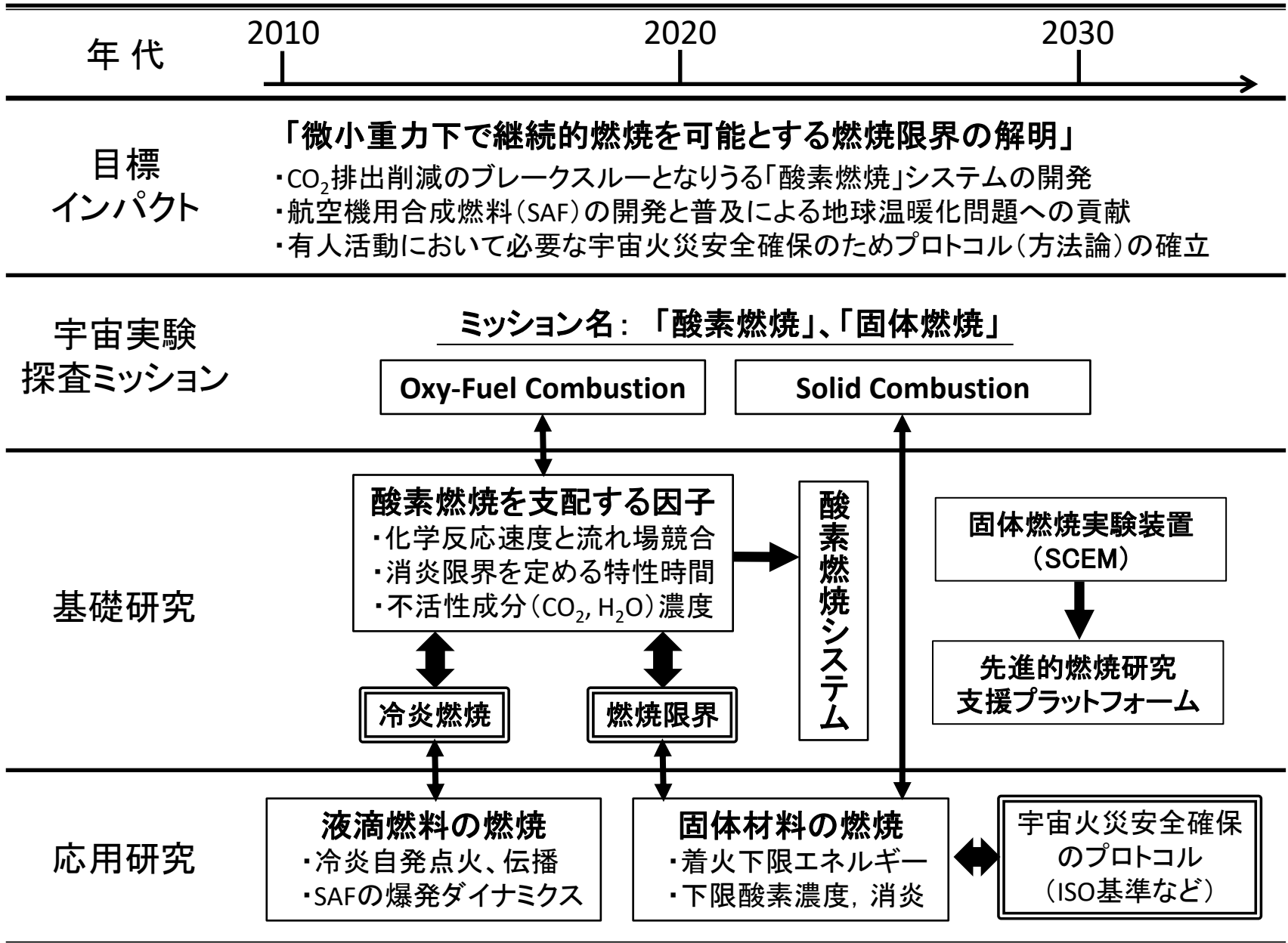
③ 金属積層造形プロセス最適化



材料科学ロードマップ



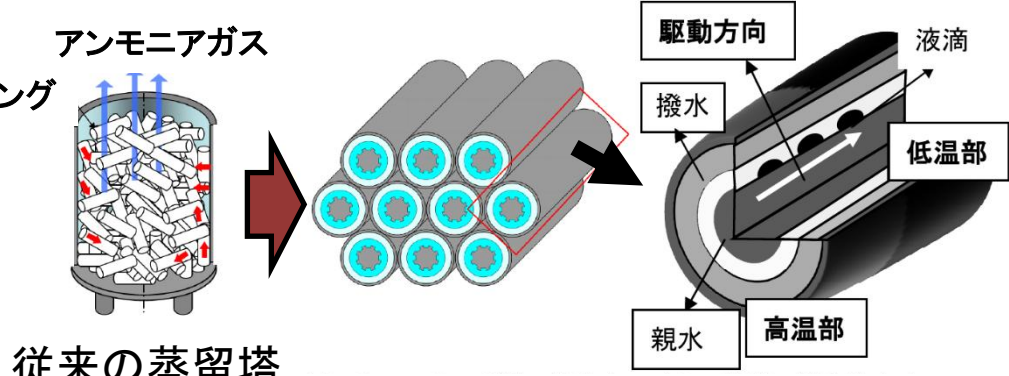
燃焼科学ロードマップ



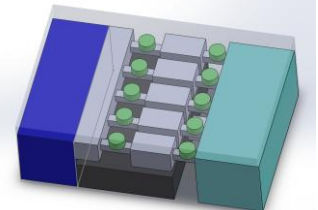
(3) 水・空気環境浄化

- 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

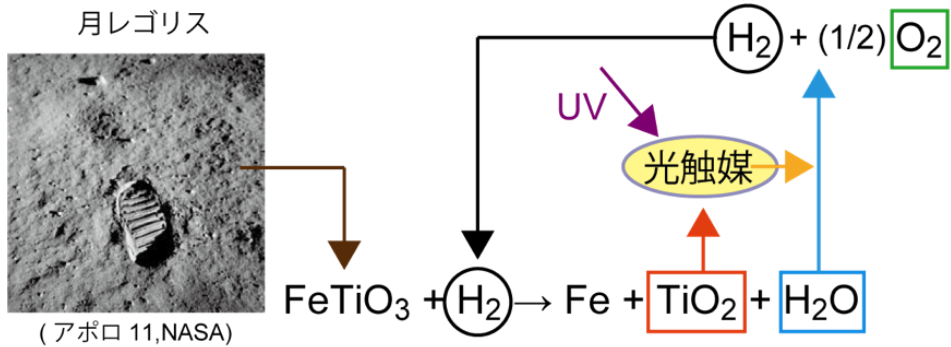
① マランゴニ流駆動水浄化



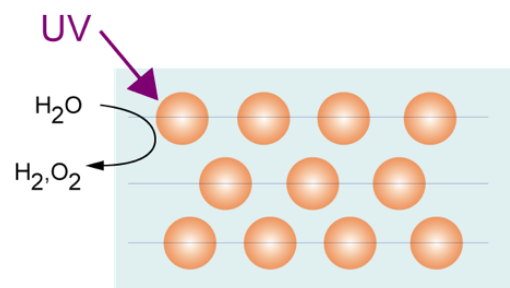
② 光触媒利用脱臭装置



③ 自己集積型高活性光触媒

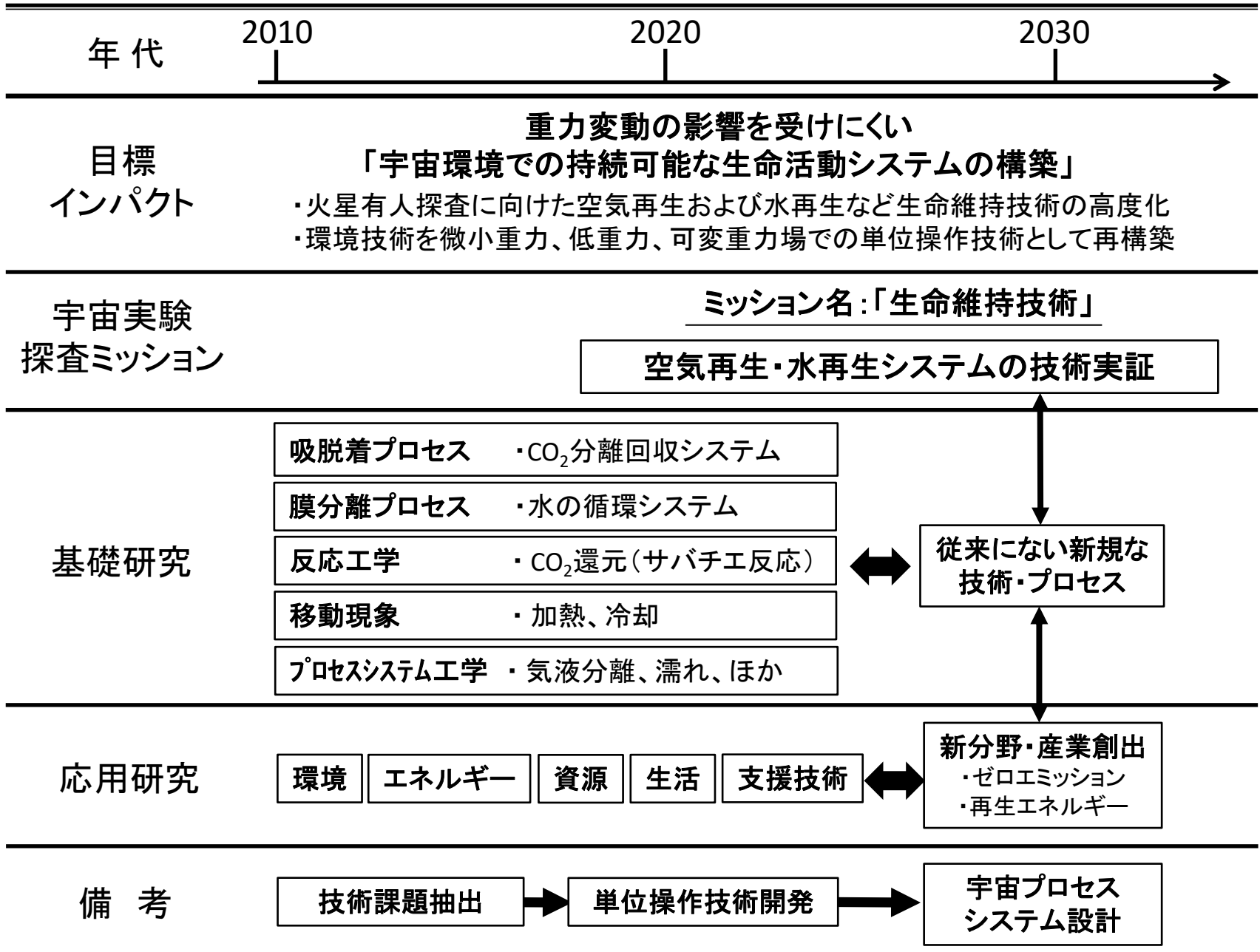


μGで高比重粒子を浮遊、間隙の多い構造を作りゲル固定→大きな比表面積・高触媒活性



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)

化学工学ロードマップ

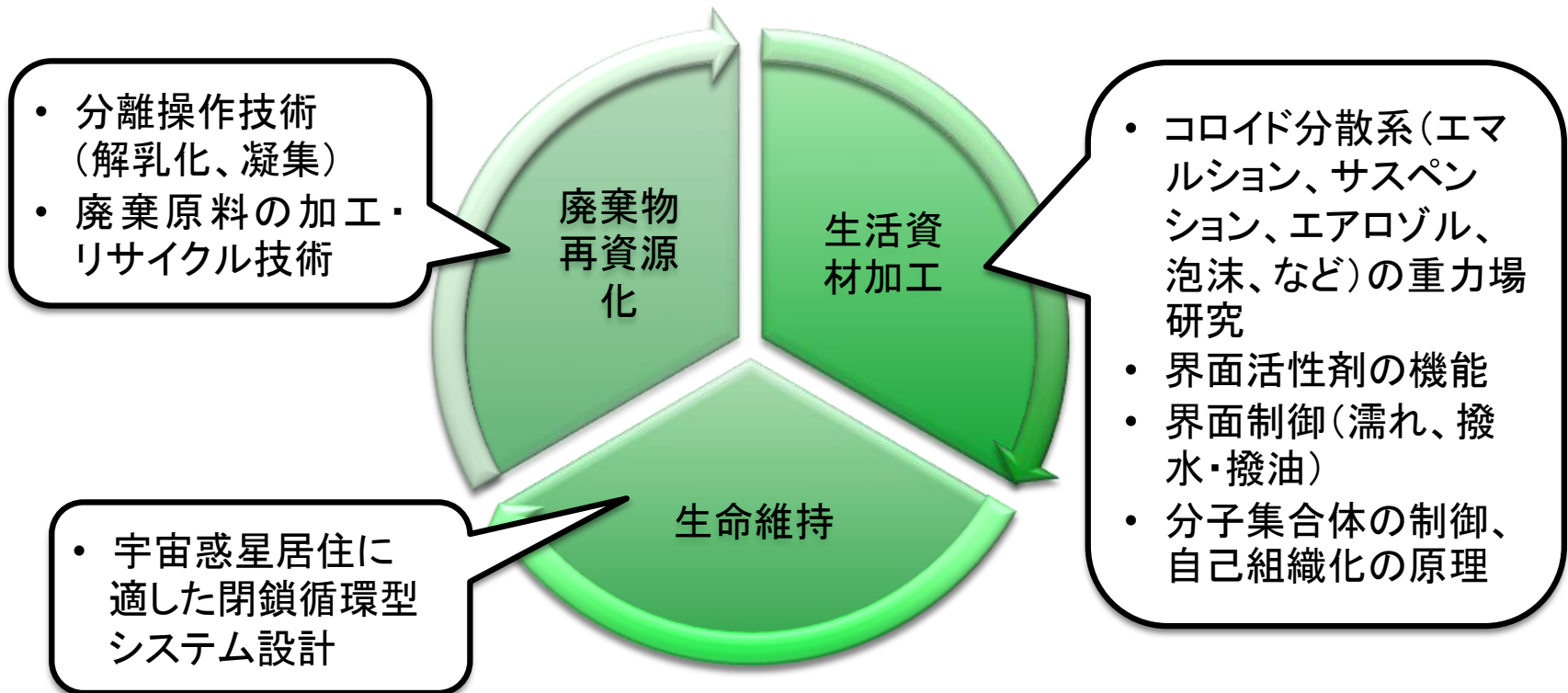


(4) 生活安全・リサイクル

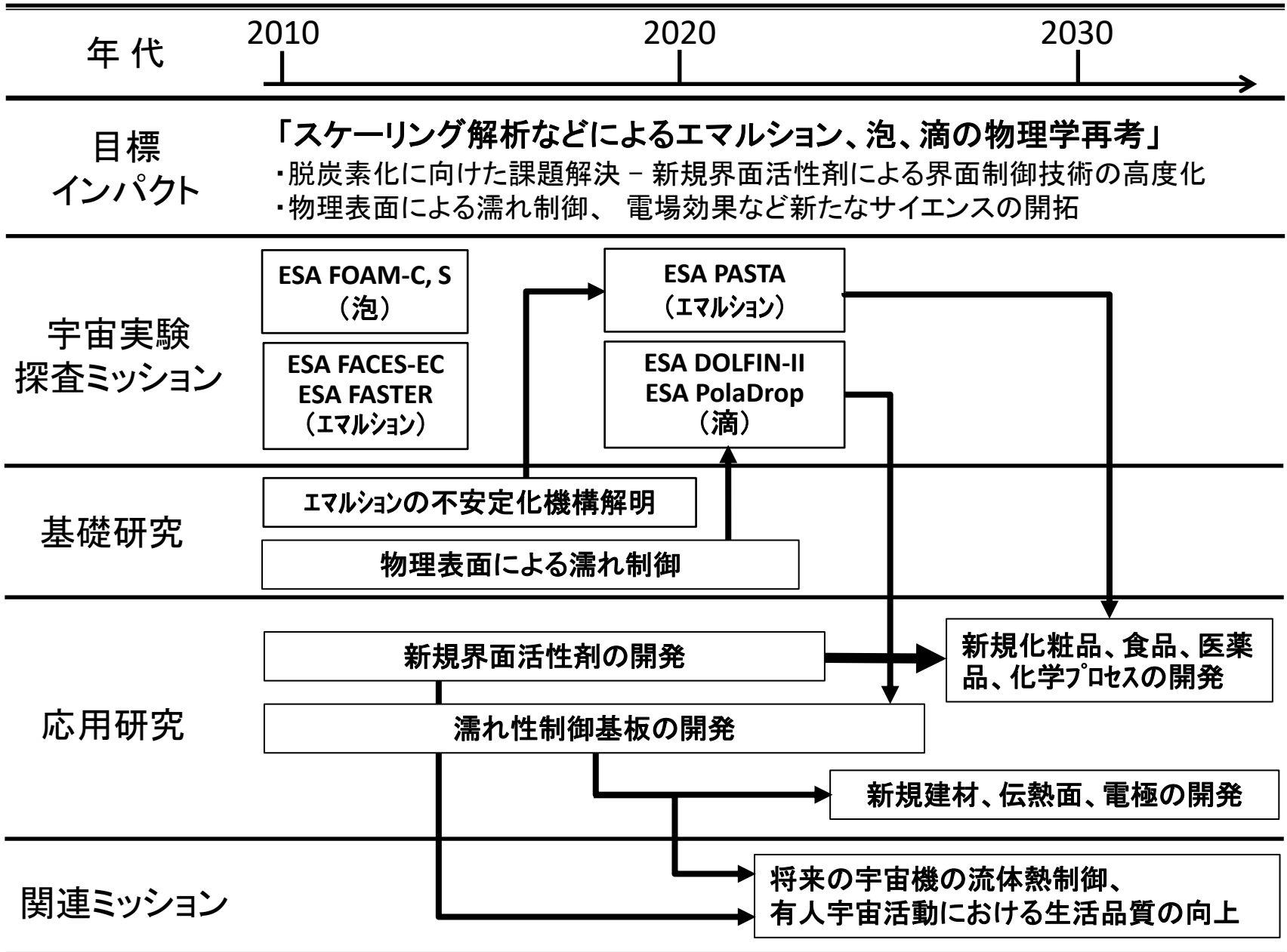
廃棄物・リサイクル

非平衡コロイド分散系のダイナミクス実験 (ISS利用)

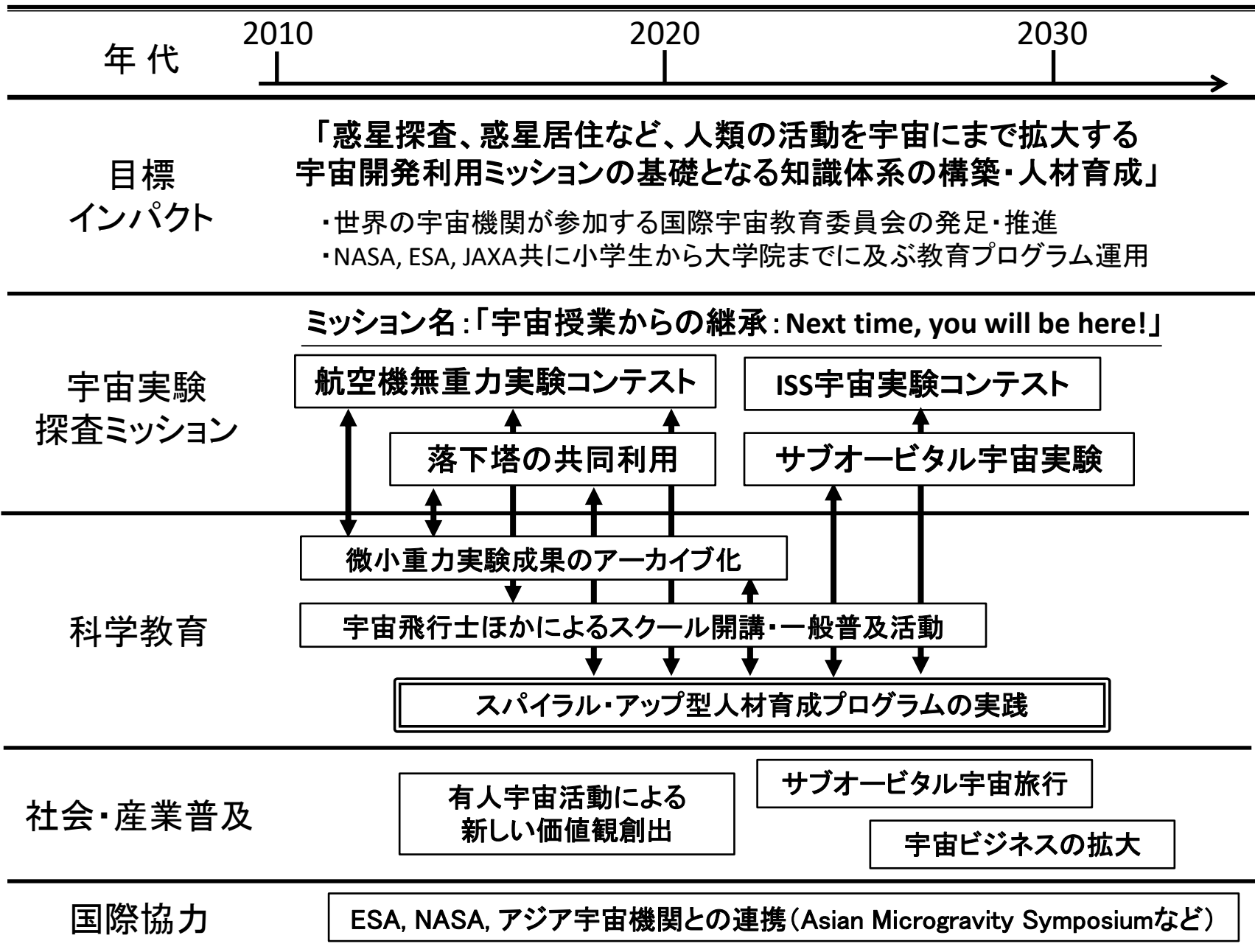
- ①生活資材の加工
- ②閉鎖循環型生命維持技術
- ③廃棄物の再資源化



ソフトマター科学ロードマップ



宇宙教育・普及ロードマップ



まとめ

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、低重力、極低温、低磁場、太陽放射線など、月環境固有の特性を組み合わせることによって、地球以外の重力天体でも通用する科学技術を構築する。

2. 有人惑星探査の経済性・安全性の追求

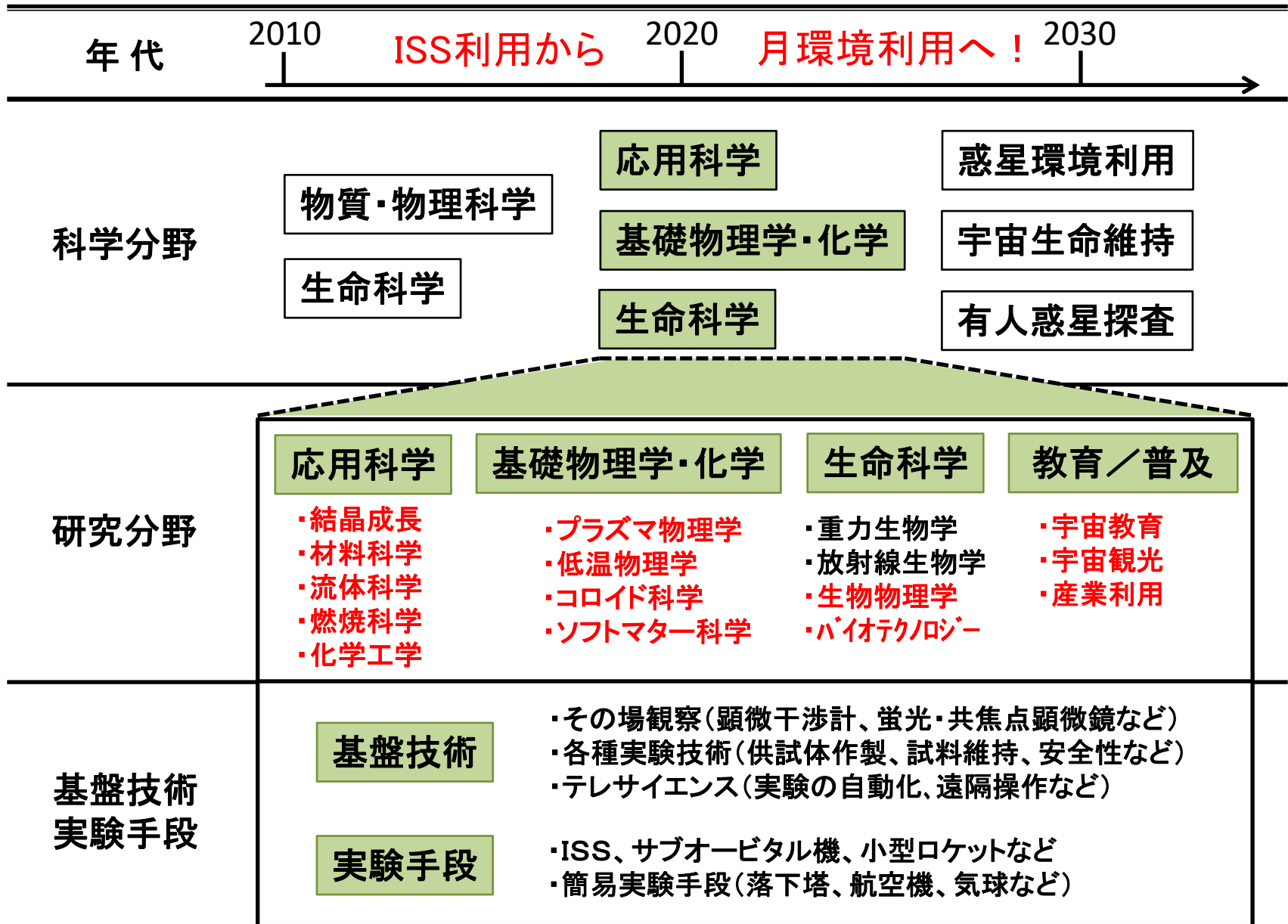
有人宇宙活動を月及び火星にまで広げるためには、快適な衣・食・住、エネルギー供給、通信網、製造・リサイクル、その場資源利用など、惑星居住に関わる技術開発が避けられない。そのために我が国に優位性のある地上技術の橋渡しを進め、月惑星探査の経済性・安全性を高める技術の確立に貢献する。

3. オールジャパンでの先導的プロジェクトの推進

国際協力の下にアルテミス計画・惑星探査計画が進む中、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先導的宇宙実験プロジェクトを大学・国研・民間の協力の下に推進する。

參考資料

微小重力科学ロードマップ(JASMA)



ロードマップの検討(2017)

WG	対象分野	構成メンバー
WG1	・材料科学	石川 毅 (JAXA)、小澤 (千葉工大)、鈴木 (早稲田) 後藤 (同志社大)、永井 (産総研)
WG2	・流体伝熱科学 ・マランゴニ対流	河南 (兵庫県大)、今井 (室蘭工大) 松本 (JAXA、マランゴニ対流担当)、上野 (東京理科大)
WG3	・化学工学	岡野 (大阪大)、塚田 (東北大)、今石 (九州大)
WG4	・燃焼科学	藤田 (北大)、野村 (日大) 三上 (山口大)、菊池 (JAXA)
WG5	・結晶成長(含、基礎、タンパク質、 半導体) ・コロイド科学(含、ソフトマター)	古川 (北大)、塚本 (大阪大) 田仲 (コンフォーカ、タンパク質担当)、鈴木 (徳島大) 早川 (静岡大、半導体担当)、稲富 (JAXA) 山中 (名市大、コロイド結晶担当) 夏井坂 (JAXA、ソフトマター担当)
WG6	・プラズマ物理 ・低温物理	足立 (JAXA)、高橋 (京都工繊大) 奥田 (東工大)
WG7	・生物物理	石川 正 (理研)、山中 (名市大)、田仲 (コンフォーカ)
WG8	・宇宙教育 ・一般普及(産業利用/宇宙旅行)	中村 (豊橋技科大、宇宙教育担当)、森 (お茶大) 長谷川 (JAMSS、一般普及担当)、木暮 (JSF)

参考文献: 石川正道: Int. J. Microgravity Sci. Appl., 34(2), 340205 (2017)