
2024年9月4日
令和6年度（2024年度）土木学会全国大会 研究討論会
「月面開発における土木の役割」 ～建設ロボットの宇宙と地球のデュアルユースに向けて～

小型ロボットプラットフォームを用いた 月面着陸拠点構築シナリオ

石上 玄也
(慶應義塾大学 理工学部)



これからの宇宙開発 | 月探査利用について

■ 国際宇宙探査協働グループ (ISECG)

- 各国宇宙機関での月～火星探査シナリオ検討
- Global Exploration Roadmap (GER)

■ 月面拠点構築

- 米国：アルテミス計画
 - ✓ 2024年 有人月面探査
 - ✓ 2028年 月面拠点建設
 - ✓ CLPS (民間による商業月輸送)
- 欧州：ESA主導での構想
- 中国：月南極に拠点構築

■ 国内の動向

- JAXA：SLIM, LUPEXなど。
- 大手ゼネコン各社による拠点構想
- 有人与圧ローバ (JAXA, Toyota)
- スターダストプログラム, 宇宙産業ビジョンなど

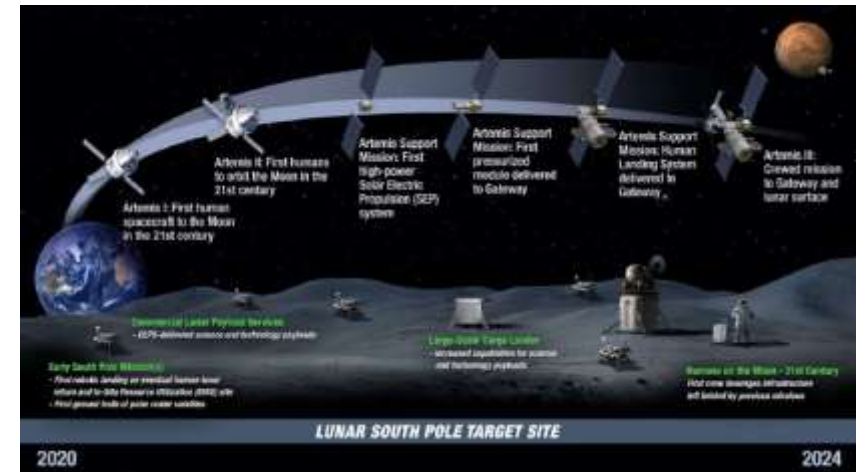


Image courtesy:
NASA

**今後さらに月探査利用が高まる機運にあり、
月面拠点インフラ構築が必要となる。**

■ 2050年

- 地球と月が科学・生活・文化・社会・経済活動において密に繋がり、**宇宙利活用における新たな価値と市場が創出**され、月面由来のイノベーションが**地球に還元する循環的経済圏**が成立される。

■ 2040年

- 月面に1000人規模居住だが、基本的な作業は無人口ロボットで実施する。インフラ設営、管理運営などに有人がリモートで実施する。
- 物資輸送規模は、1兆～10兆円という試算。輸送技術は既に各国民間含めて始まっている。
- 宇宙ビジネス市場規模は120兆円になる
 - ✓ c.f. 2019年時点では41.7兆円、うち衛星サービス、GPS関連がそれぞれ30%ずつであり、2/3は宇宙を使った地上ユーザが市場になっている。



**今後さらに月探査利用が高まる機運にあり、
月面拠点インフラ構築が必要となる。**

出典

- ISECG-GER
- 月面産業ビジョン協議会報告書
- 日本航空宇宙学会宇宙ビジョン2050

分科会作成「日本のアルテミス(案)2020」: 人類活動圏の拡大

20年以内に20-50名規模の有人月面基地を建設. その先の月面は民間主体の持続的な活動へ移行. JAXAは火星有人へ.



将来の月面開発と産業化における課題

月面基地建設ロードマップ におけるギャップ

- 概して総花的である。
- 何をいつだれがどのように、どのような優先度で構築するか？というシナリオがない。

ロボット技術とコスト 含む実現可能性のギャップ

- 商業月面輸送コスト：約1.6億円/kg
- 大型機械の開発のみが行われている。
- 土工作业のみであり、建設における「調査・設計・施工」という全体の流れ捉えた開発が稀有である。

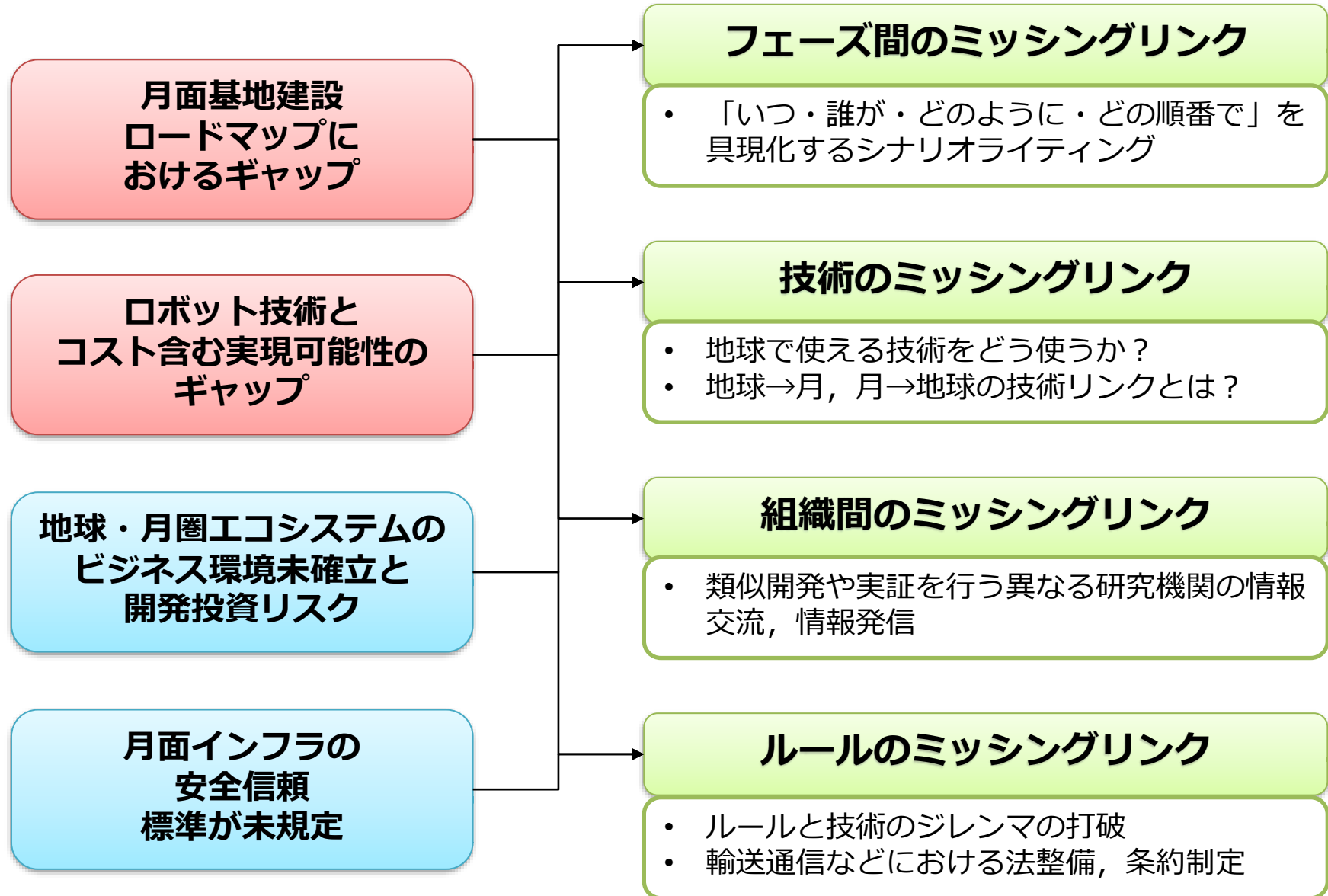
地球・月圏エコシステムの ビジネス環境未確立と 開発投資リスク

- 投資回収リスクが主要因であり、地球でのデュアルユースを考慮せざるを得ない（→大型化）。
- 月面ビジネス環境が未確立であり、技術イノベーションを持続可能な月面産業として醸成できるかが不透明である（c.f. 地球の南極）。
- 月面開発の黎明期から産業展開期に至るシナリオにおいて、技術成熟度（TRL）とビジネス成熟度（BRL）を適切に関連付けたロードマップが未確立である。

月面インフラの安全信頼 標準が未規制

- 月面用設計施工基準や建築基準法が皆無である。
 - 過剰な安全係数→コスト超過→産業化を阻害
 - 低い信頼度→リスク大→産業化を阻害

課題解決に向けて：「4つのミッシングリンクを繋ぐ」



将来の月面開発と産業化における課題解決に向けて

月面基地建設ロードマップ
におけるギャップ

地球・月圏エコシステムの
ビジネス環境未確立と
開発投資リスク

ロボット技術とコスト
含む実現可能性のギャップ

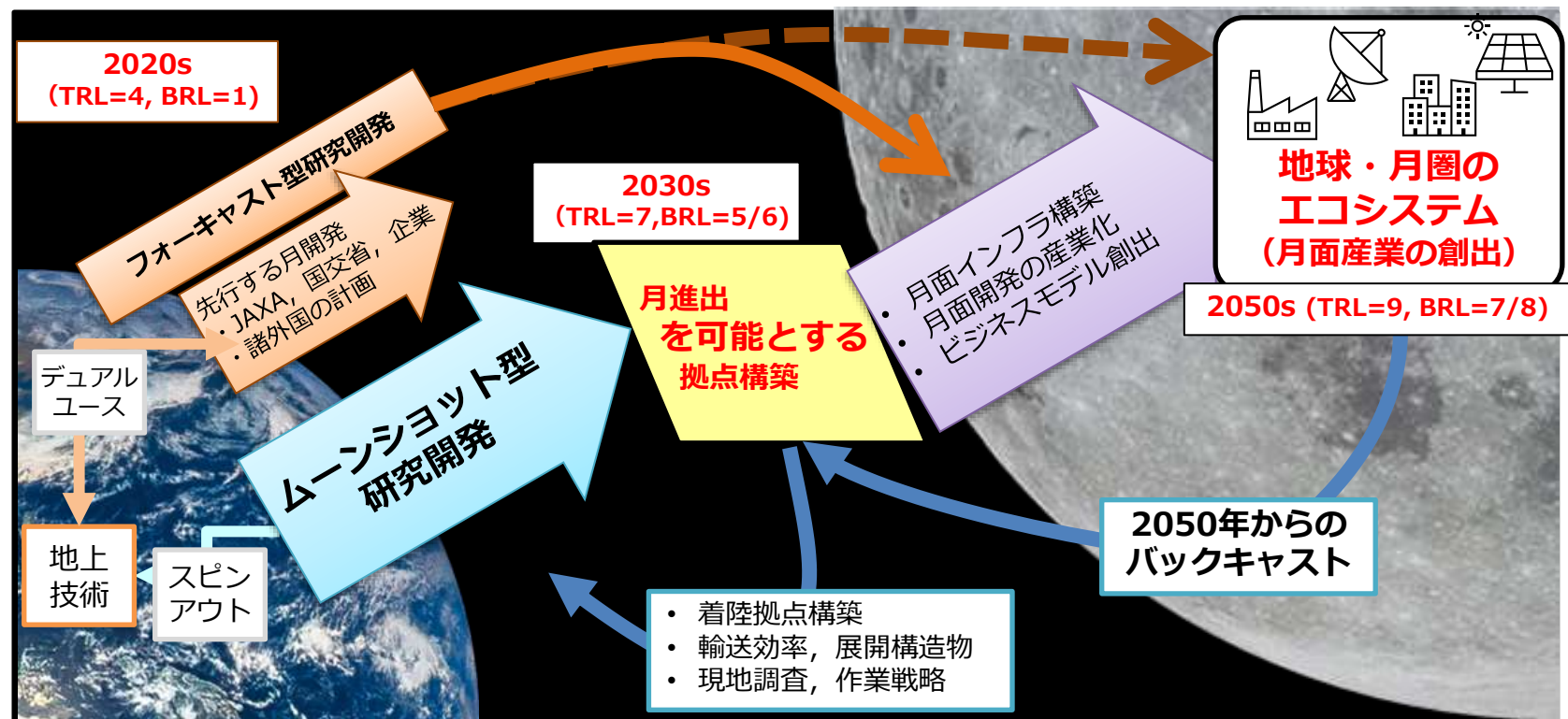
月面インフラの安全信頼
標準が未規制

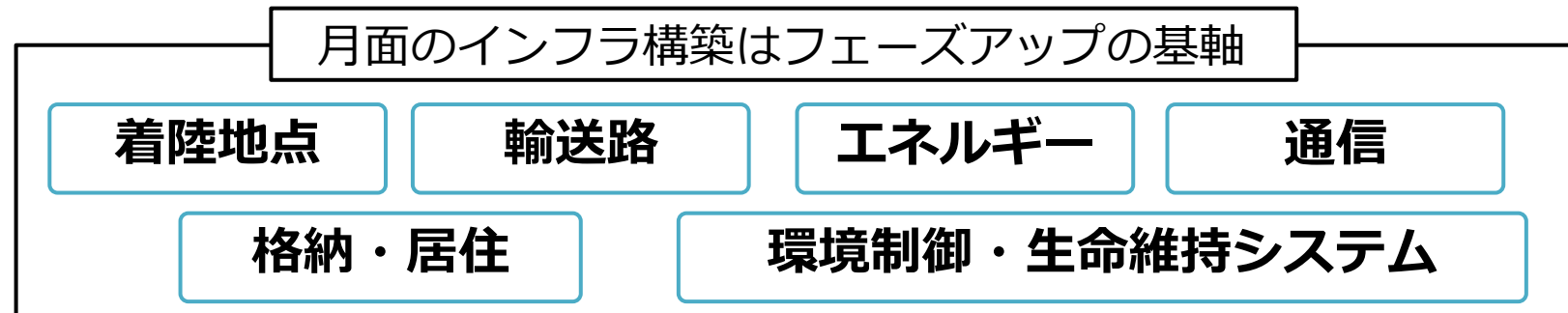
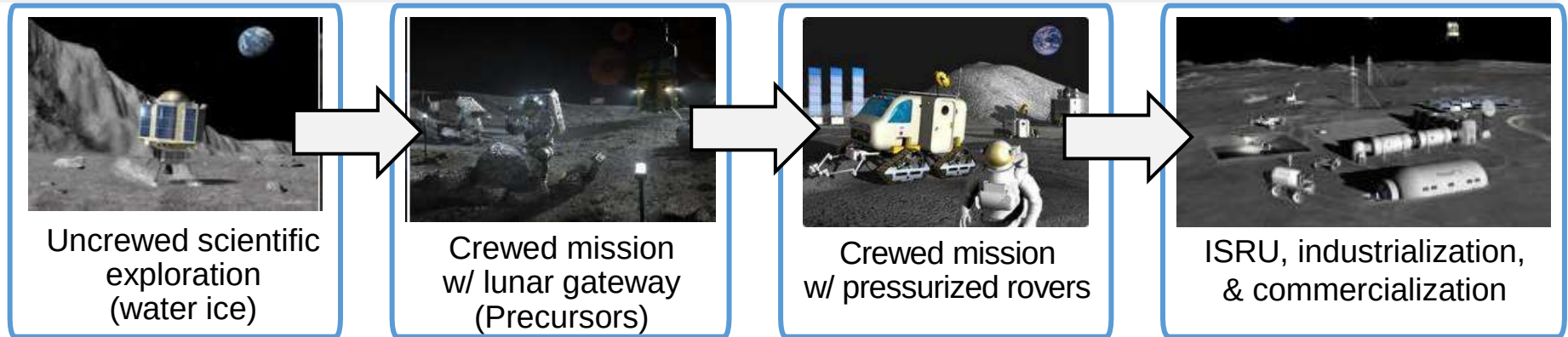
ロボットシステムだけではなく、
ロボットを使うシナリオの設計を
含めた策定が必須である

限定的なリソース環境下にある日本が、
月面産業の一翼を担う（リードする）場合、
ロボット分野として何に取り組むべきか？

ムーンショットPJ | AIロボット技術による月面開拓システム

- 永谷PM（東大）のもとで、小型作業ロボットによる月拠点構築シナリオの策定、ロボット開発に従事（2020.12～2024.3）





月面インフラ構築シナリオのOpen issue

「いつ・何を・どのような順で、どのように構築するか？」

まずは、**月面着陸拠点**が必要ではないだろうか？

なぜ着陸拠点？

着陸成功率の飛躍的な向上

- 重力天体着陸は多くの失敗事例がある（**成功率は4割**）。
- 斜面や凹凸地形，岩石乗り上げ，航法誘導系，推進系の誤作動，構造系の不具合など



月着陸の高精度化

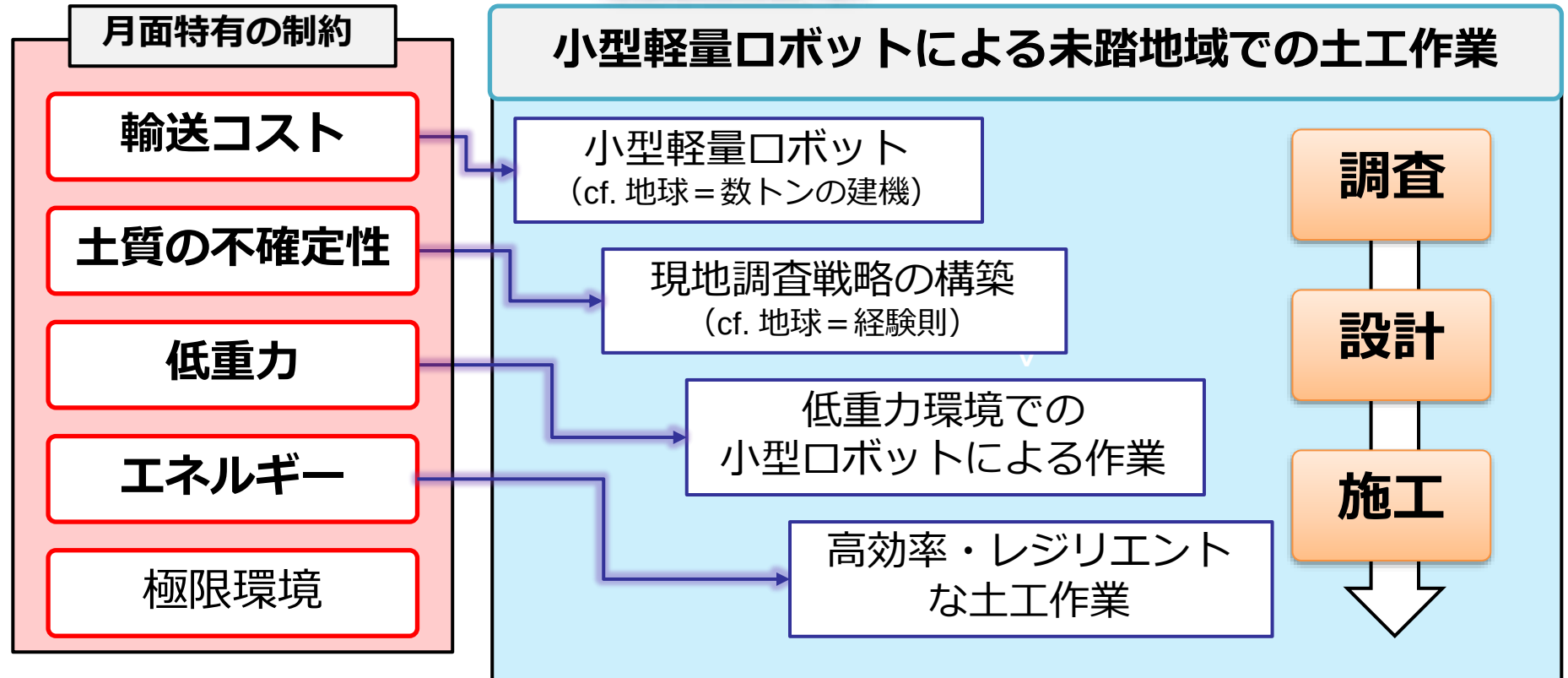
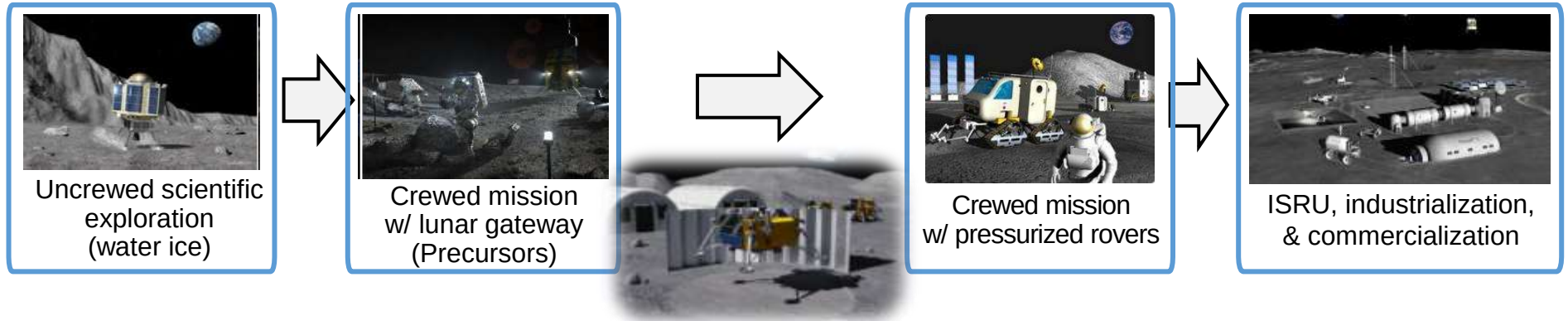
- センサ・処理・制御課題が**複合的に関連**している。
- 着陸機高機能化→重量増によってペイロード（輸送量）が制限されるのは好ましくない。



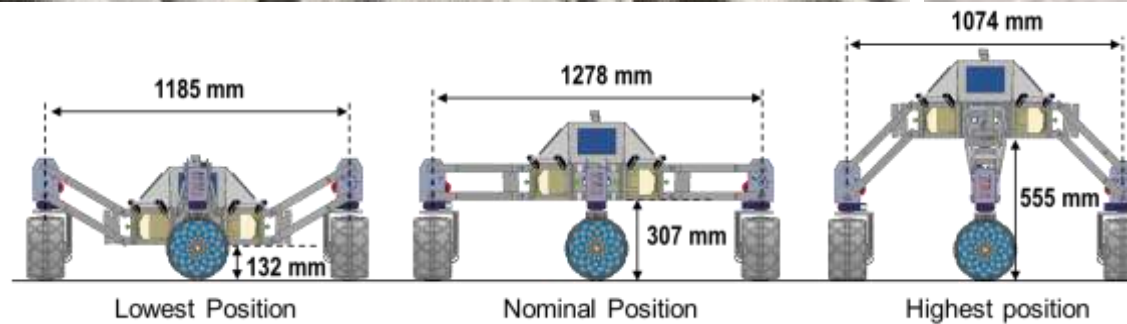
高頻度の月面輸送の実現

- 月の科学&月を利用した科学，月利用，将来の月面居住構築・有人探査などを**促進**する。
- 月面への大量輸送時代が到来するという時代背景ニーズに即したシナリオとなる。
- 着陸拠点構築を進めることは，**日本のプレゼンス獲得**においても肝要である。

月面着陸拠点構築 | いつ・どのように？



M³Rover (M³ = Multipurpose/Modularized/Mobility)



- 50 kg, 12 DOF (3 for each active-suspension wheel)
- The vehicle body has a cargo space for mounting retrofit construction tools.

■ 掲載先（慶應広報まとめ）

- NHK
- 日テレ
- テレビ朝日
- 共同通信
- 日本経済新聞
- 毎日新聞
- 東京新聞
- 河北新報
- 読売新聞オンライン
- 下野新聞SOON
- 時事ドットコム
- FNNプライムオンライン
- ABEMATIMES
- Tech+
- その他，2次記事など，



月面基地建設ロードマップ
におけるギャップ

地球・月圏エコシステム
のビジネス環境未確立と
開発投資リスク

ロボット技術とコスト
含む実現可能性のギャップ

月面インフラの安全信頼
標準が未規制

- 月着陸拠点構築に関する小型作業ロボット技術全般は、月面産業の規模に依らず（万が一、産業化されなくても）、基礎的な月面インフラの構築と維持に必須の技術となっている。
- JAXA, 国交省, 各学会委員会やWGとの連携ハブ構築を目指す。
 - 土木学会/月面建設技術シンポジウム（2023年3月, 2024年3月, 2024年9月）
 - 宇科連/月面建設OS（2023年10月, 2024年11月）
- 小型ロボットによるデータ収集によって、多様なシナリオと知見の蓄積から、安全信頼標準の策定を進める。
 - 連携コンソーシアム, あるいは事業化？.