

シミズの宇宙開発

2023年3月16日

月面建設技術シンポジウム

清水建設株式会社

フロンティア開発室 宇宙開発部

主査 博士（工学）

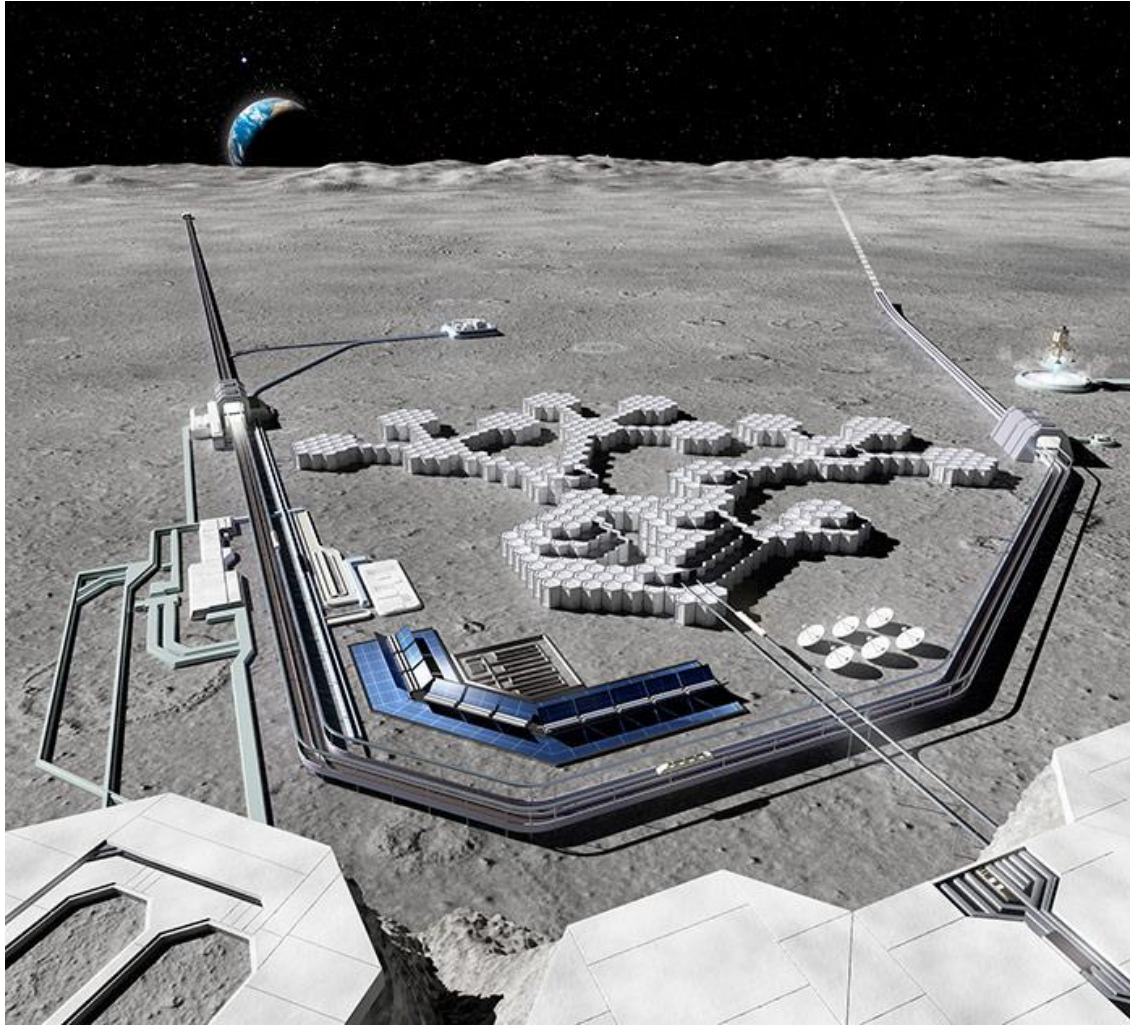
鵜山尚大

- I. シミズドリーム
- II. 月面拠点建設の課題
- III. シミズの研究開発
- IV. 終わりに

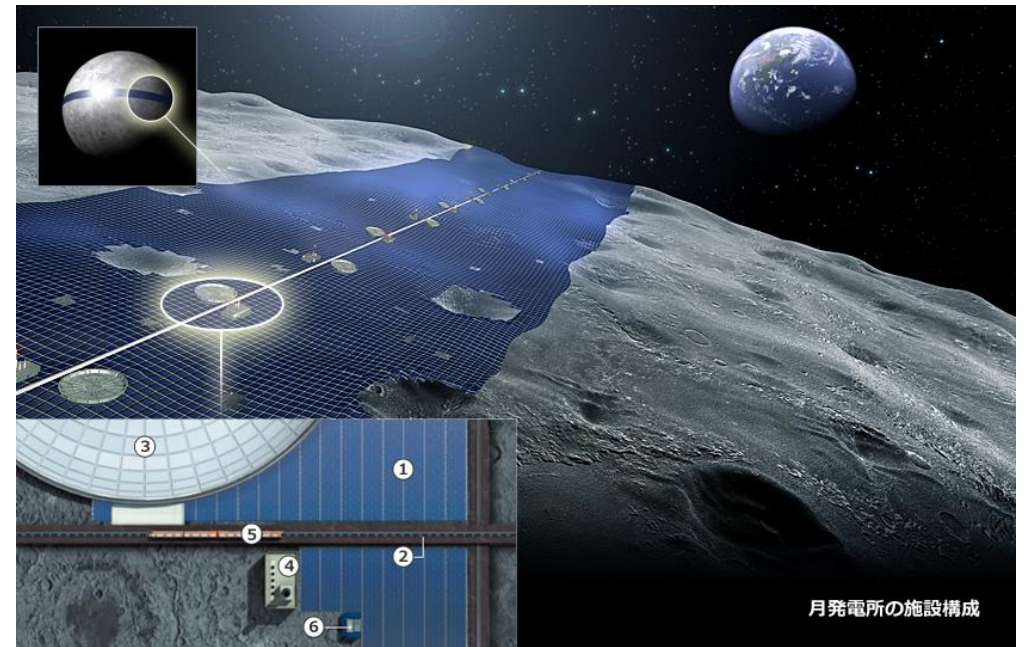
月開発利用 シミズ・ドリーム

- 1987年 前身の宇宙開発室発足
- 1988年 コンクリート製月面基地構想発表
- 2009年 月太陽発電ルナリング構想発表
- 2018年 フロンティア開発室宇宙開発部発足

来る時代を見据え、今すべき研究開発を進める



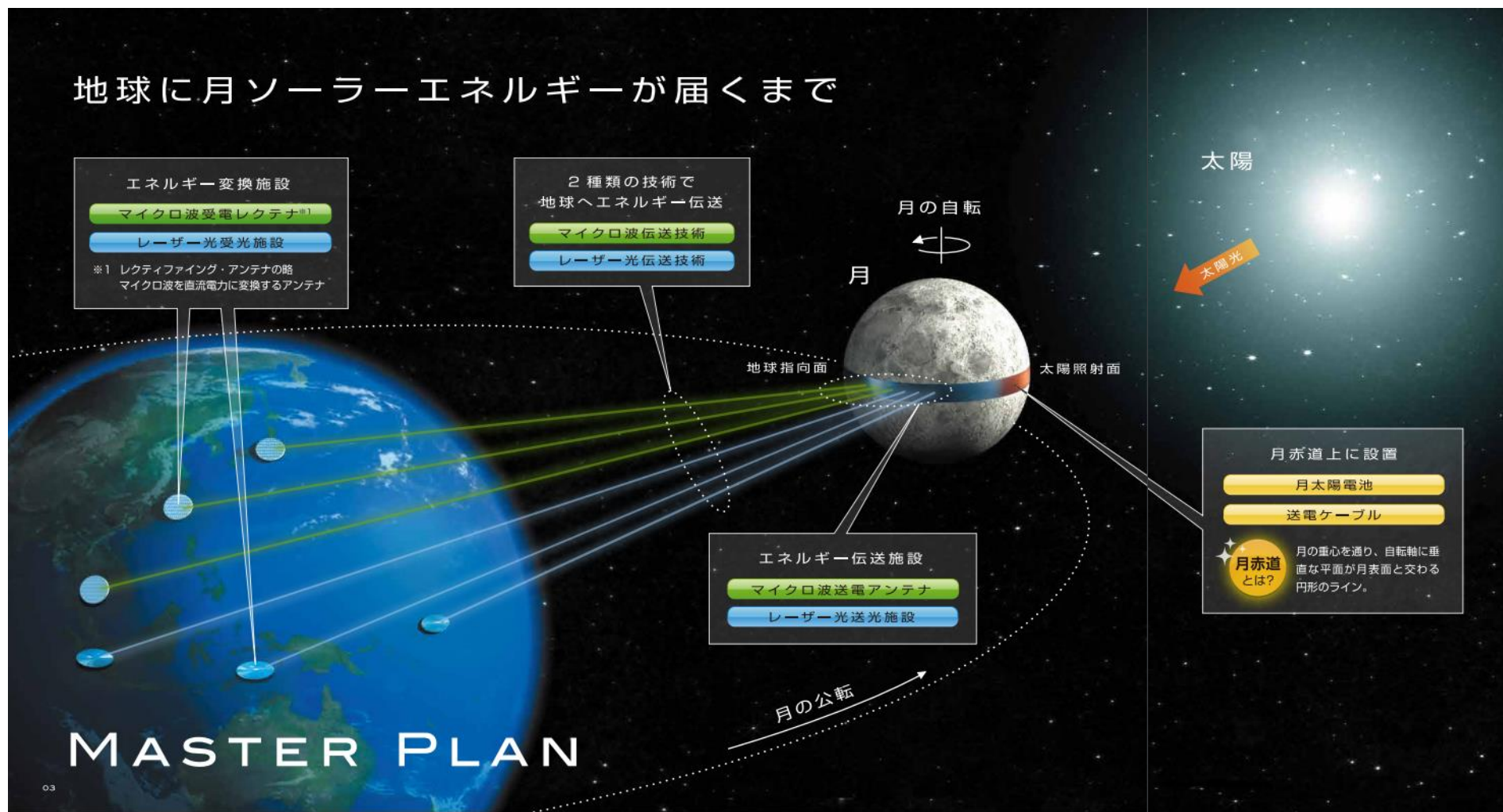
コンクリート製月面基地（1988年）



月太陽発電ルナリング（2009年）

LUNA RING (発表：2009年)

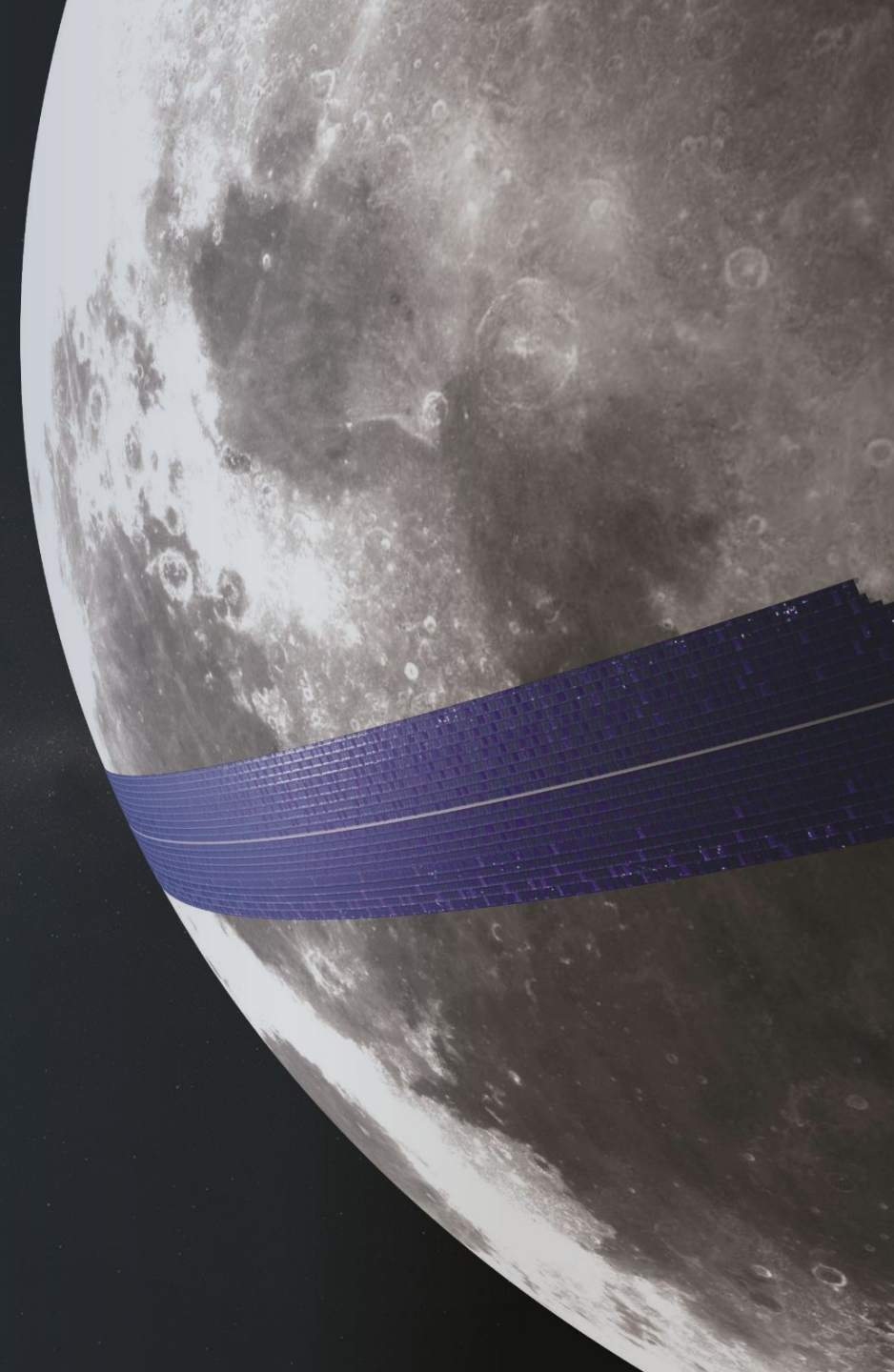
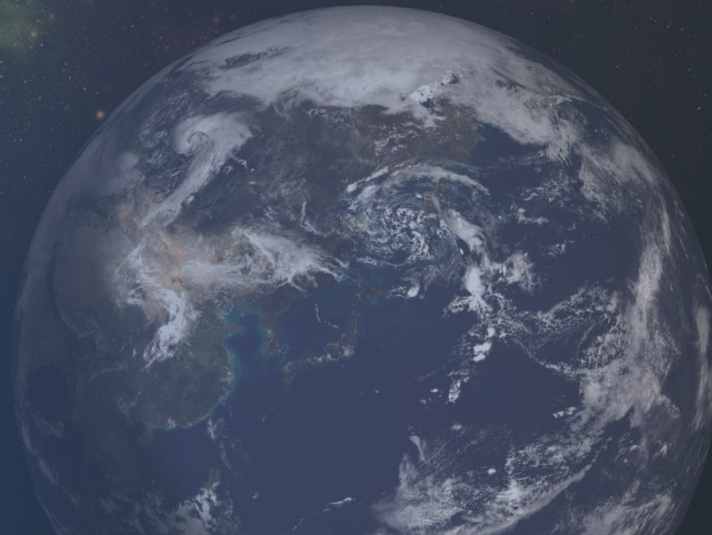
『ルナリング』は巨大な月太陽発電施設で、月から地球のあらゆる場所に電気を供給し、世界中誰もが使えるクリーンエネルギーソリューション。



II. 月面拠点建設の課題

月の環境は地上とは全く異なる。
地面のある低重力環境での拠点建設に向けて
建設業への期待は大きい。

**地上建設との共通部分と相違部分を理解し、
どのように現地にカスタマイズするかがカギ。**

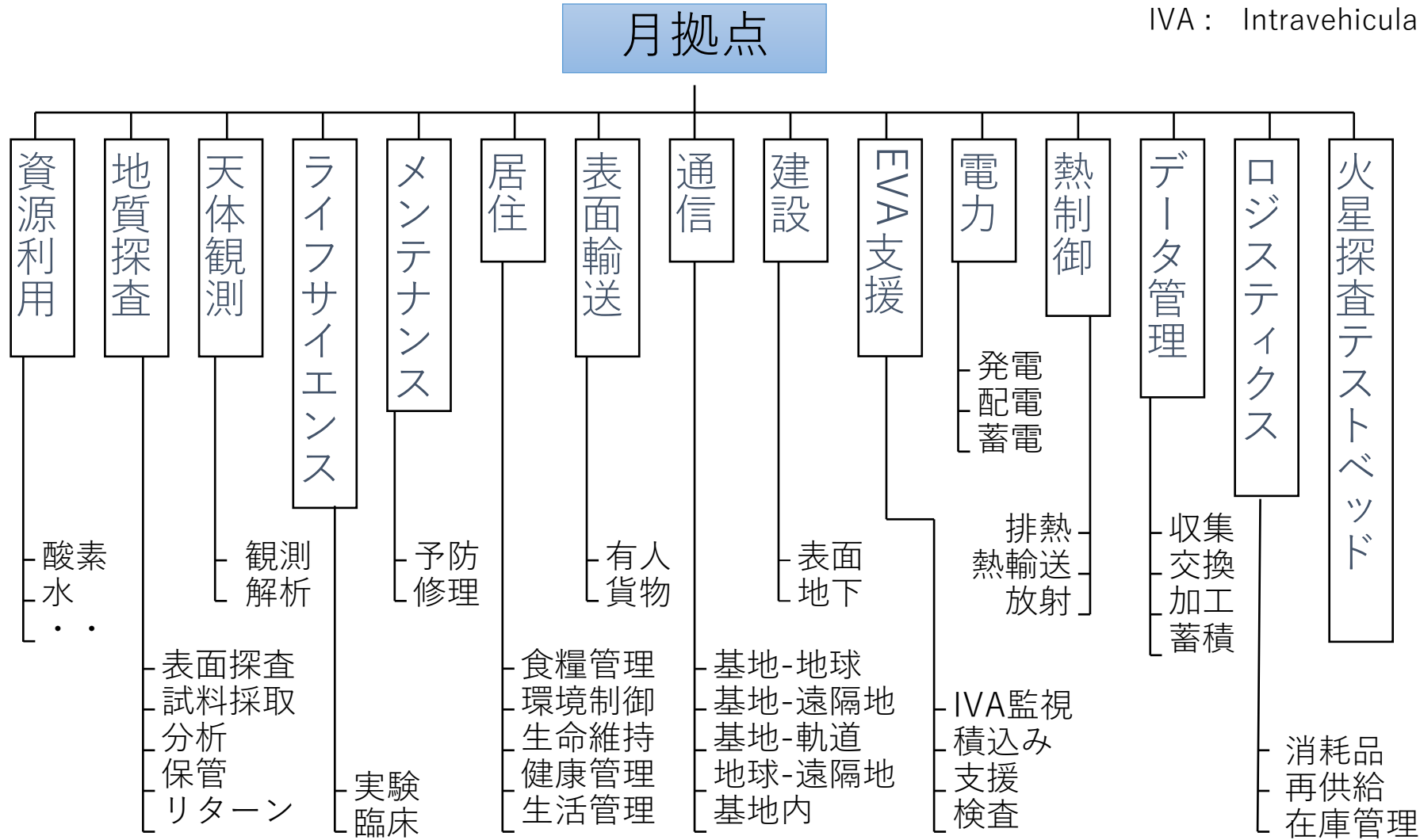


地上と月面の環境比較

	地上	月面	補足
地表面	水, 土, 動植物, 人工物	レゴリス (月の砂), 礫, クレーター	レゴリスは細かく砕かれた柔らかい数cm~数十mの堆積層
重力	1 G (9.8 m/s ²)	0.167 G (1.6 m/s ²)	重力が地上の1/6 (軽い, 抑えが効きにくい)
大気圧	10 ⁵ Pa	10 ⁻⁸ Pa	高真空 (居住空間は陽圧)
温度	-90 ~ 90 °C	-170 ~ +110 °C (赤道付近) -238 (永久影) ~ -50 °C (極域)	温度差が激しい
日陰周期	1 日	29.5 日	-170°C以下の極寒の夜が14日間続く
放射線	0.39 mSv/yr	~ 500 mSv/yr (~1,400mSv/yrとの報告も)	月面では1年もかからず 職業人年間限度50mSvを超える
隕石	多くは大気で燃え尽きる	小さな隕石まで月面を直撃する	大気がないので燃え尽きず 月面まで到達する
磁場	双極性 (北極と南極がある)	非双極性 (局所的に磁気異常)	コンパスは機能しない 宇宙放射線を防げない
地震動	マグニチュード < 10	マグニチュード < 4 継続時間が長い (一部は 30 分以上かけて減衰)	震度, 頻度は高くないが 隕石が近くに当たれば 大きな地震発生の可能性アリ

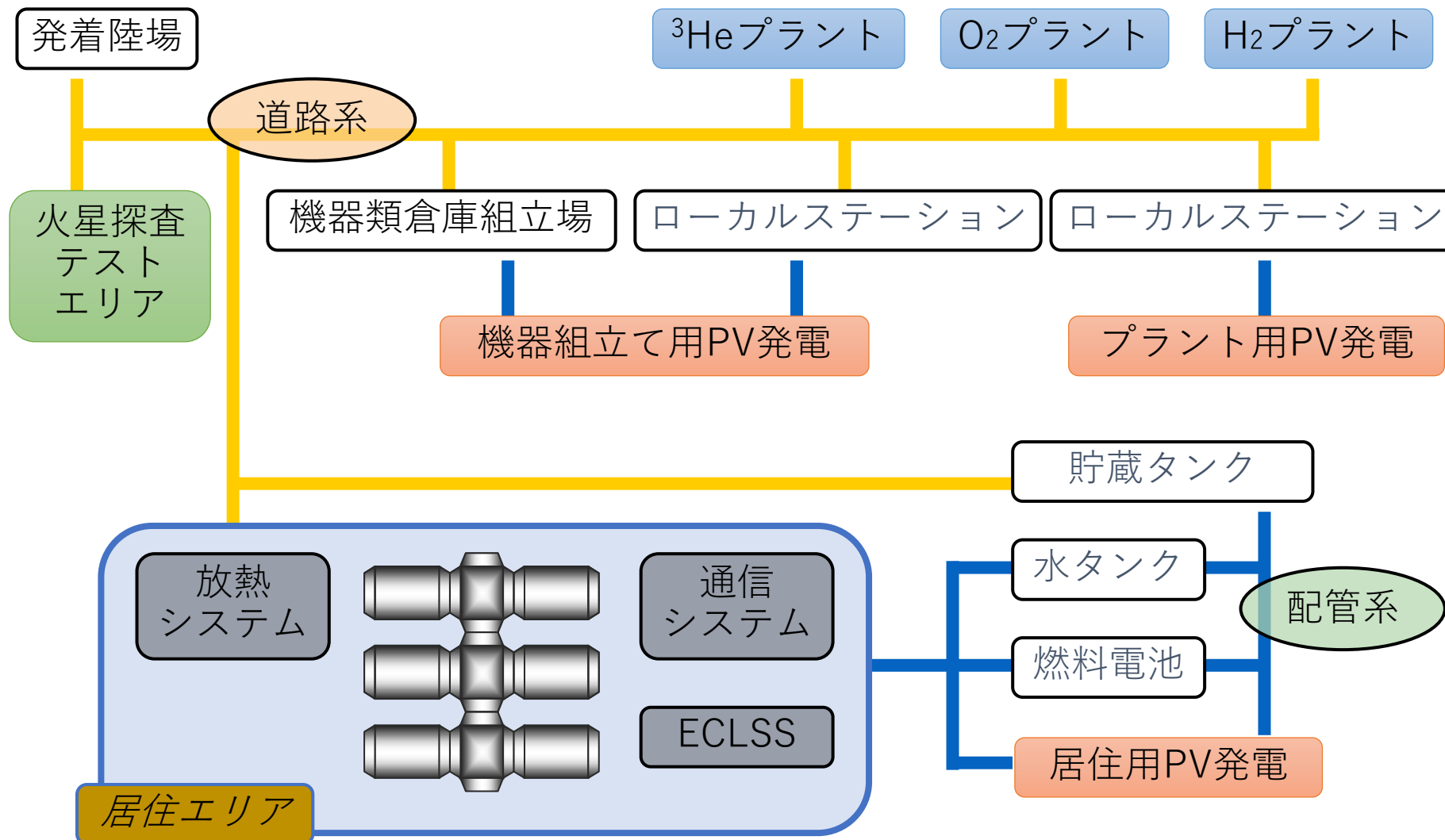
月面拠点 基地機能例

EVA: Extravehicular Activity, 船外活動
 IVA: Intravehicular Activity, 船内活動



参考：清水建設宇宙開発室
 「月へ、ふたたび一月に仕事場をつくる」、1999年10月

月面施設レイアウト例



PV: Photovoltaic,
太陽光発電

ECLSS: Environmental Control and Life Support System, 環境・生命維持システム

高輸送費 – 現地資源の活用は必須 –

◆ 地球から月までの運搬コスト：約 1 億円/kg

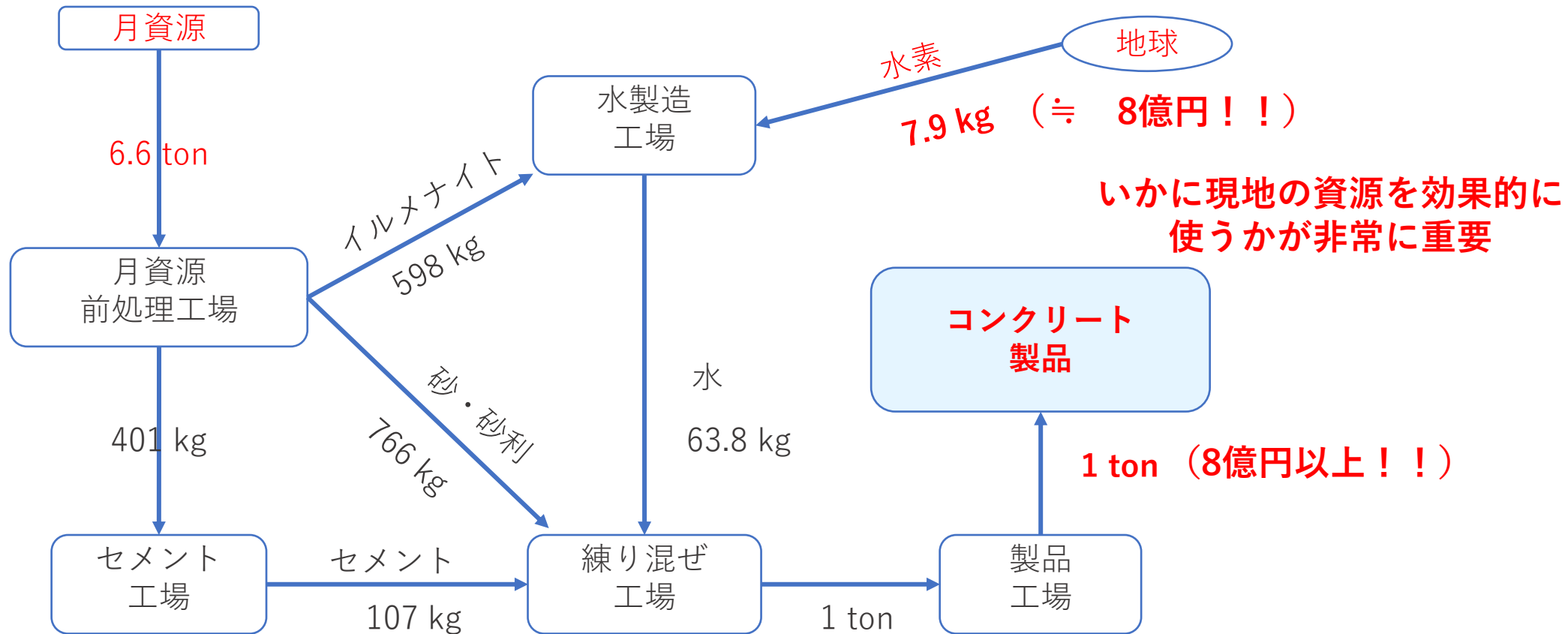


コンクリートブロック
(10 x 19 x 39 cm)
1 個：10.3 kg = 約10 億円

JAXA宇宙探査イノベーションハブHP, 地産・地消型探査技術資料より

コンクリートの製造検討

月でコンクリートを製造する方法 (1990年代の試算：清水建設)



地上建設と月面建設の違い 例

- ◆ 作業員に限られる（＝ 宇宙飛行士の作業）
- ◆ 資材の運搬費が高額（現状、民間ベースで1kgあたり1億円以上）
- ◆ 空気が無く、潤滑や排熱が困難
- ◆ 風景のコントラストが強く視認性が悪い
- ◆ 月表土の細かい粒子が作業に影響する（特にレンズ、可動部）
- ◆ 水が使えないので洗浄が困難
- ◆ 温度環境が厳しい（赤道付近では温度差200度以上も）
- ◆ 日照周期が29日である（昼が14.5日、夜が14.5日続く）
- ◆ 重力が小さいので重機作業が困難

月でも使えるモノ，月では使えないモノの例

月面で作業をする際の周囲は真空。真空中で使えるもの使えないものがある。

使えるモノ

- **電磁波**
→ 光，レーザー，無線
- **金属製工具**
→ ドライバー，カッター
- **ガラス**

条件付きで使えるモノ

- **火器**
→ 酸素がないので酸化剤を持っていく
- **コンクリート**
→ 与圧室内で水中養生後なら真空でも利用可
- **電動工具，電動重機**
→ 潤滑油を使わないもの（固体潤滑）
- **音（声，警報）**
→ マイクとスピーカを利用（空気がなく音が直接伝わらない）

使えないモノ

- **水**
→ 蒸発してしまう
- **油圧重機**
→ 外気と取り込めない
- **宇宙用以外の接着剤**
→ 液体が蒸発してしまう

Q. 水準器はそのまま使える？



内部：1気圧液体
外部：真空
極端な温度差

→ 使用可能な条件は？
月面向けに改良するには？

使えないモノ番外編

- **GPSなどの測位情報**
→ 衛星が飛んでいない
- **コンパス**
→ 磁場が場所によって違う

月面拠点建設実現に重要なこと

□ 地上での建設技術をできるだけ月面拠点建設で生かす。

- 存在しない技術を新たに作るのではなく、今ある技術がどこまで月面で使えるかを見極める。

➔ 「地上でできることを月面でも」

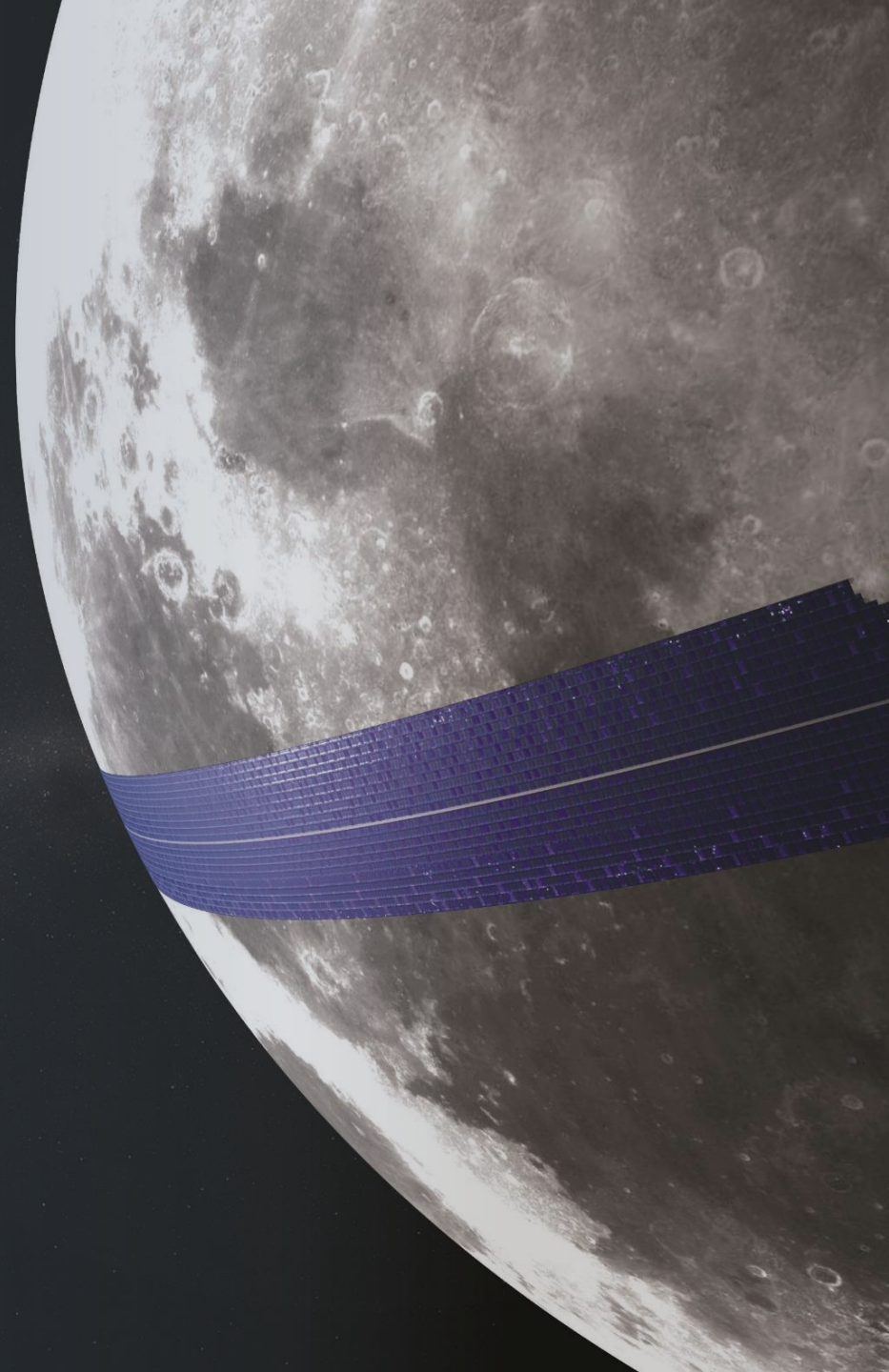
□ 月面建設用に地上技術をカスタマイズする。

- そのまま適用できないなら、現地環境に合わせてカスタマイズする。
- 現地環境にも使え、尚且つそれが地上技術の革新につながるとベスト。
 - 宇宙と地上のデュアルユース

➔ 「極限環境を考えることで地上のイノベーションへ」

III. シミズの研究開発紹介

1987年から続く清水建設の
月面建設への挑戦



模擬月土（シミュラント，FJS-1ほか）開発 化学組成

「現地を知る」ための取り組み

※FJS-1データは当時のロット

高地

海



FJS-1は国内外で教育，研究開発目的で幅広く利用されている。

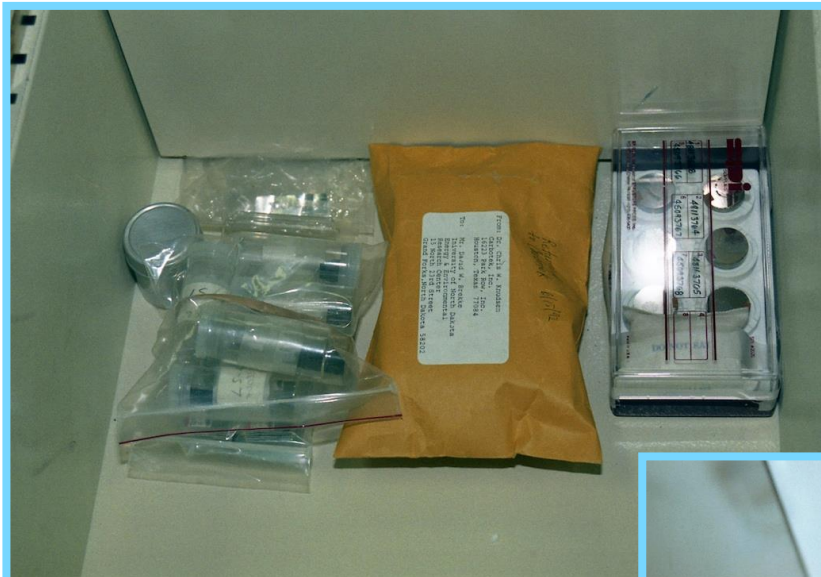
	高地			海			
	#1	#1	#2	#1	#1	#1	#2
	Apollo-16	NU-LHT-1M (NASA)	Kohyama (清水)	Apollo-12	JSC-1A (NASA)	FJS-1* (清水)	Oshima (清水)
SiO ₂	45	46.6	47.49	46.3	46.8	49.14	44.4
TiO ₂	0.54	0.115	0.14	3	2.44	1.91	5.54
Al ₂ O ₃	27.3	21.55	22.59	12.9	13.9	16.23	12.6
FeO	5.1	*5.08	*8.53	15.1	*12.1	*13.07	*16.1
MnO	0.3	0.09	0.17	0.22	0.21	0.19	0.36
MgO	5.7	9.5	10.24	9.3	5.6	3.84	7
CaO	15.7	12.6	8.02	10.7	10.5	9.13	9.7
Na ₂ O	0.46	0.965	1.65	0.54	3.89	2.75	2.09

*シミュラントはFeOとFe₂O₃を合算した値

#1: NASA MSFC計測

#2: 清水建設計測

極域以外で水を確保するための取り組み

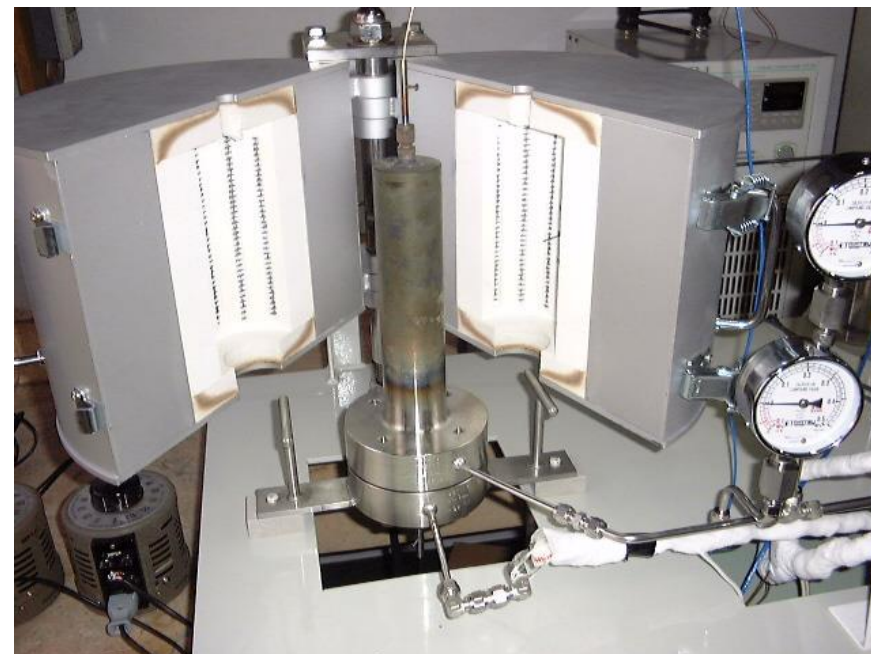


水素還元により
アポロサンプルから
水を製造

アポロ17号サンプル
No. 70035



NASA-Carbotek-清水



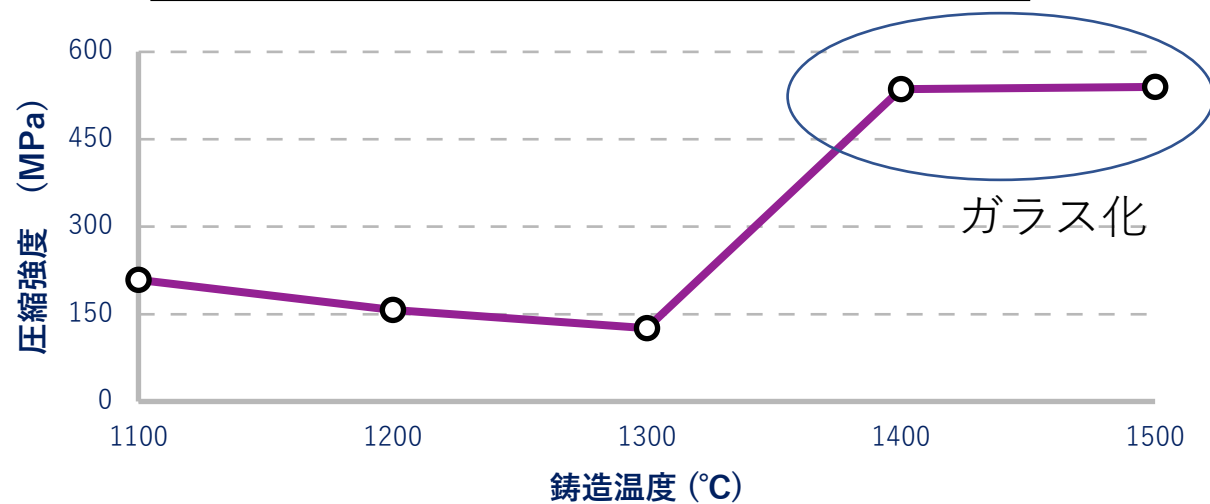
- 模擬月土 (FJS-1) でも同様に水を製造できることを確認.

東工大-清水-NAL (現JAXA)

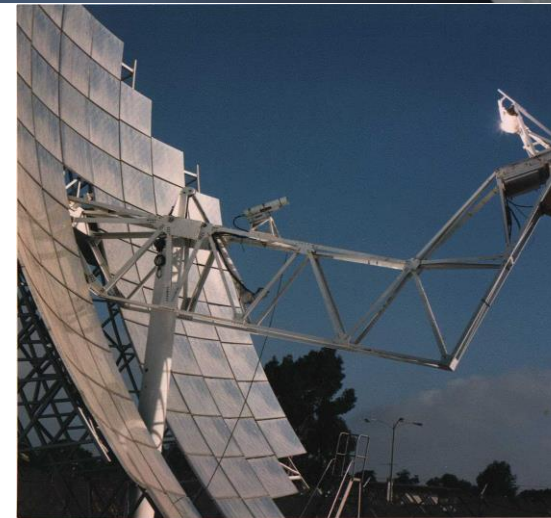
現地資源利用 – 模擬月土 (FJS-1) を用いた鋳造材製造実験

- ・ 加熱・冷却制御
- ・ 焼結

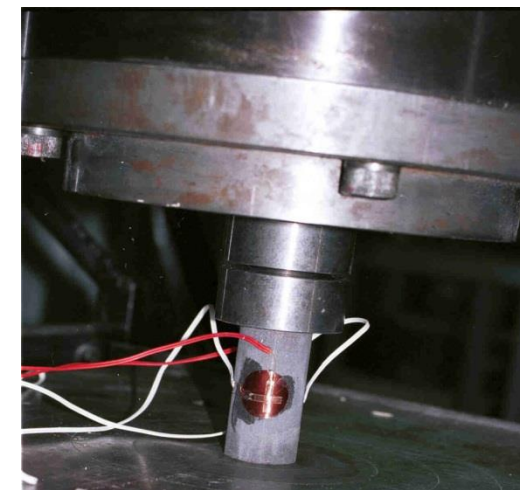
現地で建設資材を確保するための取り組み



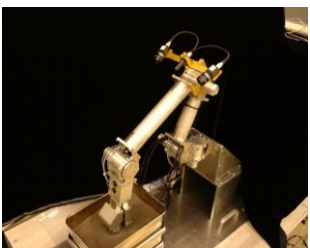
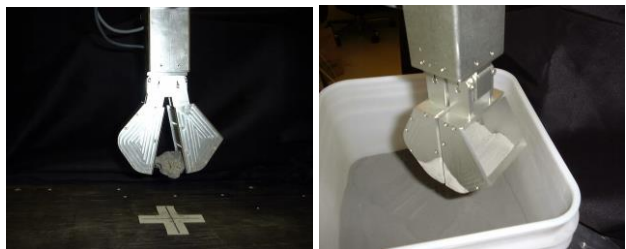
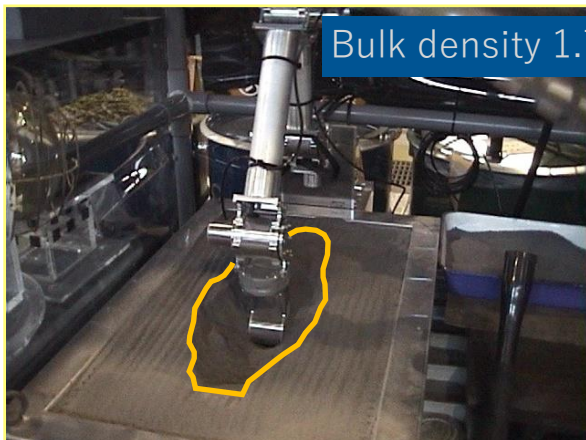
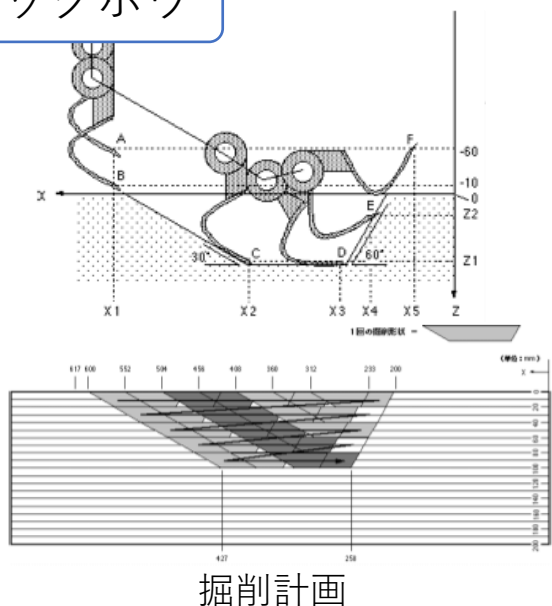
レゴリスブロック製造実験



太陽集光によるシミュラント溶融
(McDonnell Douglas (現Boeing) -清水建設)



バックホウ



- レゴリスの密度により掘削構の形状が変わる
- ロボット側が受ける反力も変わる

ドリル



真空チャンバ



チャンバ内部とドリル



ドリル先端



掘削孔内部の様子

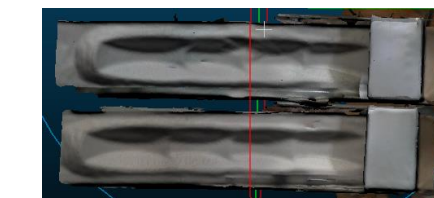
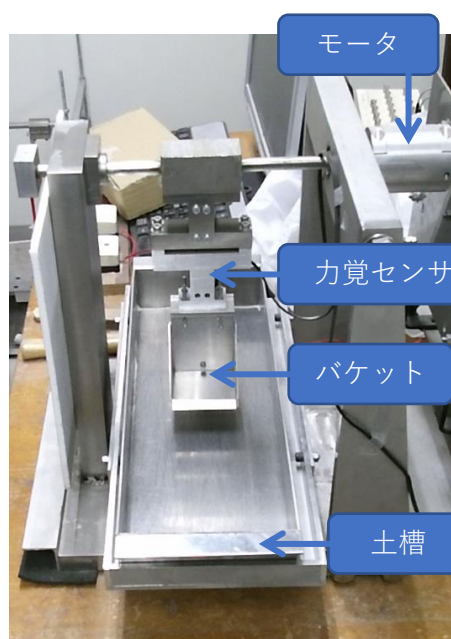
- レゴリス密度が上がると排土・排熱がより困難に (流動化や冷却のための水が使えないため)

効率的なバケット掘削のための地盤情報取得技術

(2017年 JAXA宇宙探査イノベーションハブ成果, JAXA-東北大学-清水建設)

【目的】

月や火星あるいは地上の無人化施工において効率的な掘削を行うために、地盤の変化を把握し、適切な掘削手順をリアルタイムに決定する技術を開発する。



Coded Light 方式で取得した掘削形状 (4回掘削)

模型バックホウによる掘削実験

ミニバックホウによる掘削実験

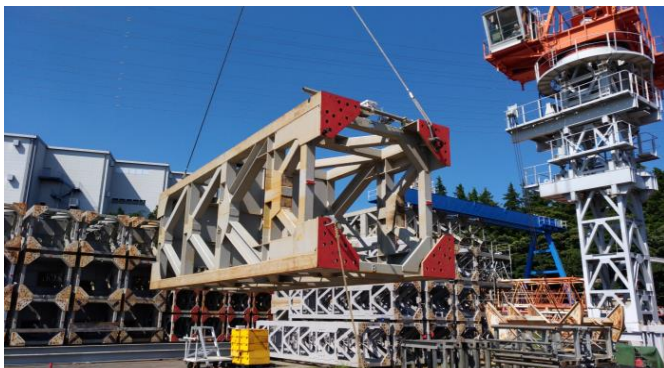


建築分野の無人化施工に関するシステム検討

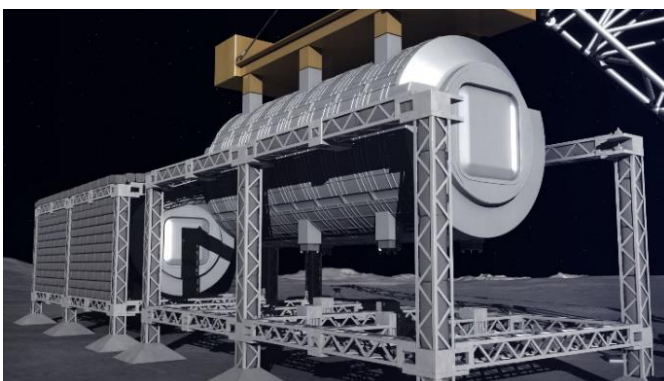
(2017年 JAXA宇宙探査イノベーションハブ成果, JAXA-清水建設)

【目的】

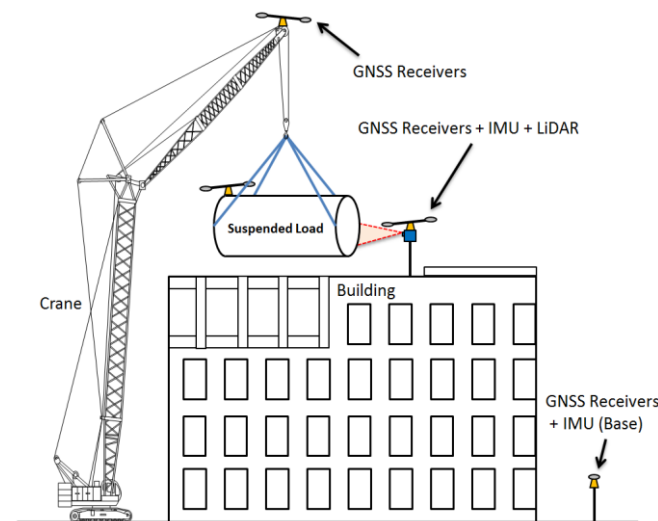
クレーンの無人作業における位置決め手法ならびに位置誤差を許容できる組立システムを開発する。



センサおよび墨出しシステムの検証実験



概念検討に基づく月面居住モジュールの組立状況図



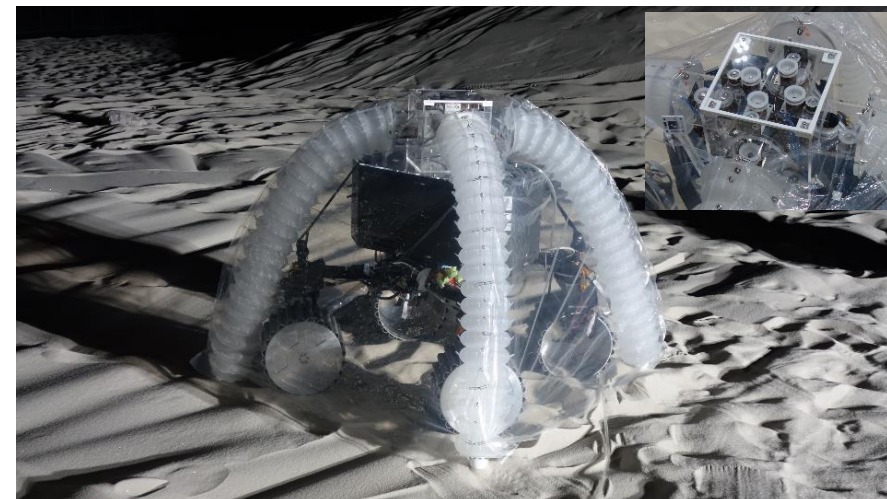
遠隔クレーン作業のための位置決めシステム

月面ローバ越夜※シェルターの検討

(2019年 JAXA宇宙探査イノベーションハブ成果, JAXA-太陽工業-摂南大学-清水建設)

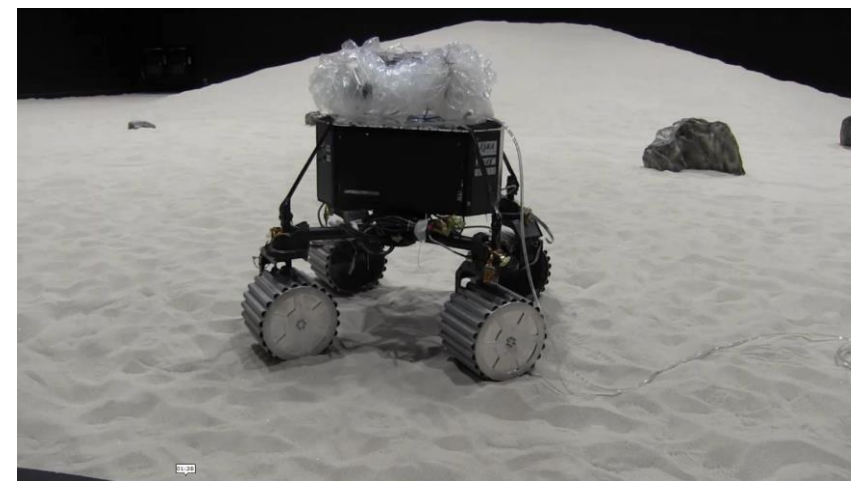
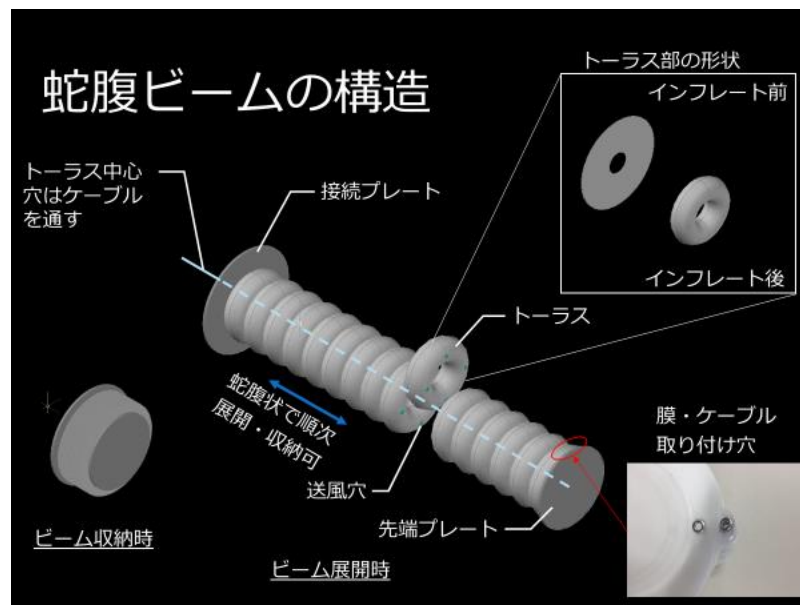
※『越夜』… 極寒の月の14日間の夜を越してシステムを再稼働すること。

- インフレータブル構造物の膜膨張機能と断熱機能を念頭に、月面上でローバから熱を逃がさないシェルターについて概念検討を実施。



展開収納デモ時の様子 (JAXA相模原宇宙探査フィールド)

- ✓ バネとワイヤを膜構造と併用することで少ないエネルギーで自動展開および自動収納を可能であることを確認した。



スペースコロニーデモンストレーションモジュール

(2019年, JAXA-東京理科大学-清水建設)

宇宙で暮らすために必要な要素技術についての研究を進めるため、デモモジュールを当社担当で製作。展開・収納や空間同士の接合部、外部との接合部などについて課題を整理した。



設置時の様子 (東京理科大学野田キャンパス)



内部の様子 (本体背面側から前室方向)

※「スターダストプログラム」
-内閣府主導の宇宙開発利用加速化戦略プログラム
STARDUST: “**ST**rategic Program for **A**ccelerating **R**esearch, **D**evelopment and **U**tilization of **S**pace **T**echnology”

国土交通省「宇宙無人建設革新技術開発推進プロジェクト」にて2件採択，現在推進中。

①「自律施工のための環境認識基盤システムの開発及び自律施工の実証」

清水建設，BOSCHの共同提案

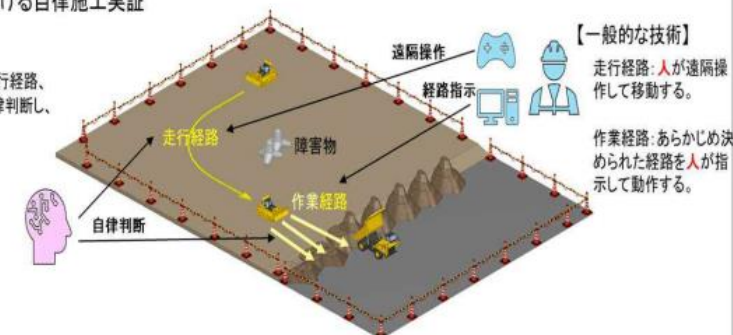
→ 無人建設技術の高度化につながる自律施工システムの開発・実証

2021年度～ ステージ：研究開発（R&D）

盛土工における自律施工実証

【本技術】

AIによって、走行経路、作業経路を自律判断し、動作する。



②「月面インフレーターブル居住モジュールの地上実証モデル構築」

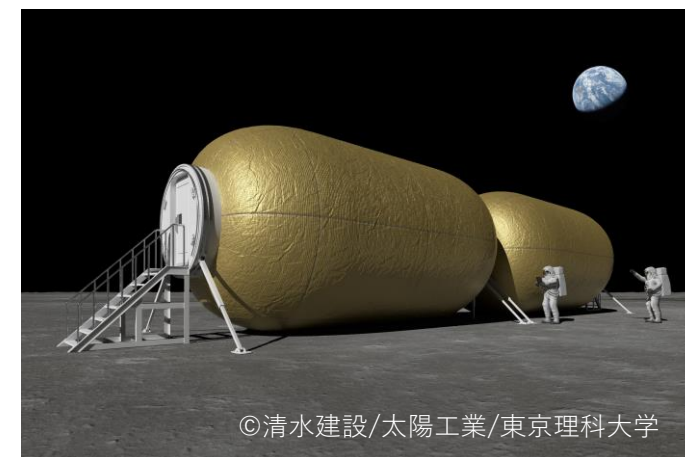
清水建設，太陽工業，東京理科大学の共同提案

→ 膜構造を利用し，**畳んで運び現地で展開し**

居住空間を作り出すための技術開発を推進中

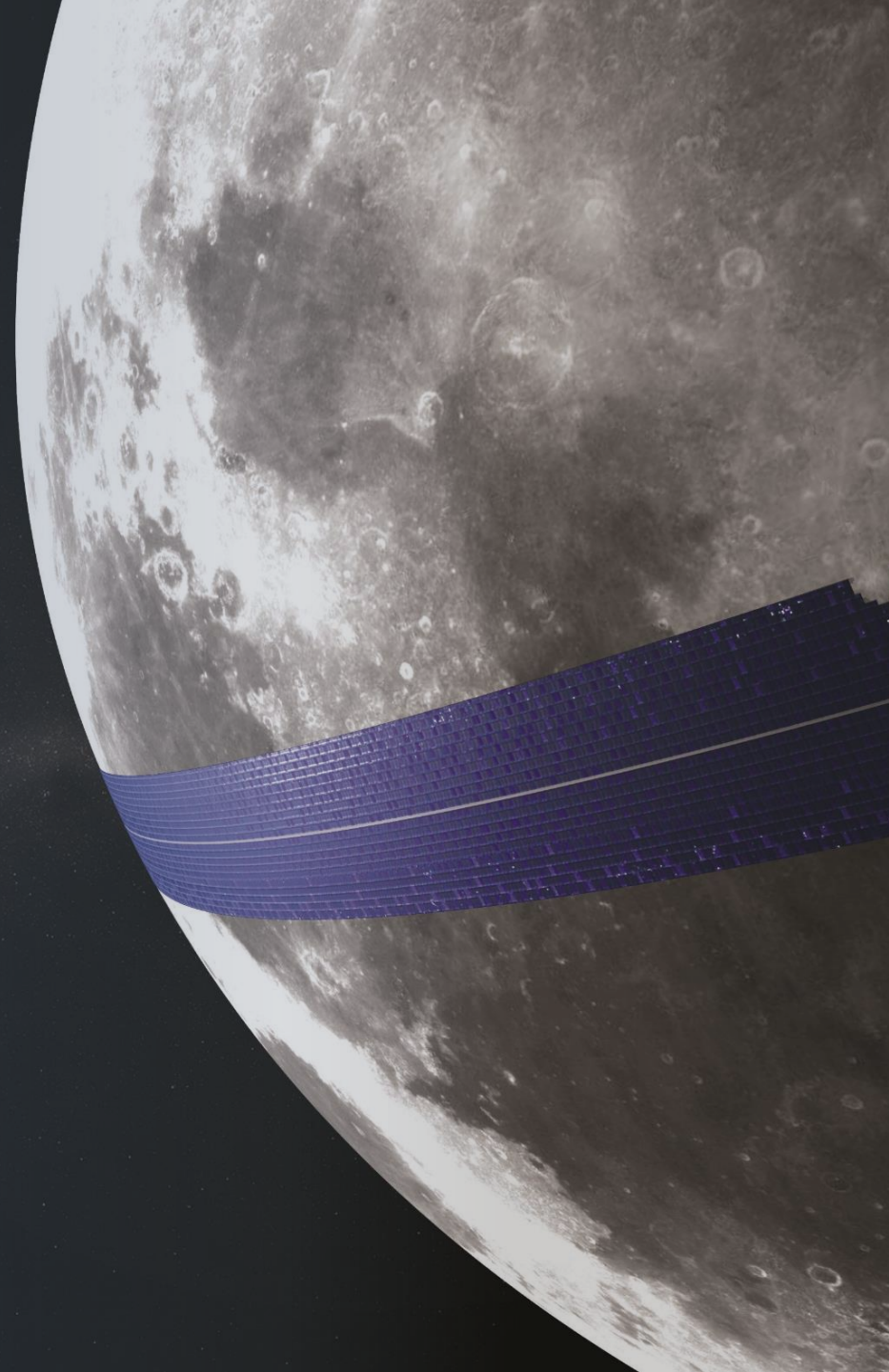
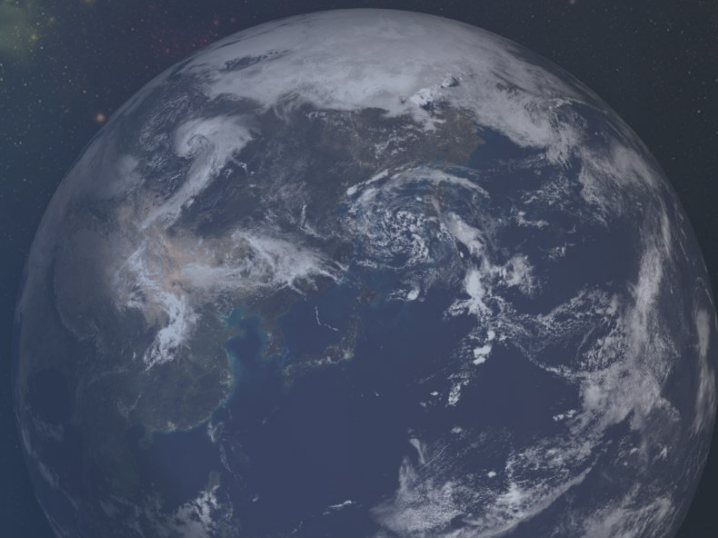
2021年度 ステージ：実現可能性検討（F/S）

2022年度～ ステージ：研究開発（R&D）へ移行



©清水建設/太陽工業/東京理科大学

IV. 終わりに



本日のまとめ

- ✓ 清水建設は1987年から月面建設実現に向けた研究開発を続けてきた。
- ✓ 月面建設には課題が山積
 - ✓ 輸送コストを現地資源利用で可能な限り抑えつつ、
 - ✓ 遠隔操縦や無人化施工技術を投入し、可能な限り人が作業する時間を減らし、
 - ✓ 長期に人が住める施設の実現が期待される
 - ✓ 「**地上でできることを月面でも**」 「**極限環境を考えることで地上のイノベーションへ**」
- ✓ 清水建設は月模擬土開発、施工ロボット技術、インフレーターブル構造等、今後も月面拠点建設に向けて研究開発を進め、将来の月利用時代に貢献できるよう努力していく。

終わり

