

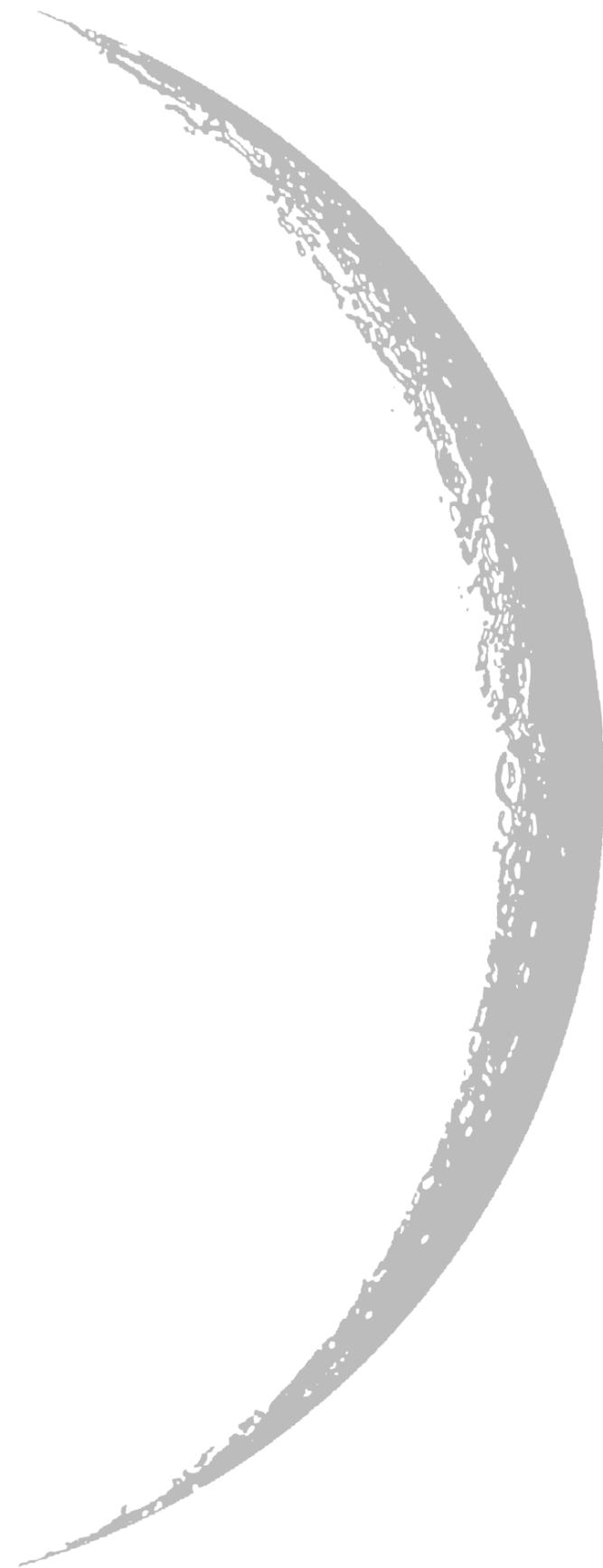
TAKASHI TSURUMAKI

第10回月惑星に社会を作るための勉強会

2021年4月23日

「月面居住施設建設と3Dプリント技術」

鶴巻 崇



1. 自己紹介(グラフィックアーティスト・建築家)
  2. 建築家・デザイナーの責務・職能
  3. NASAロードマップにおける位置付け
  4. 地球建築と月建築に求められる性能の違い
5. ESAの3Dプリント月面居住施設(建設の流れと詳細)
  6. 課題点と今後の展望
    - ・ 6-1. 3Dプリント技術による外殻構造
    - ・ 6-2. 窓・生命の保護と視界の確保
    - ・ 6-3. 月面他地域への汎用性
    - ・ 6-4. 空間構成



”青の模様”

都営大江戸線 門前仲町駅グラフィックアート



”青の模様”

都営大江戸線 門前仲町駅グラフィックアート

The image shows a close-up of a blue wall with a grid of white circular patterns. The circles are arranged in a regular grid and are slightly blurred, creating a bokeh effect. The background is a solid blue color. The circles are arranged in a grid that is approximately 4 columns wide and 4 rows high, though some are partially cut off by the edges of the frame. The overall effect is a rhythmic, repetitive pattern of light and shadow.

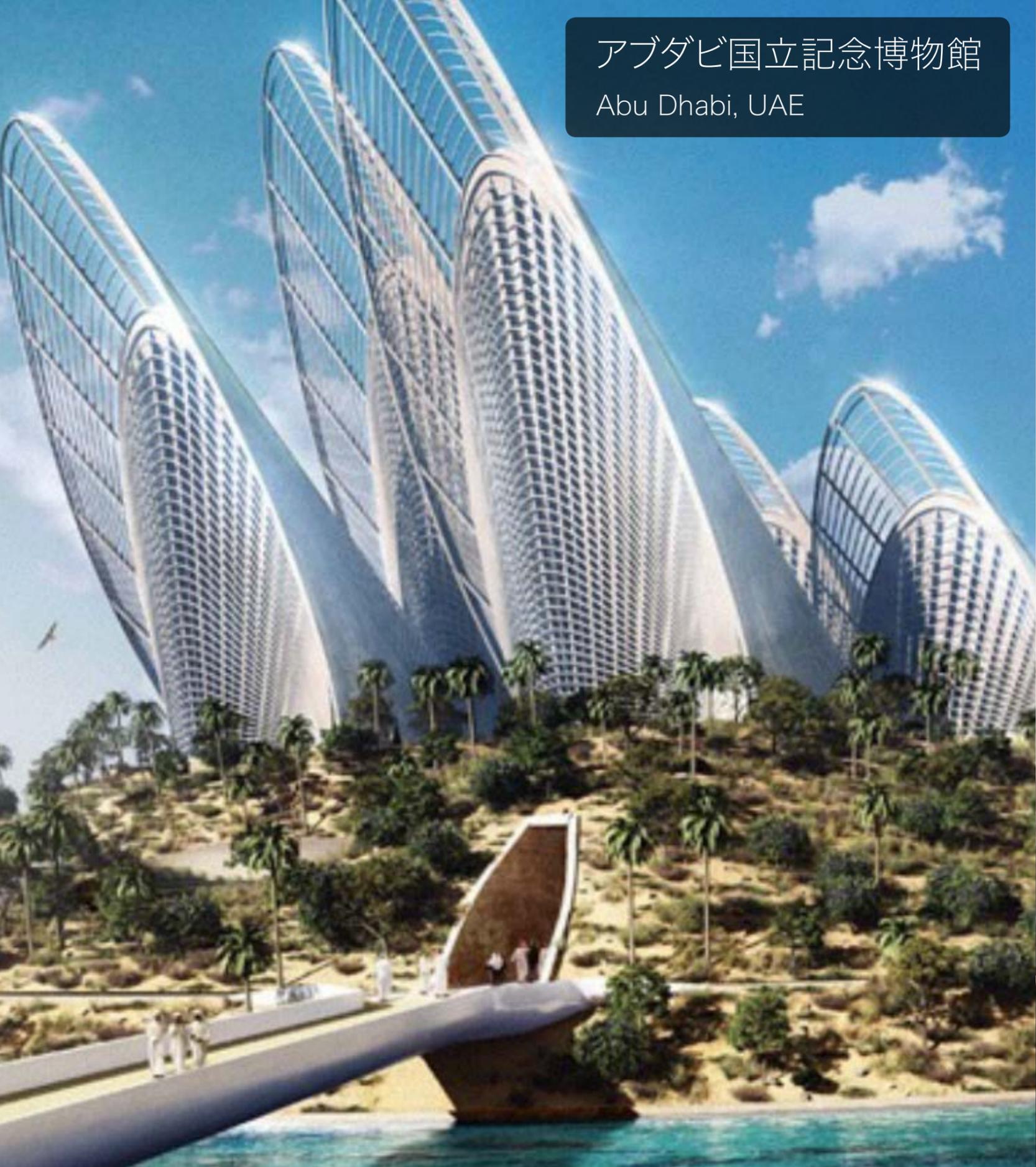
”青の模様”

都営大江戸線 門前仲町駅グラフィックアート



アップル新本社  
California, USA

アブダビ国立記念博物館  
Abu Dhabi, UAE



アブダビ・ワールド・トレードセンター  
Abu Dhabi, UAE



ハドソンヤード・ベッセル(垂直公園)

New York, USA

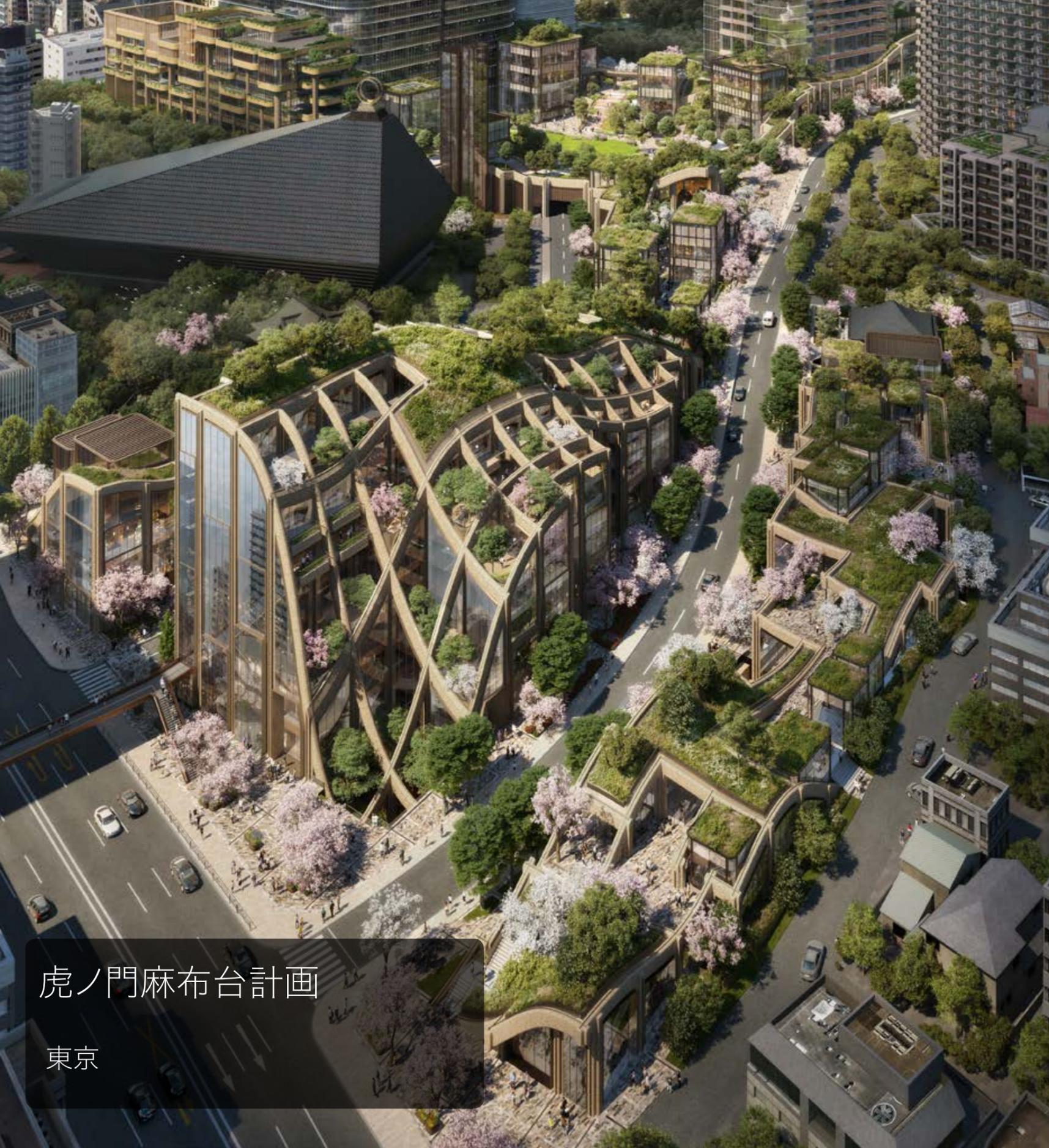


ガーデン・ブリッジ

London, UK



コール・ドロップス・ヤード  
London, UK



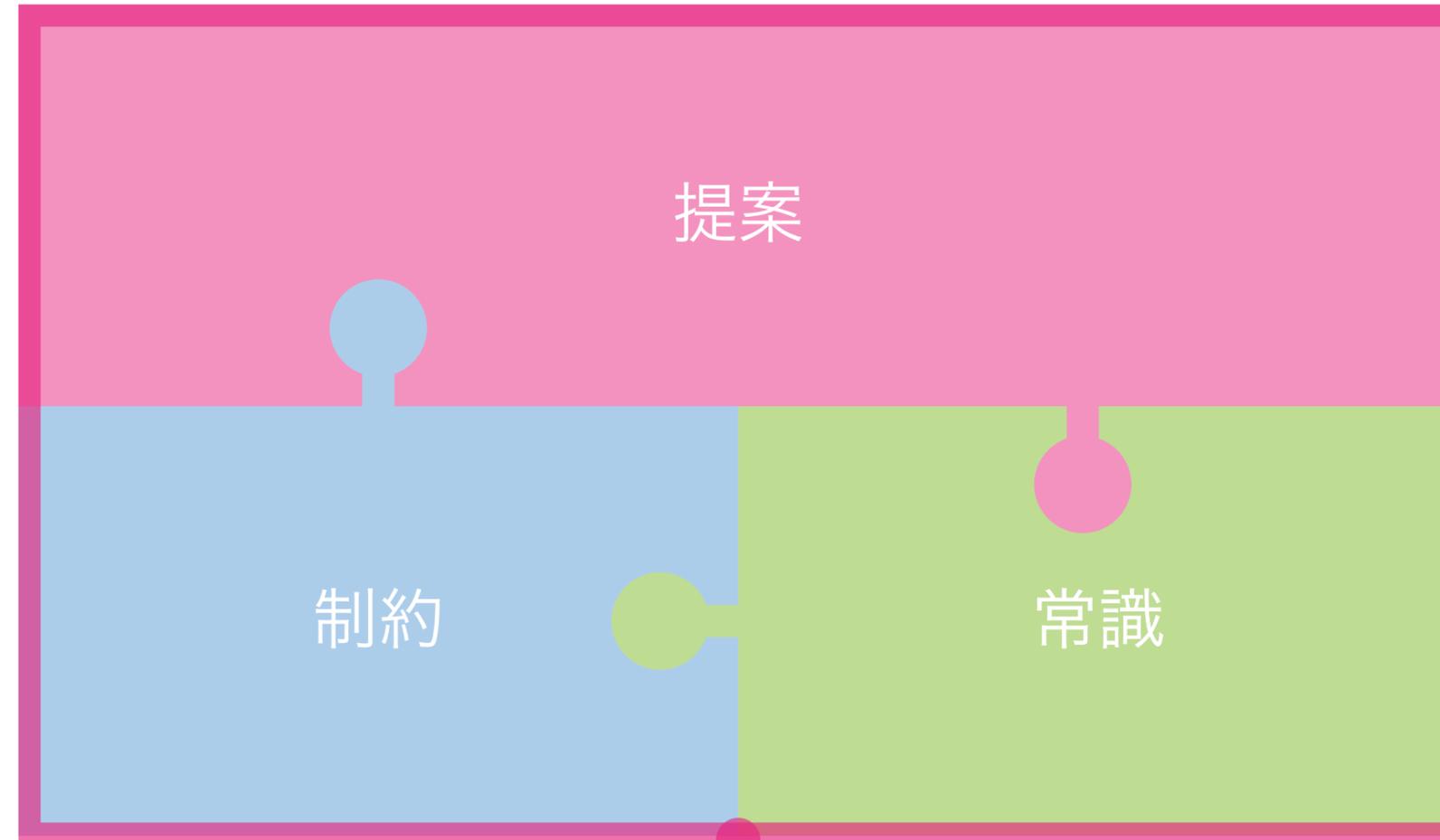
虎ノ門麻布台計画

東京



- ・ ストーリー性(コンセプト)
- ・ 印象的な空間構成や造形
- ・ 最新の工業技術、コンピューター技術
- ・ 稀有な材料の応用方法
- ・ すべての要素を調和の中に統合し、そこにムードを作る

- ・ 使用用途
- ・ 規模
- ・ 敷地
- ・ 法律による規制
- ・ 予算
- ・ 時間
- ・ 完成後の保全(メンテナンス)
- ・ その他クライアントによる具体的要望



- ・ 材料
- ・ 工法
- ・ 構造
- ・ 設備
- ・ 形状(箱型)
- ・ 流行、スタイル
- ・ デザイン史、建築史

統合された結果: デザイン

NASAが1997年にロードマップとして定義した宇宙空間の居住施設の分類



例: NASA Mars Design Reference Mission  
Mars Exploration Habitat

### Class I

- ・ 地球で生産したものをそのまま運搬する
- ・ 現地で即座に使用開始できる
- ・ 現地での組み立て等の手間や工程がない
- ・ 地球から打ち上げ可能な積載荷重による制約を受ける



例: NASA TransHab

### Class II

- ・ 地球で前もって生産する
- ・ コンパクト化したものを現地で展開する



例: ESA Lunar Habitation

### Class III

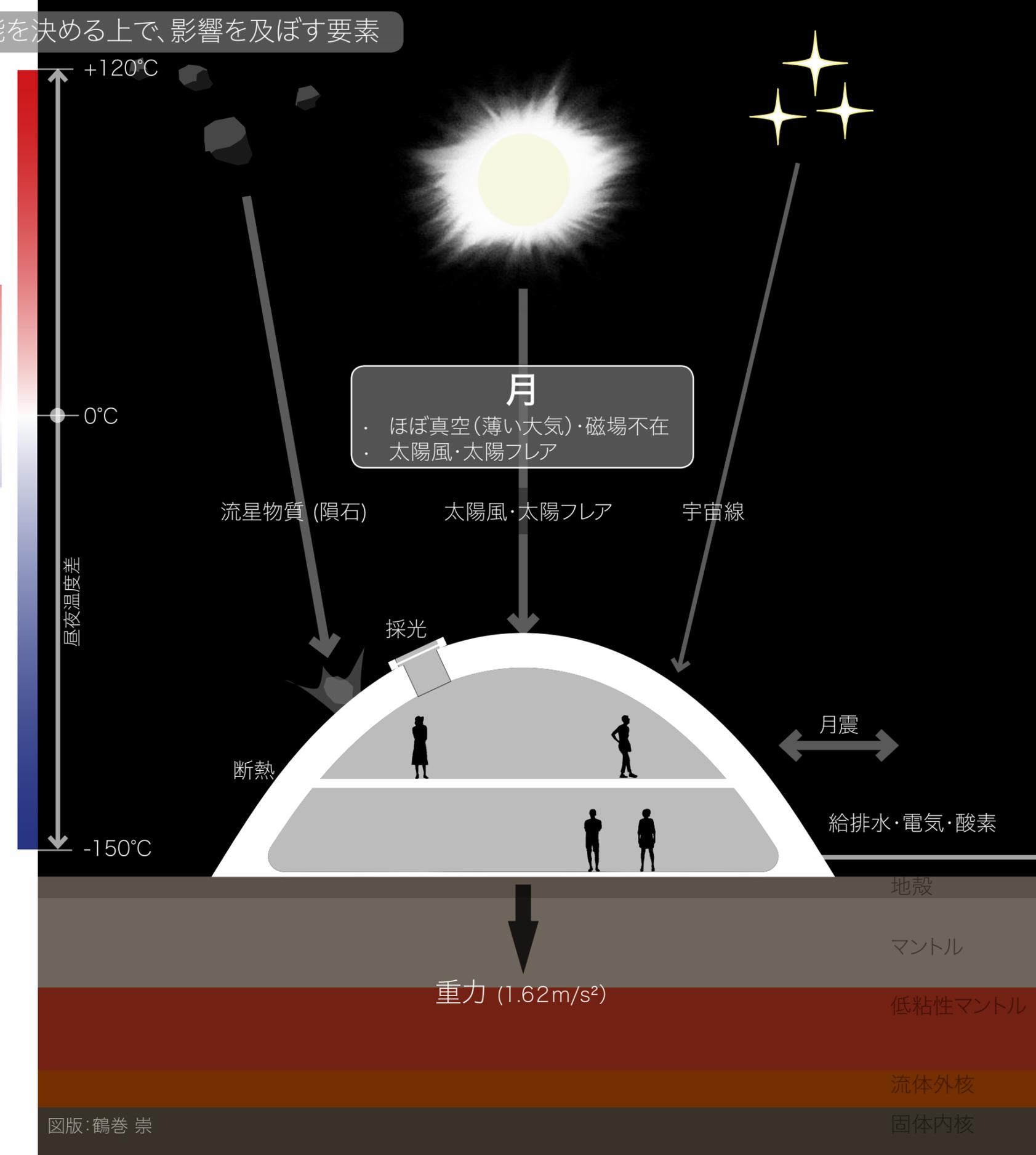
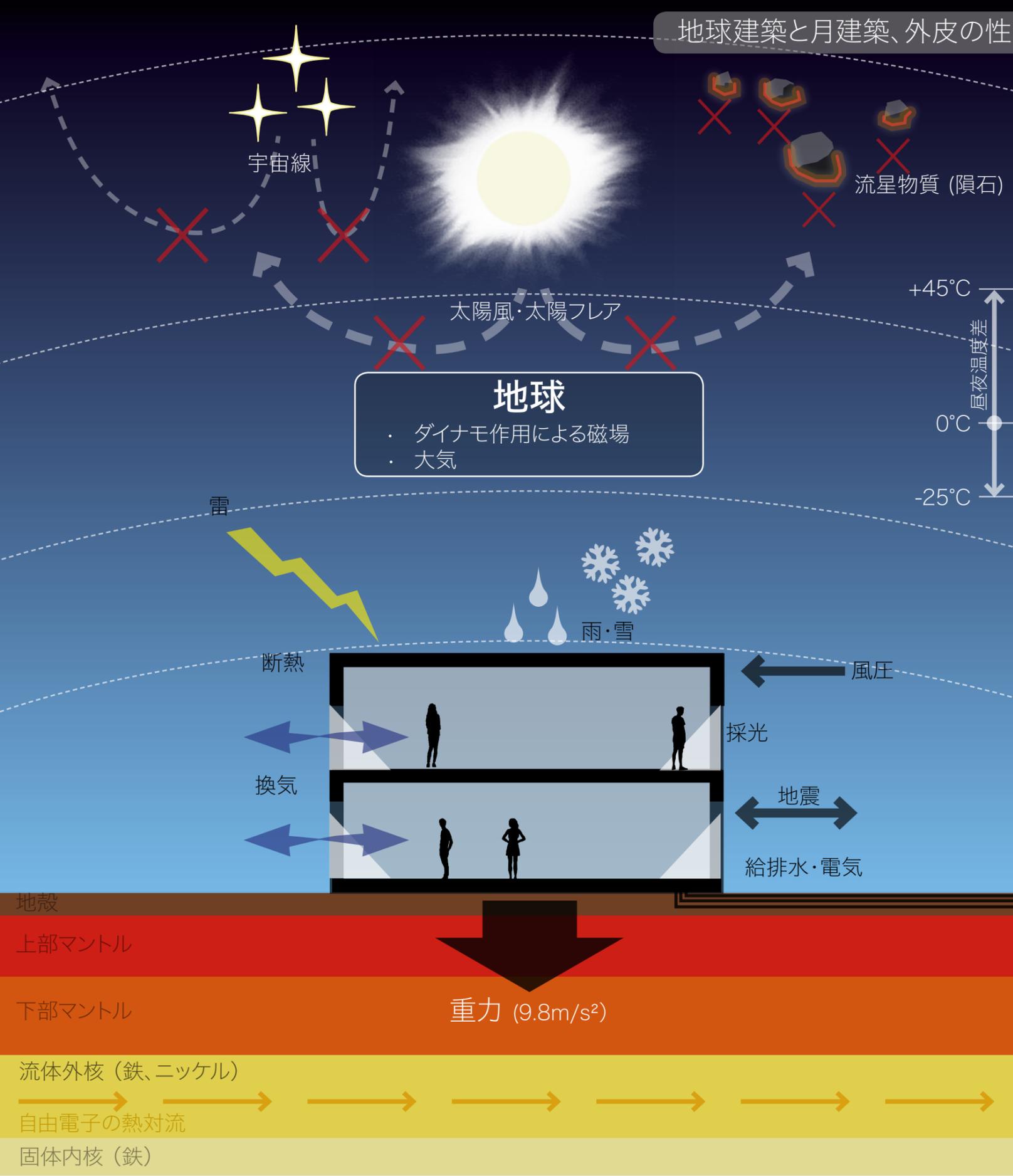
- ・ 現地での材料調達に大きく依存
- ・ 地球で製造されたコンポーネントを付加して施設が完成する



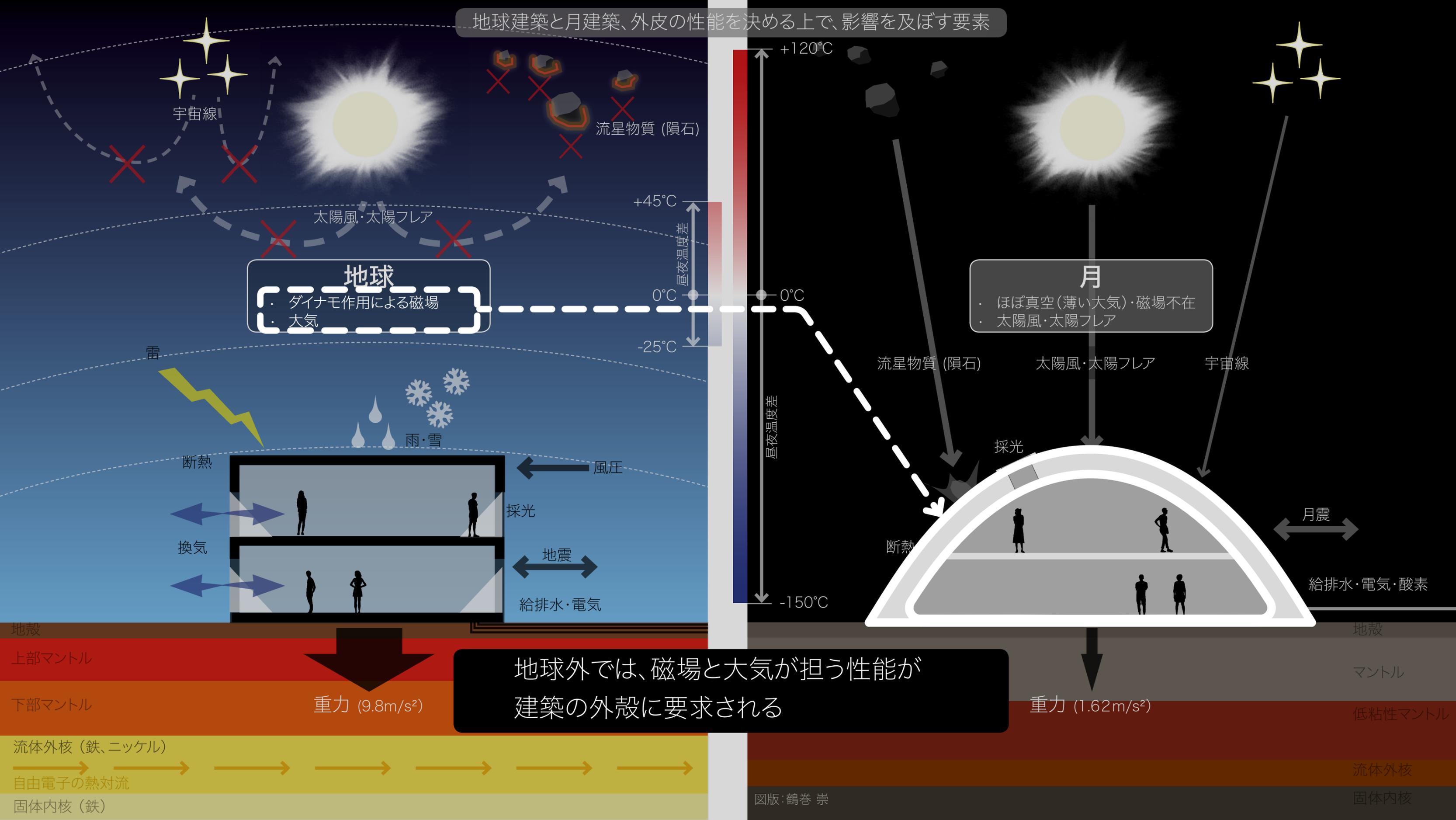
4

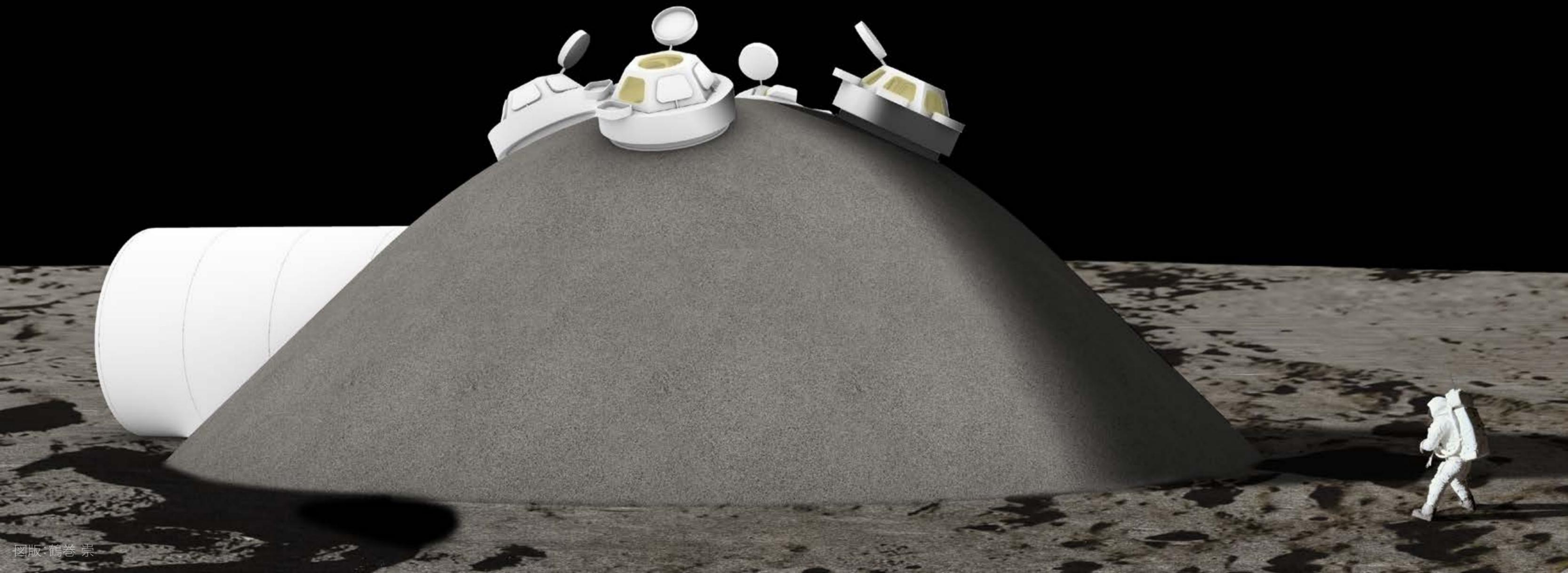
地球建築と月建築に求められる性能の違い

地球建築と月建築、外皮の性能を決める上で、影響を及ぼす要素



地球建築と月建築、外皮の性能を決める上で、影響を及ぼす要素

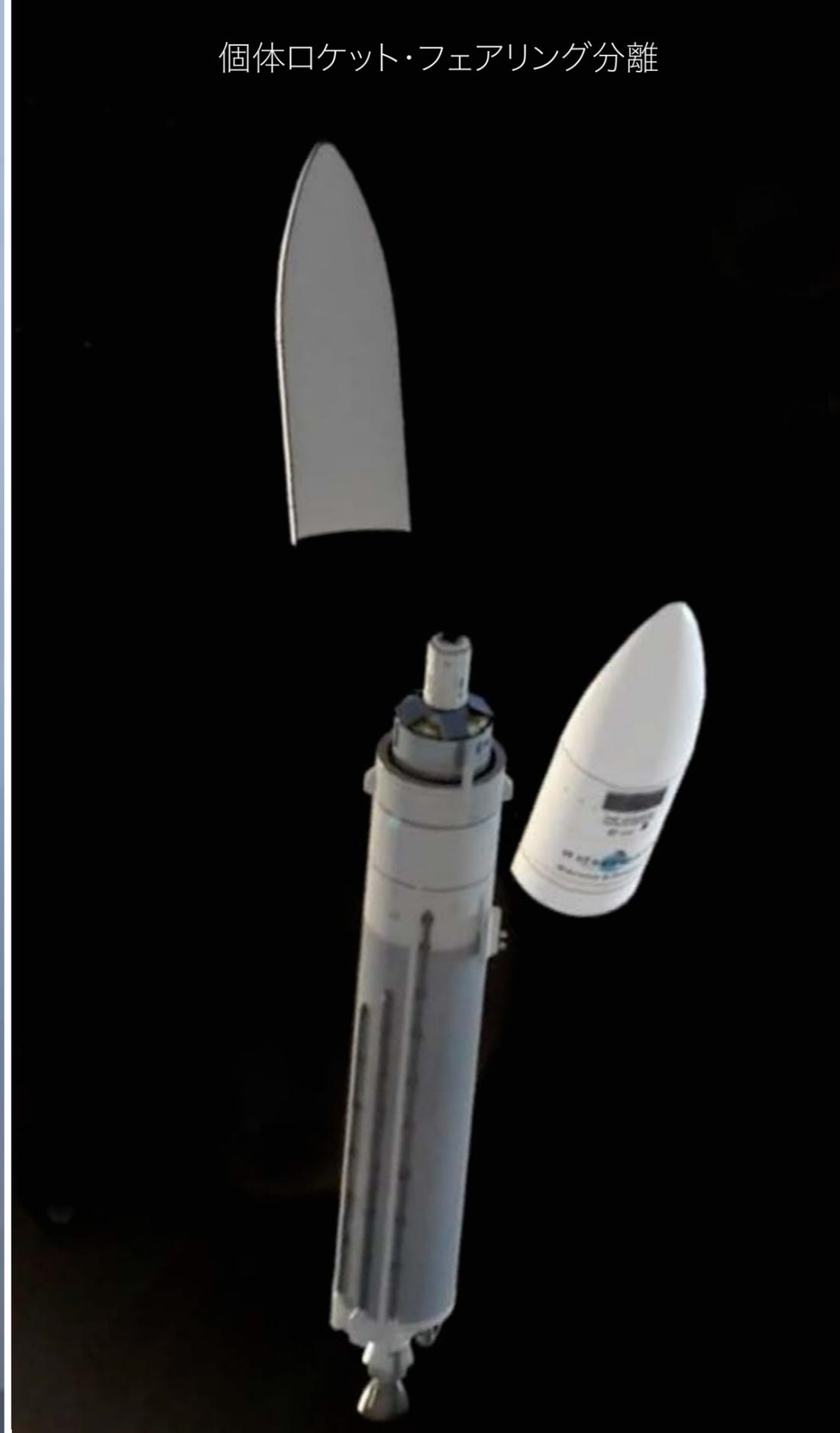




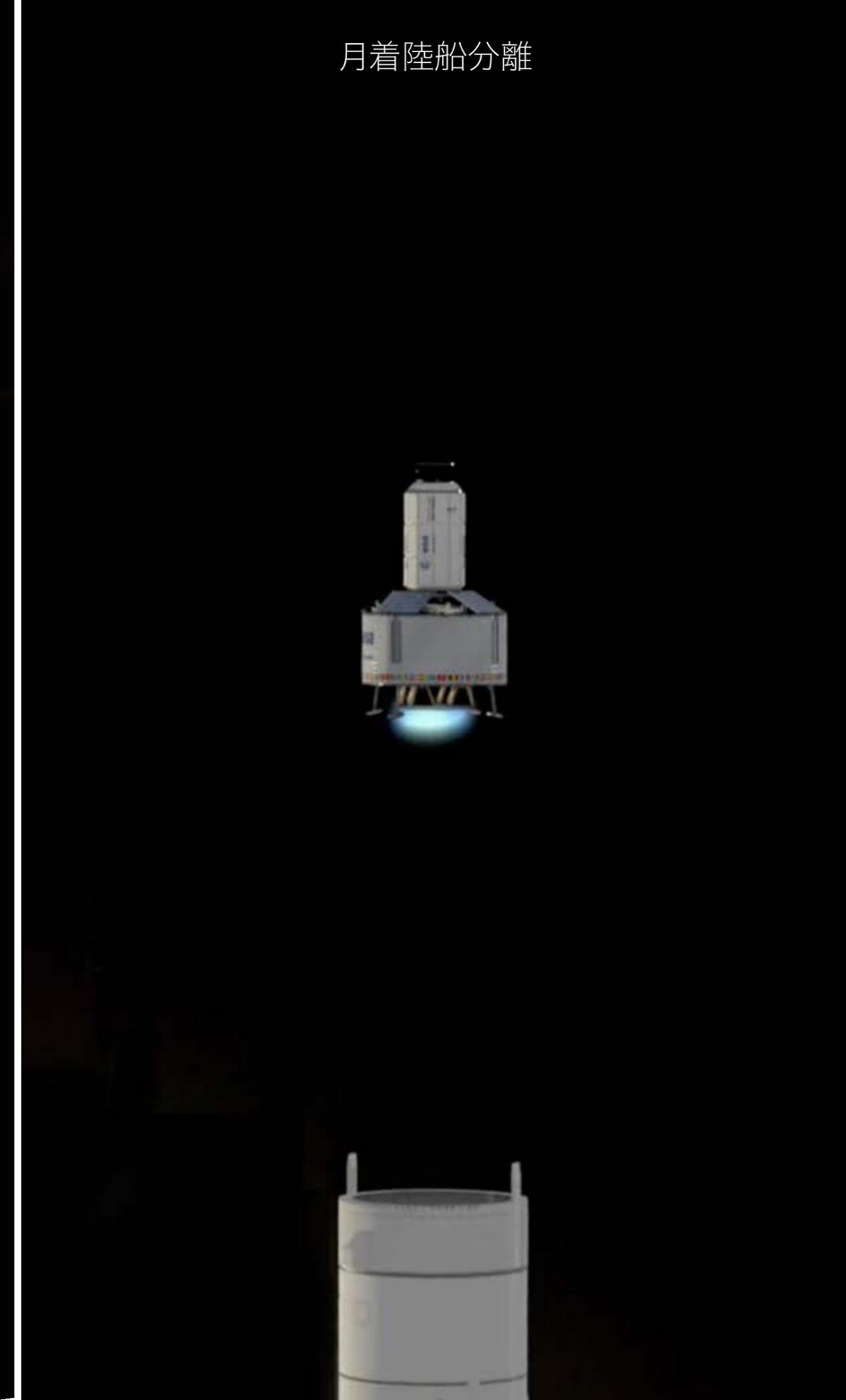
南アメリカ大陸フランス領ギアナより打ち上げ



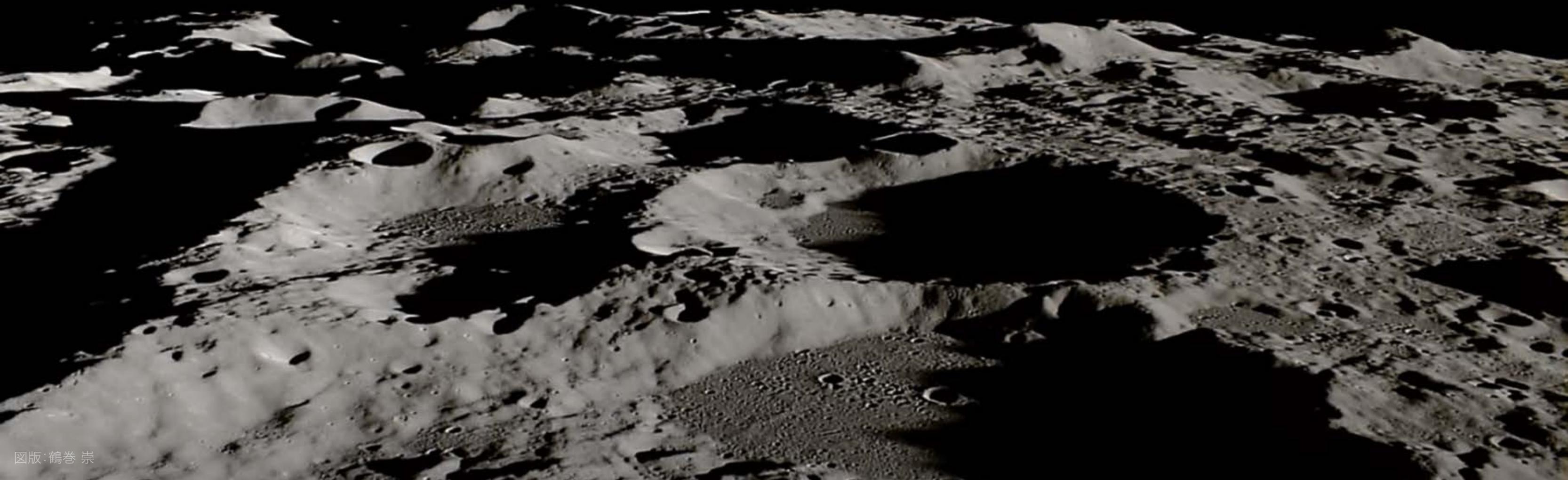
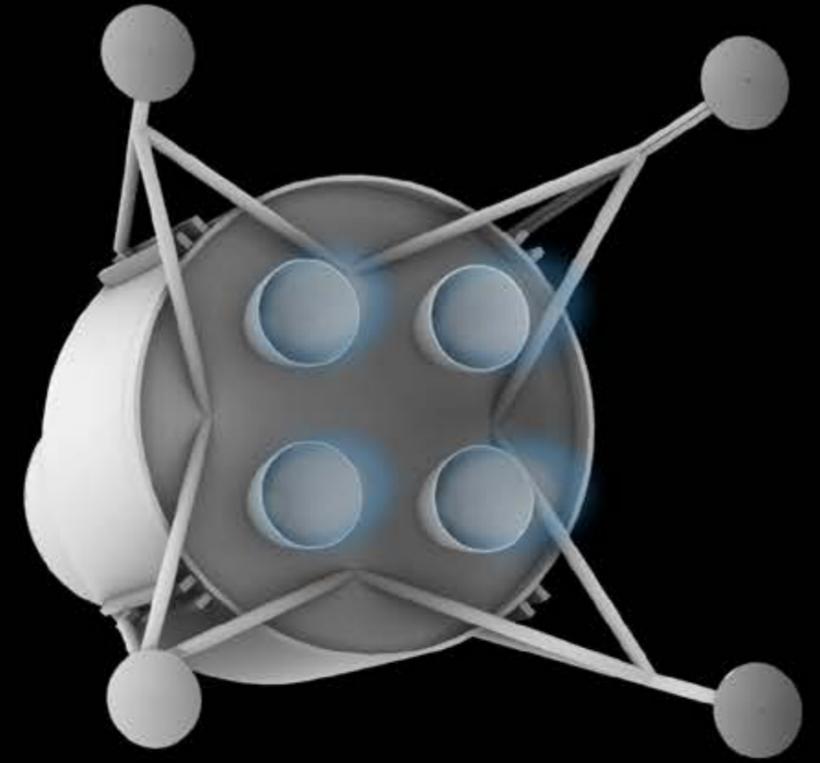
個体ロケット・フェアリング分離



月着陸船分離



# 建設候補地とその理由





3 地球を目視可能・通信の利便性(“表半球”)

1 永続的な太陽光(極地)

2 永久影のあるクレーター

太陽光発電施設

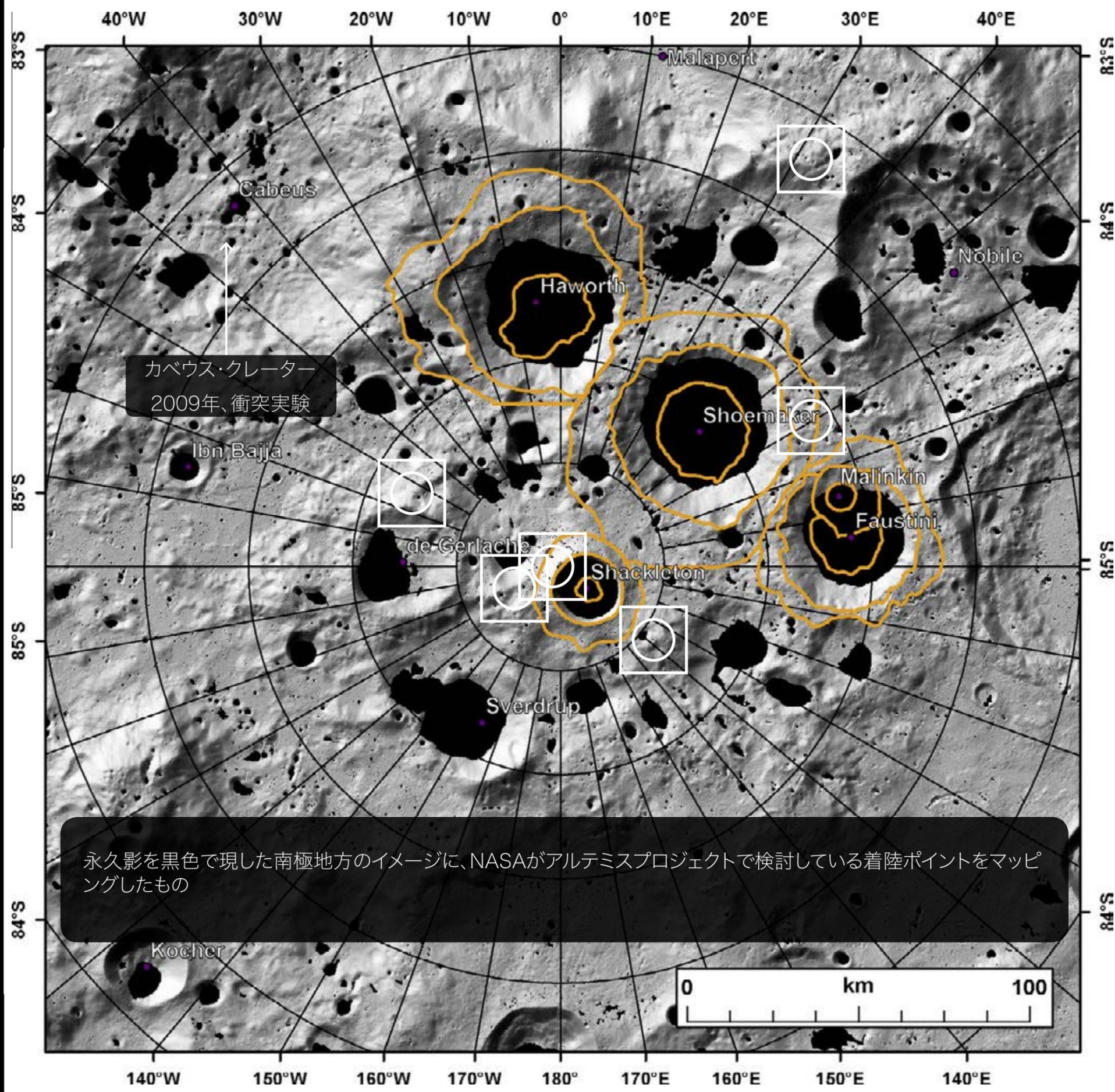
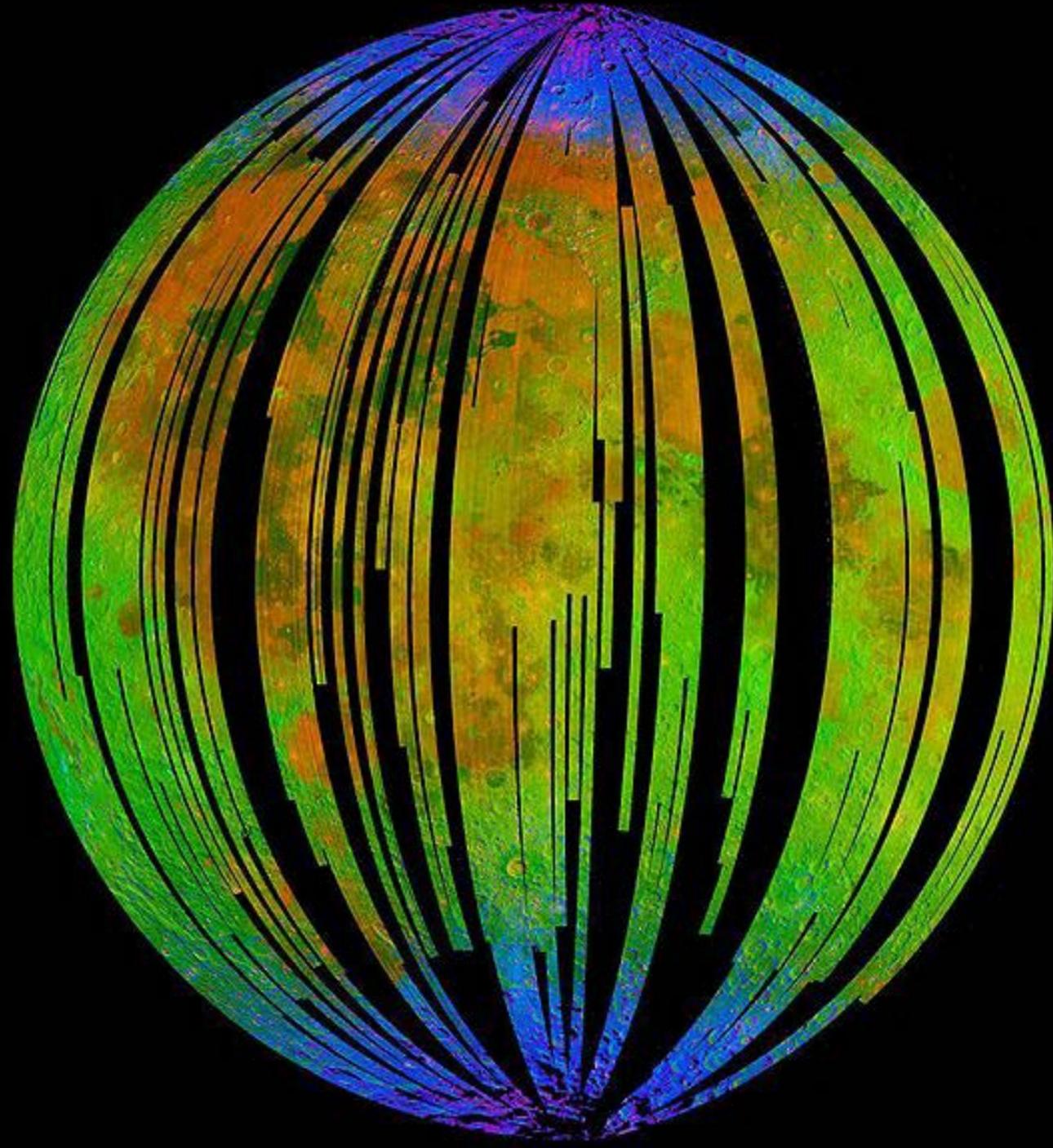
水源、他の資源(コールド・トラップ)

### 第一世代(入植用)月基地に適した敷地

- |  |                            |
|--|----------------------------|
| 1. 太陽光を安定的かつ永続的に受けられる—エネルギー供給・温度低下回避 ..... | 極地・高緯度地域(北極・南極)“永遠の陽射しの頂ぎ” |
| 2. 水源及び他の資源の可能性の高い場所—他の天体への拠点 .....        | 永久影のあるクレーターの近縁             |
| 3. 地球が目視可能—心理的観点・通信上の利便性 .....             | 表半球(地球から観測される側)            |

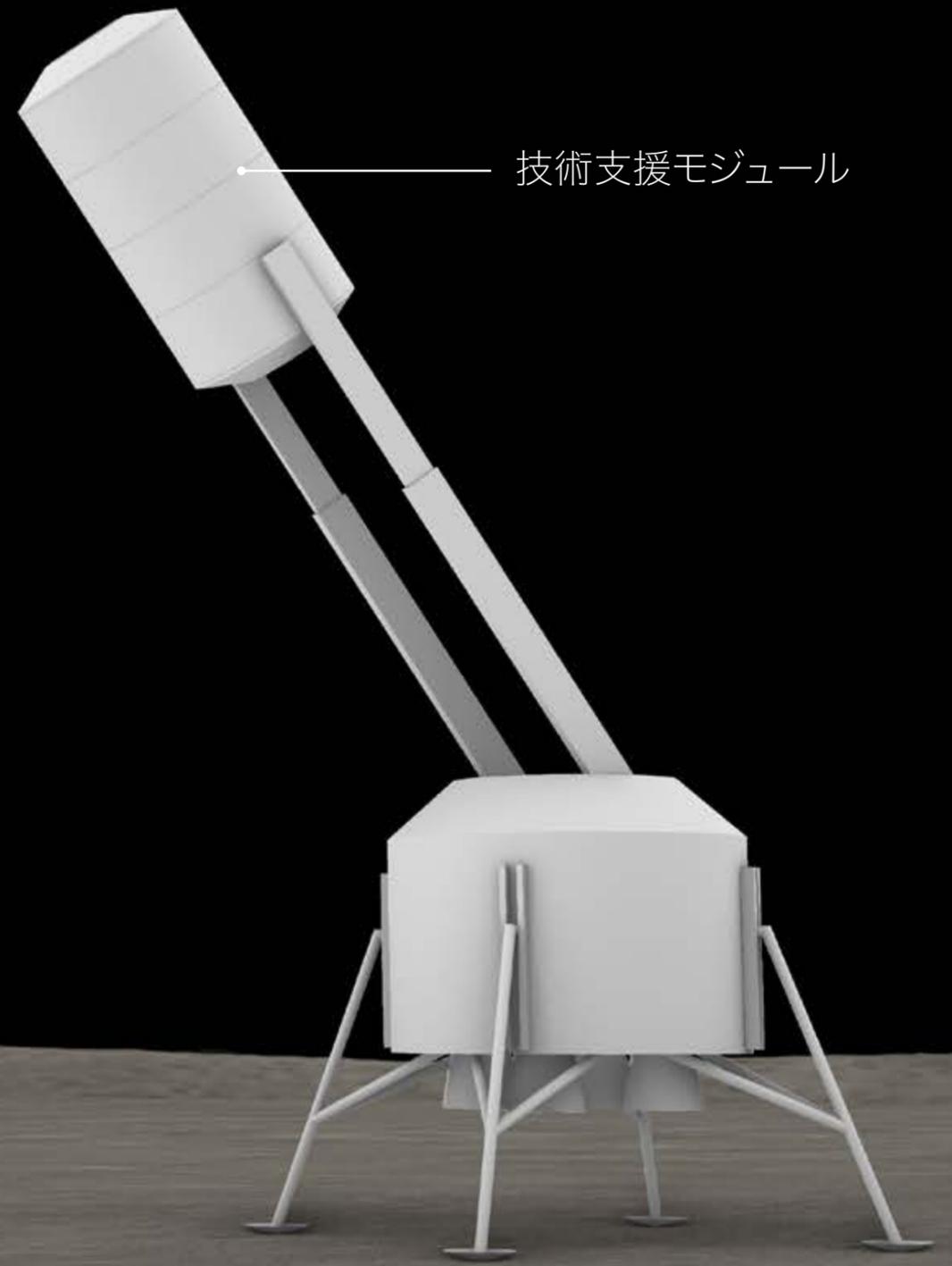


チャンドラヤーン1号に搭載されたNASAの月面鉱物マッピング装置(M3)によって撮影されたイメージ  
 青は水の特徴を示し、緑は太陽からの反射赤外線放射によって測定された表面の明るさを示し、赤は輝石と呼ばれる鉄含有鉱物を示します。

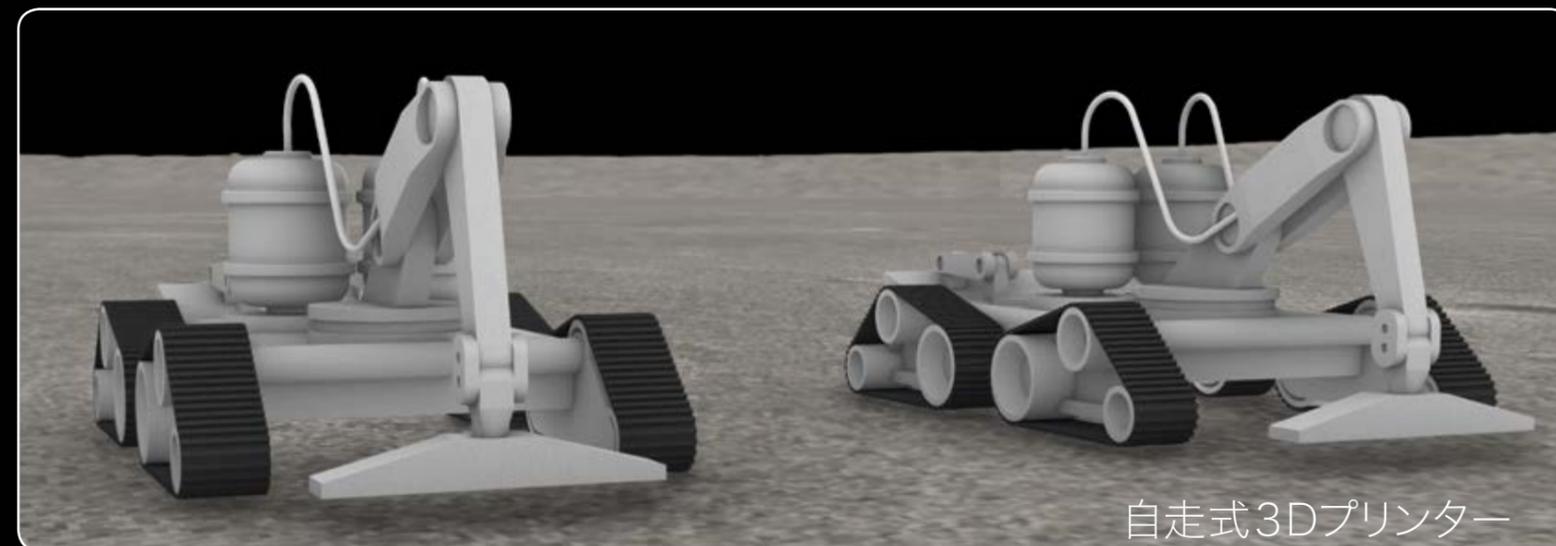


永久影を黒色で現した南極地方のイメージに、NASAがアルテミスプロジェクトで検討している着陸ポイントをマッピングしたもの

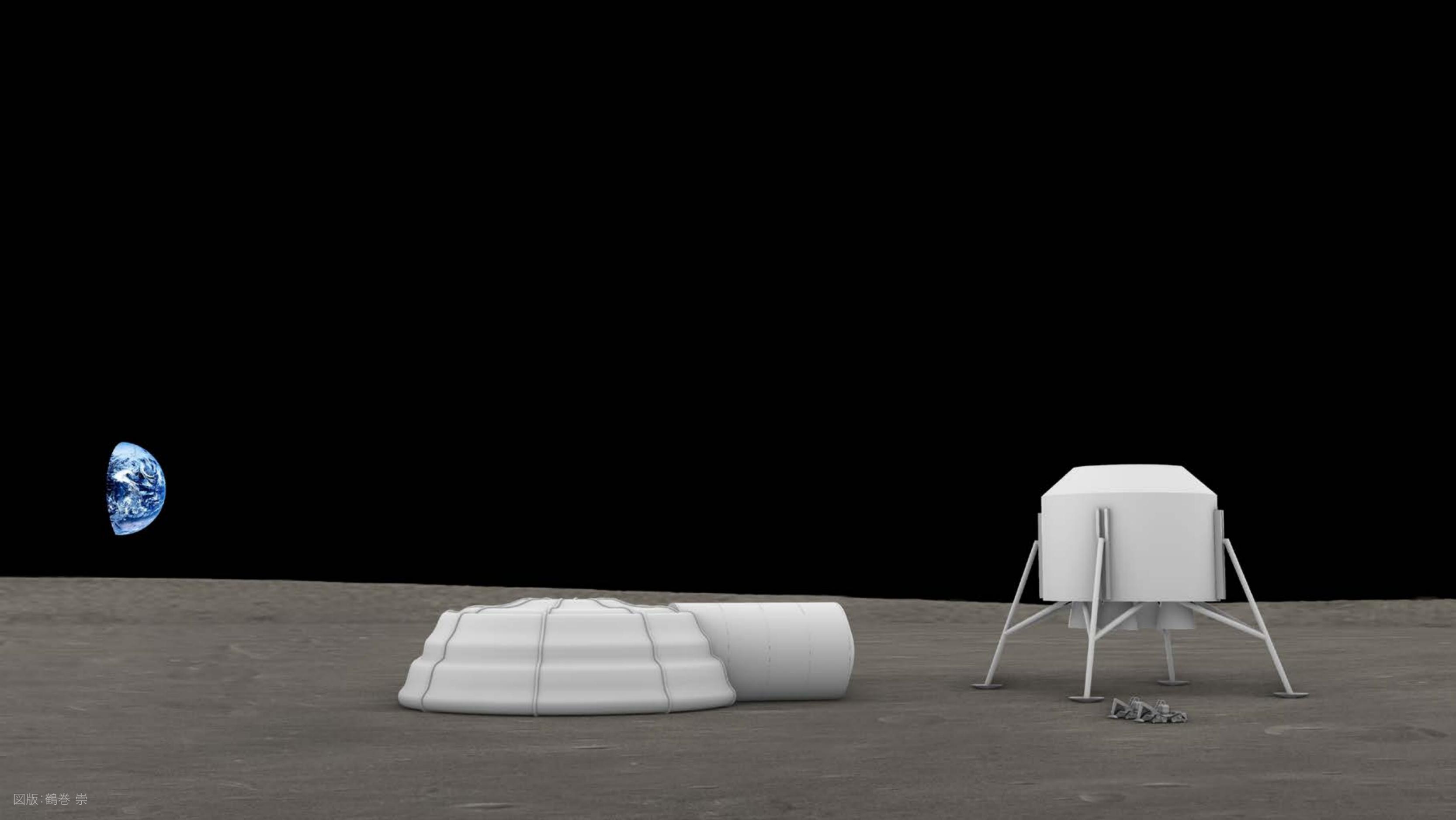


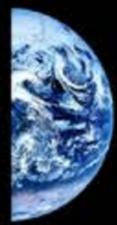
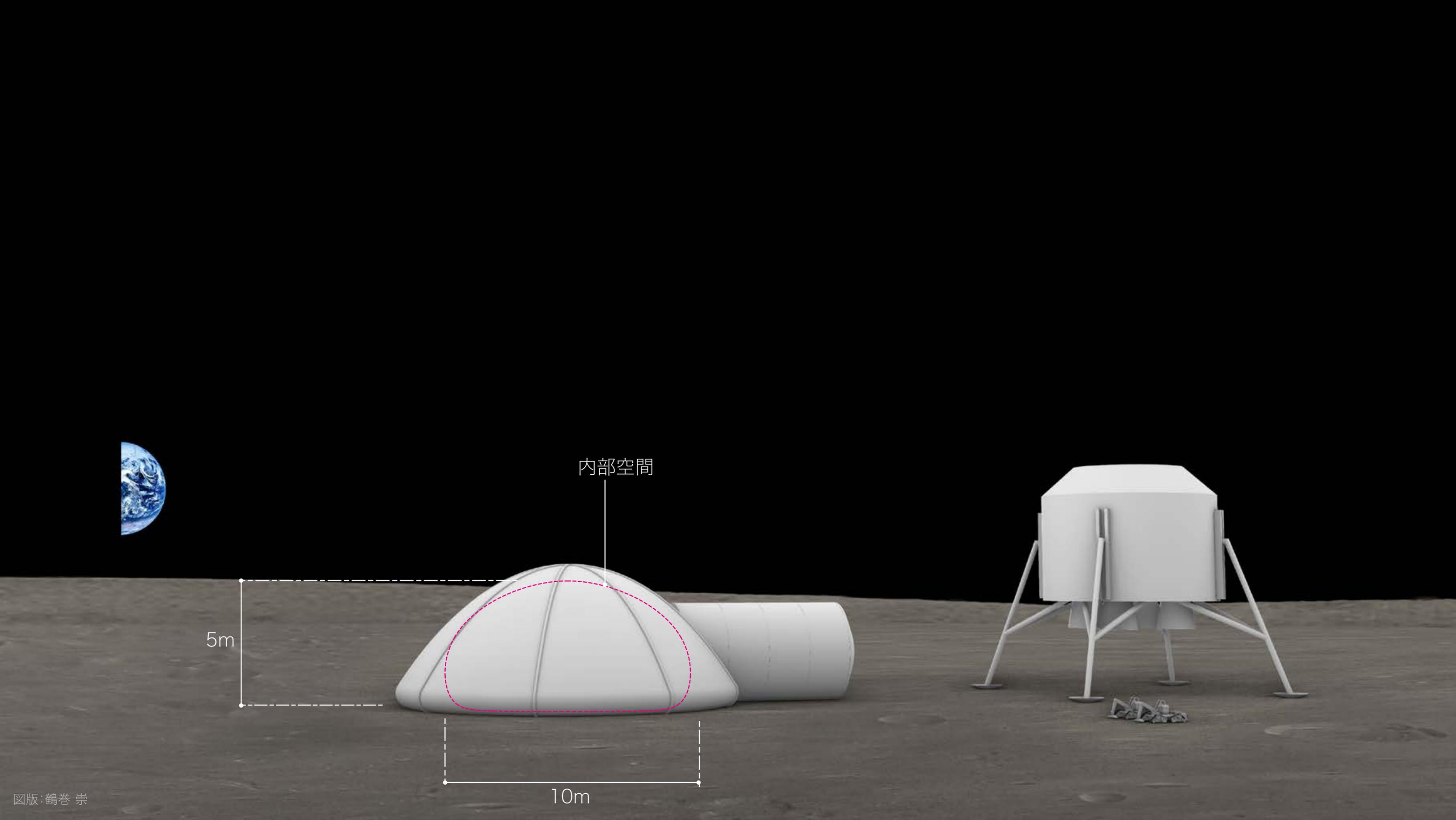


技術支援モジュール



自走式3Dプリンター

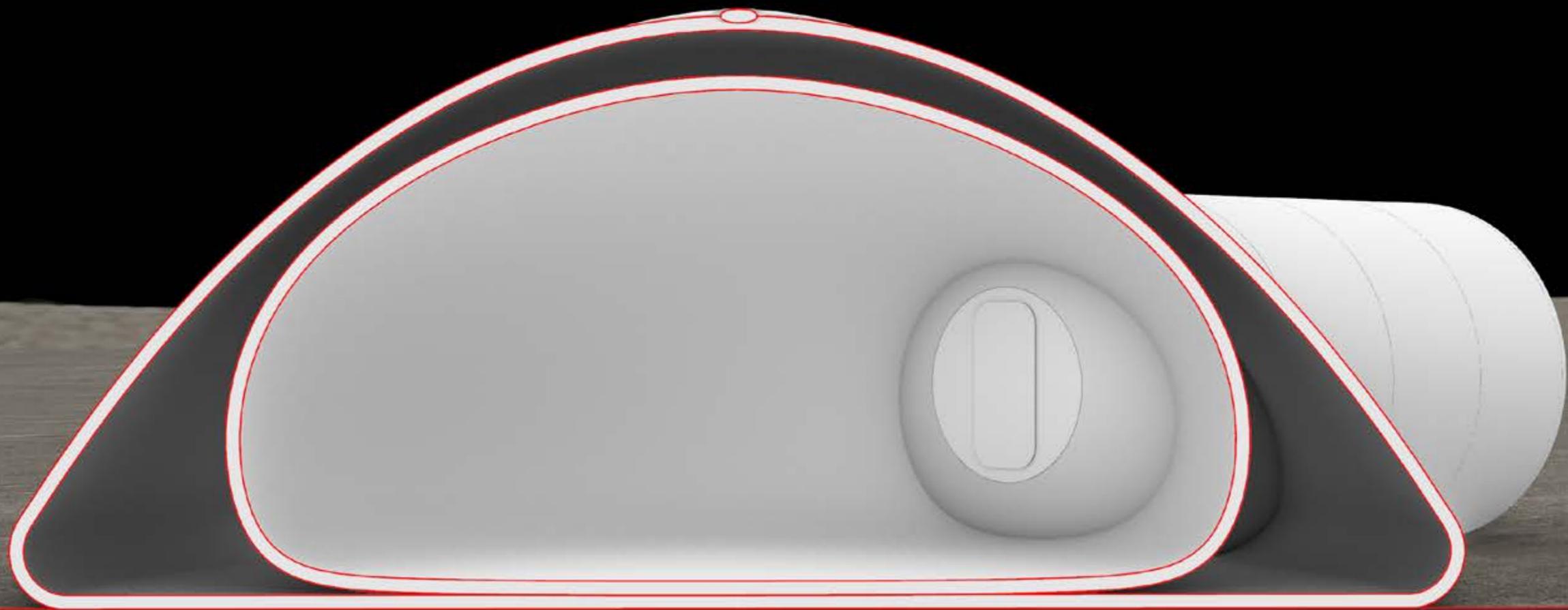


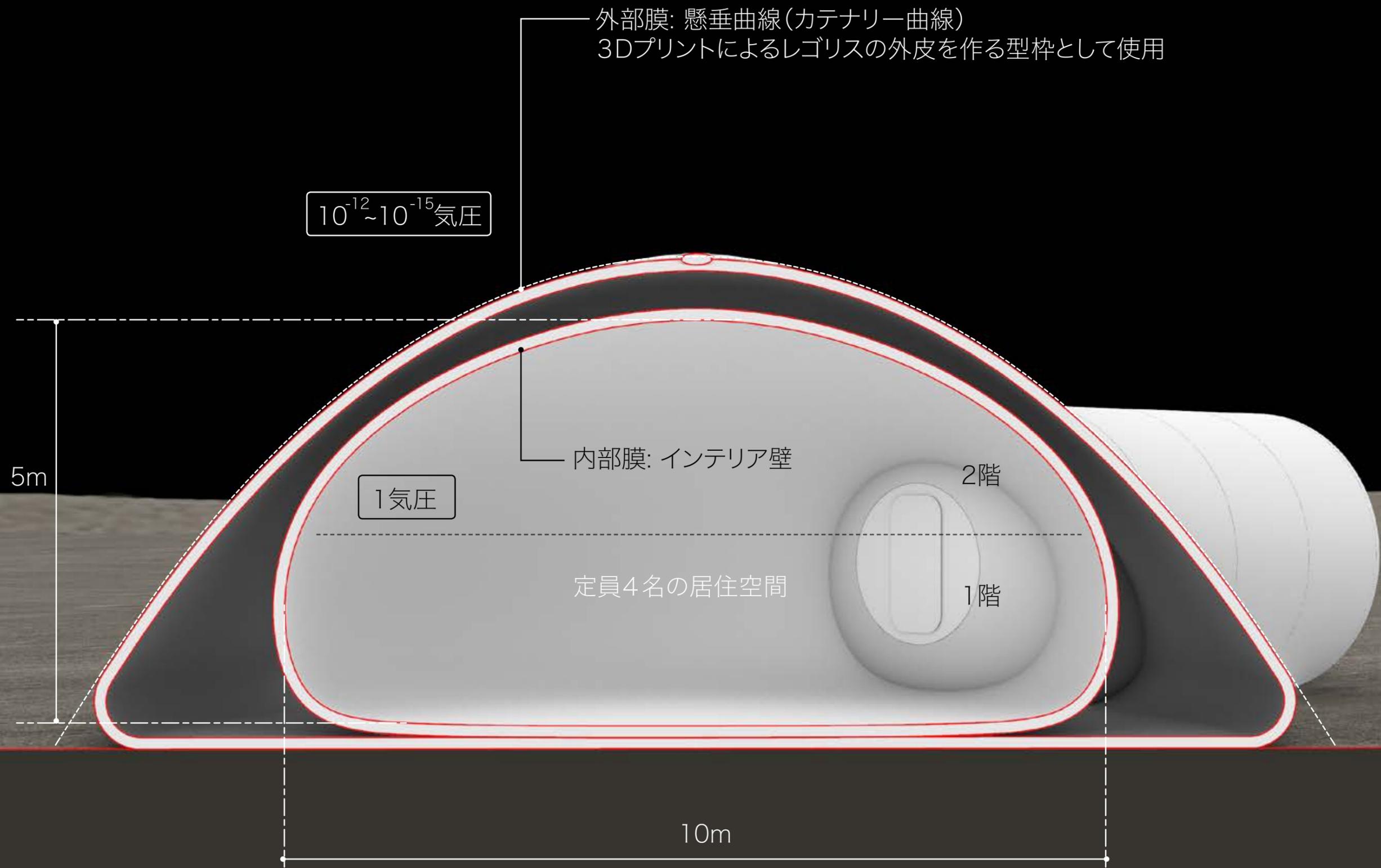


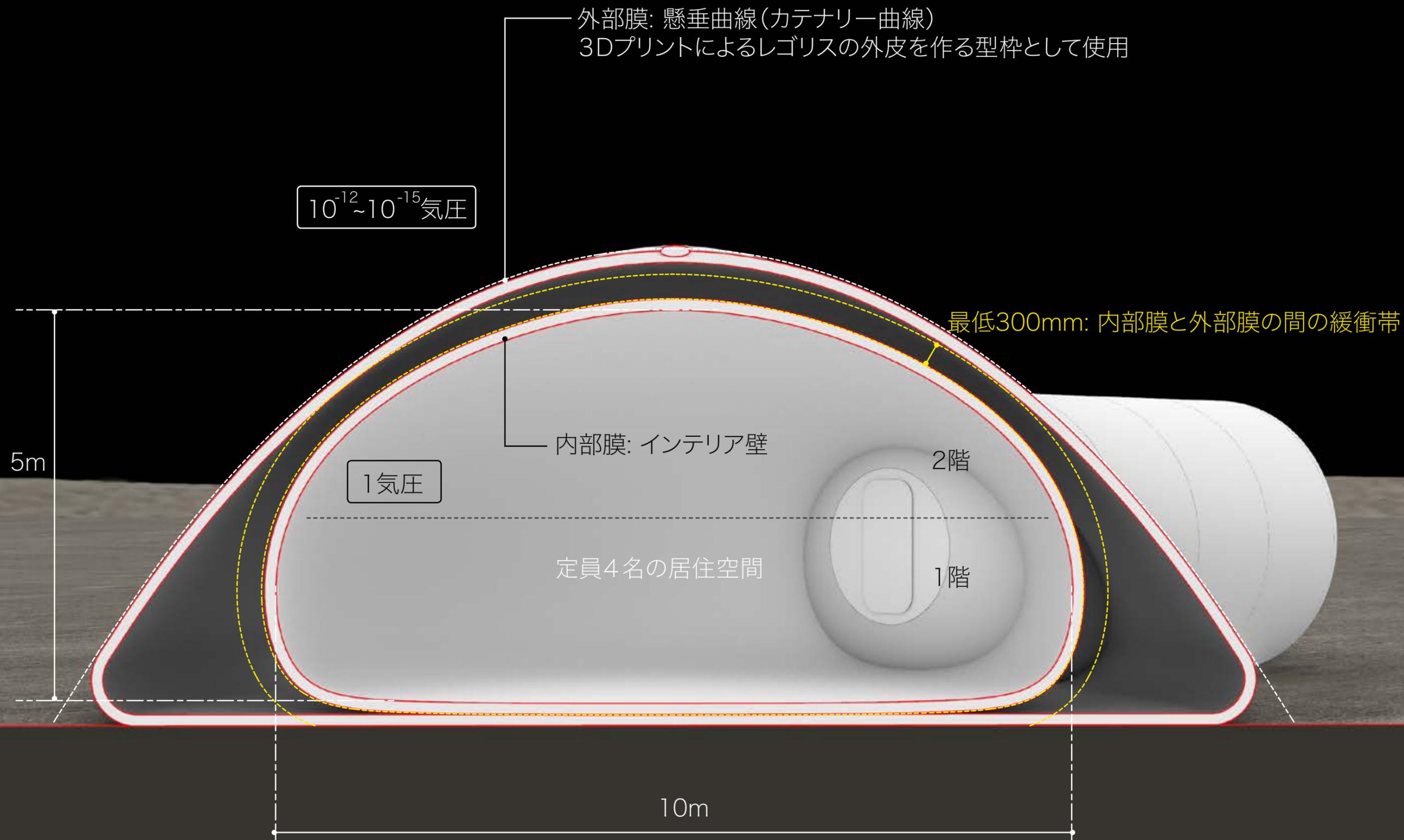
内部空間

5m

10m

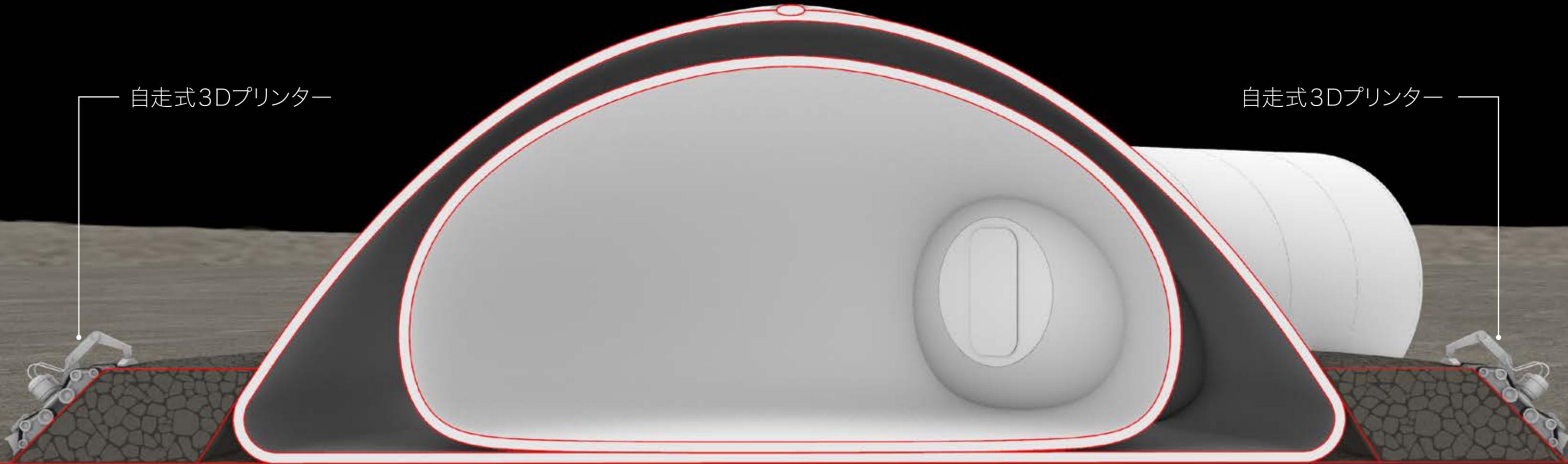






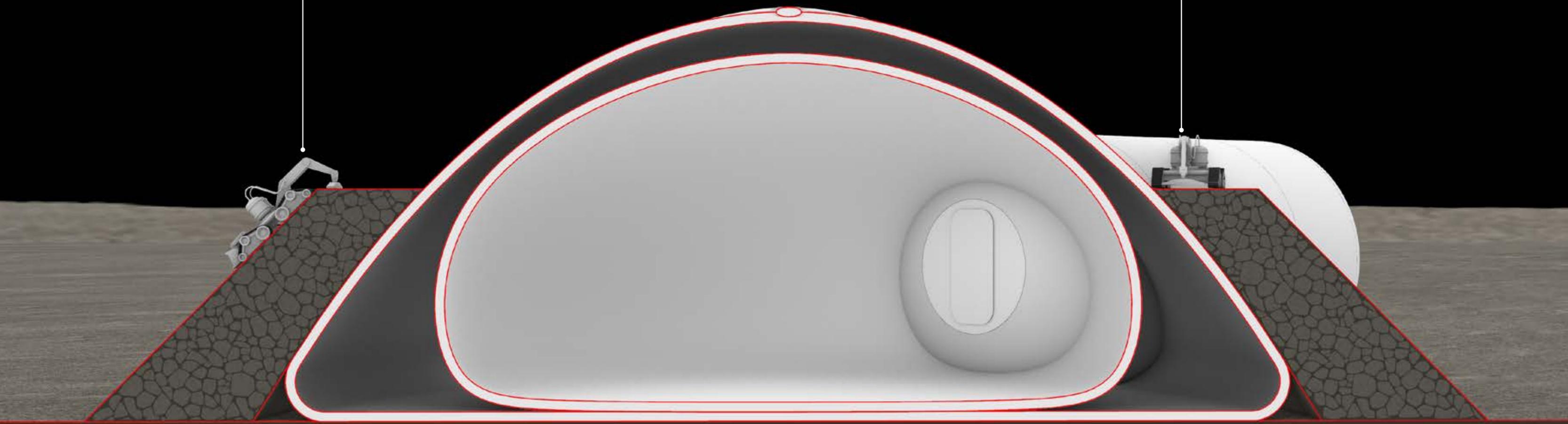
自走式3Dプリンター

自走式3Dプリンター

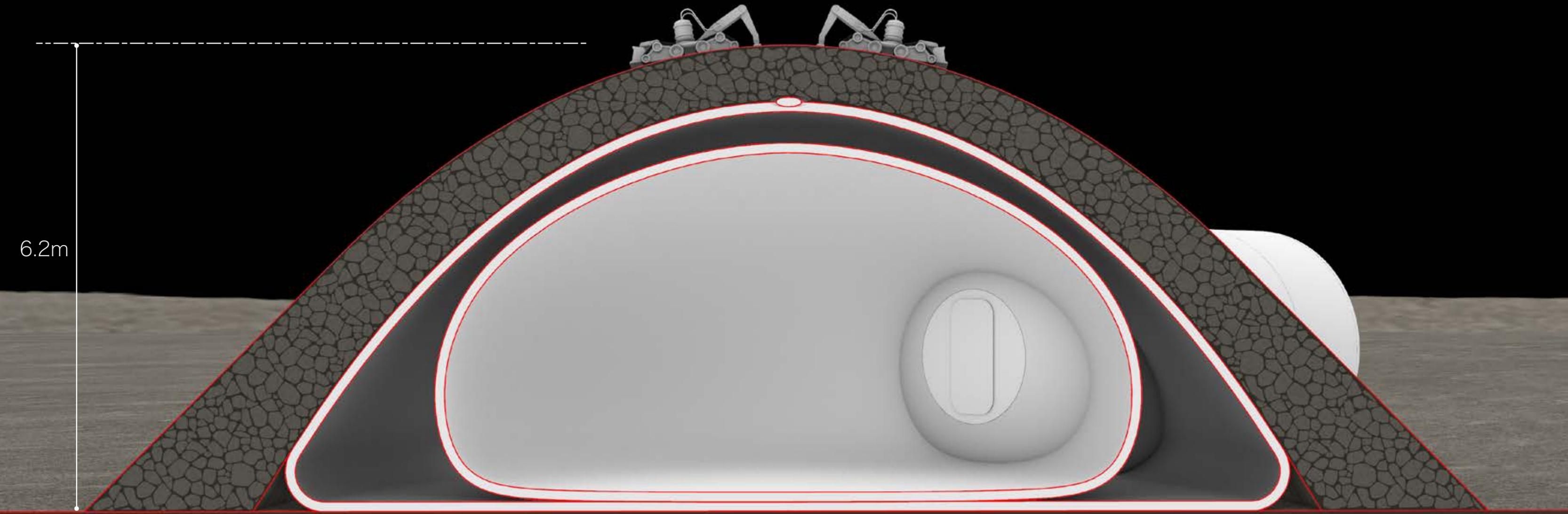


自走式3Dプリンター

自走式3Dプリンター



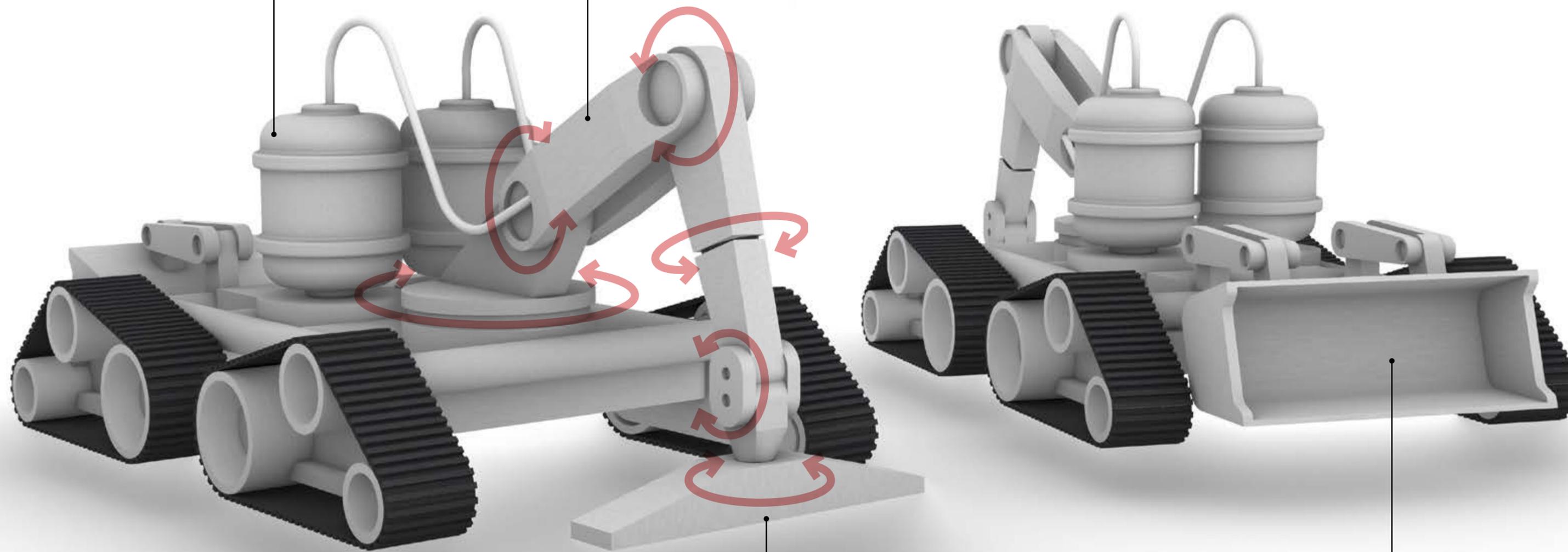
3ヶ月後



6.2m

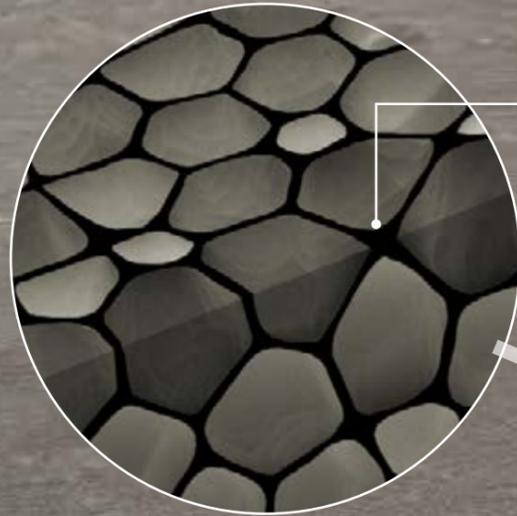
凝固剤供給タンク

6軸ロボットアーム



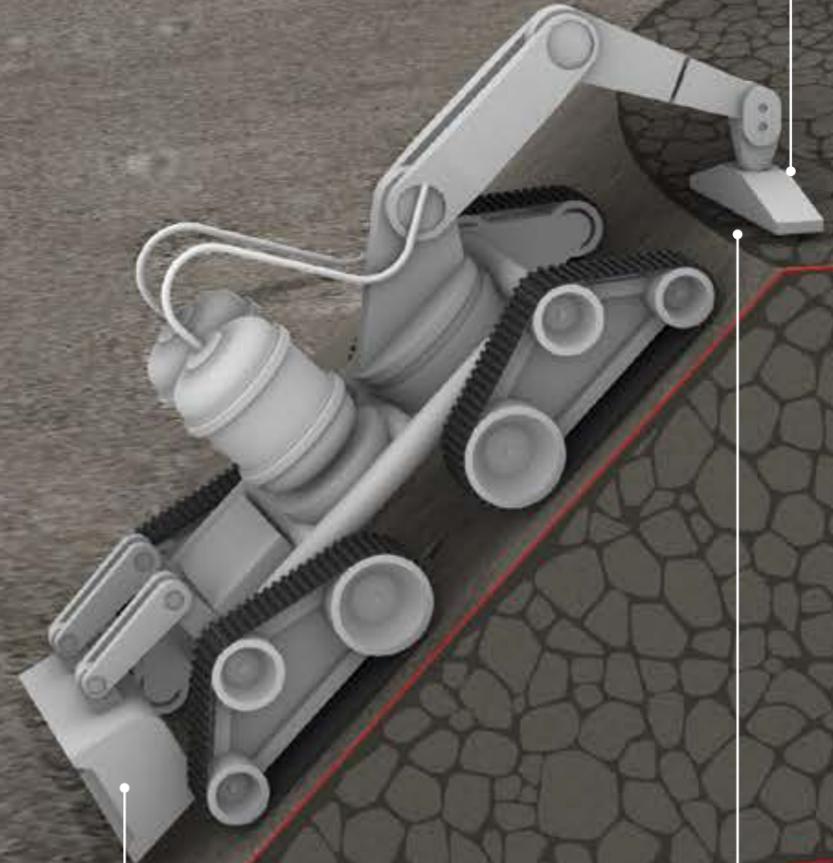
3Dプリントヘッド

レゴリス収集・敷均しショベル



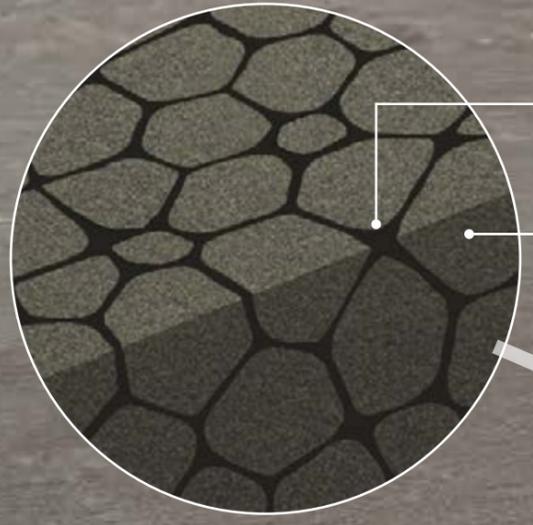
凝固剤により多孔質構造を形成するレゴリスの部分

毛細管現象を使い凝固剤を  
染み込ませるプリンターヘッド  
(凝固剤の蒸発を防ぐ)



レゴリス収集・敷均しショベル

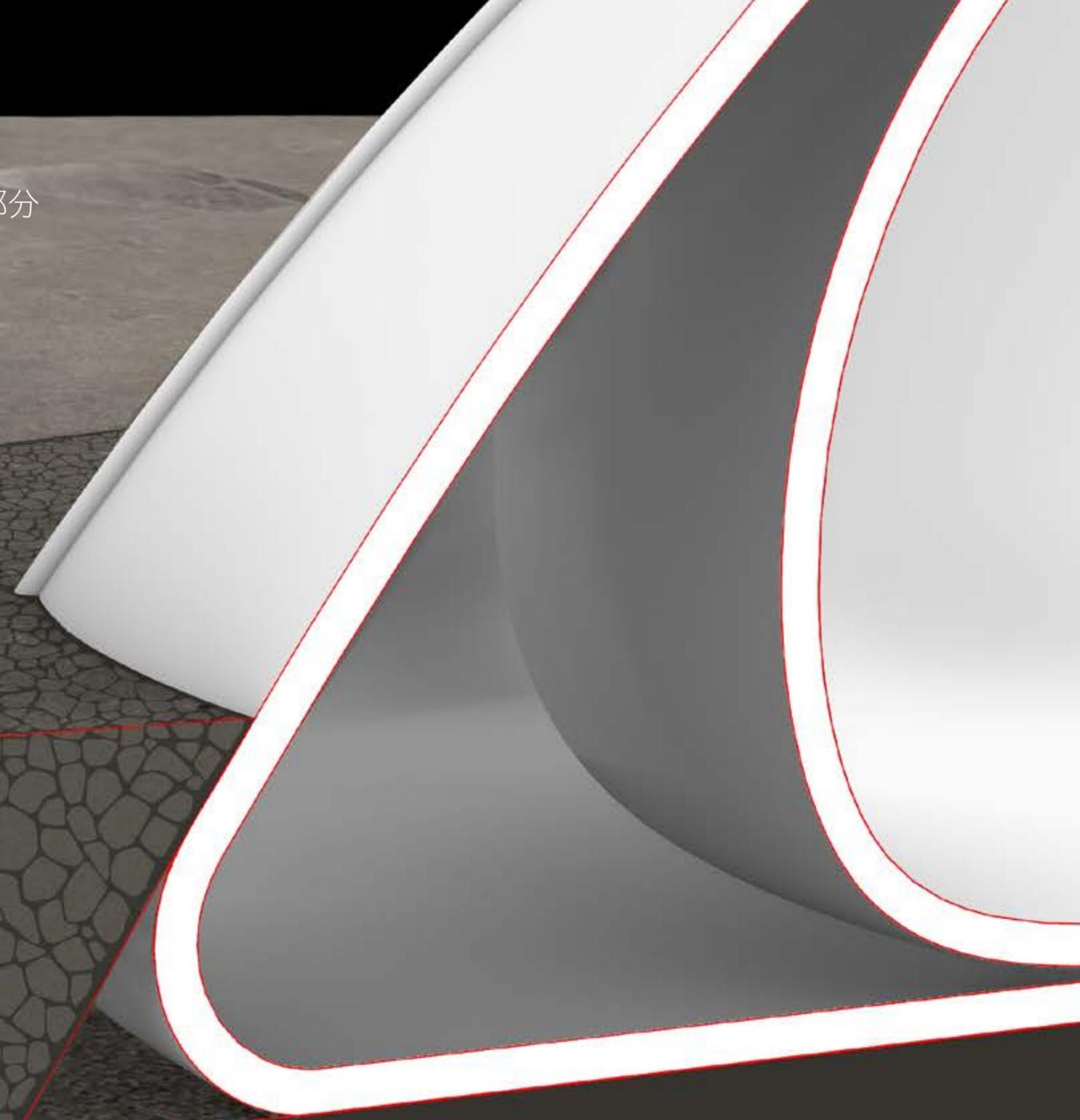
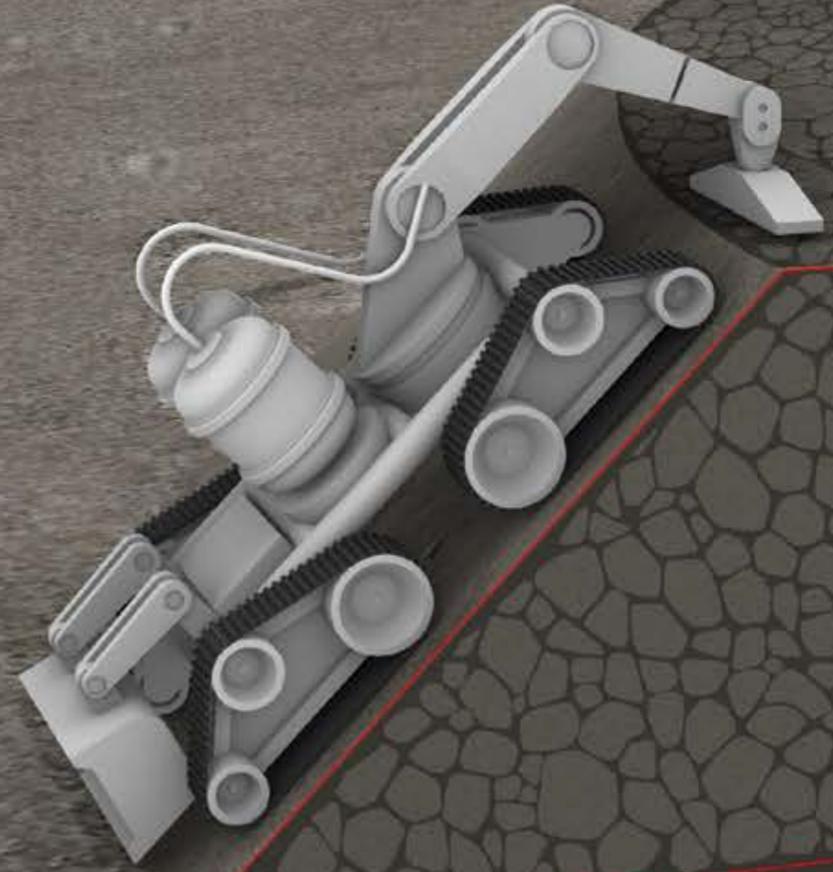
すでに固められたレゴリスの上にショベルで  
新たに敷き均されたレゴリスのレイヤ(5mm厚)



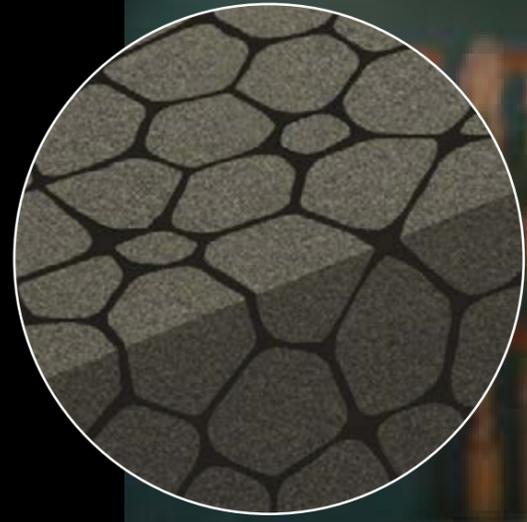
凝固剤により多孔質構造を形成するレゴリスの部分

凝固していないサラサラのレゴリス

(凝固していないサラサラのレゴリスは凝固材で固められた多孔質構造の中に残り放射線を遮断するのに必要な量の一部としてカウントされる)



多孔質構造 …………… メテオロイドの衝撃を分散する効果+局所的損壊がドーム全体の崩壊となることを防ぐ



1.5トンの試験体  
イタリア中部の火山から取れる玄武岩(成分は月のレゴリスに99.8%合致)を使用



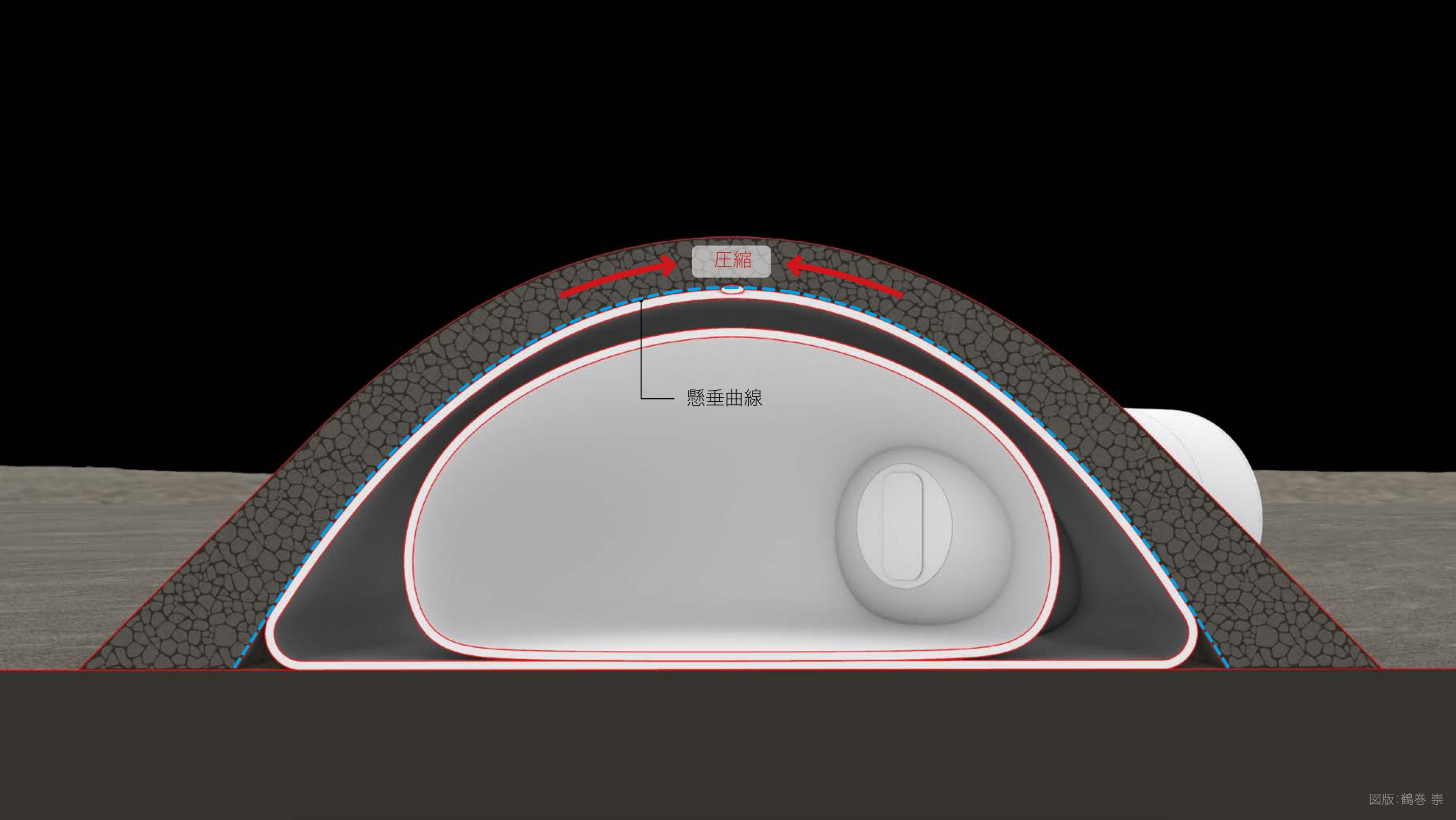
アントニオ・ガウディ設計  
カサ・ミラ(バルセロナ、スペイン)  
屋根裏部屋に見る懸垂曲線のアーチ

懸垂曲線を上下逆さにしてアーチにすると部材には圧縮力のみが働き、全体が安定する。  
凝固剤で固められたレゴリスの構造特性に適合する。



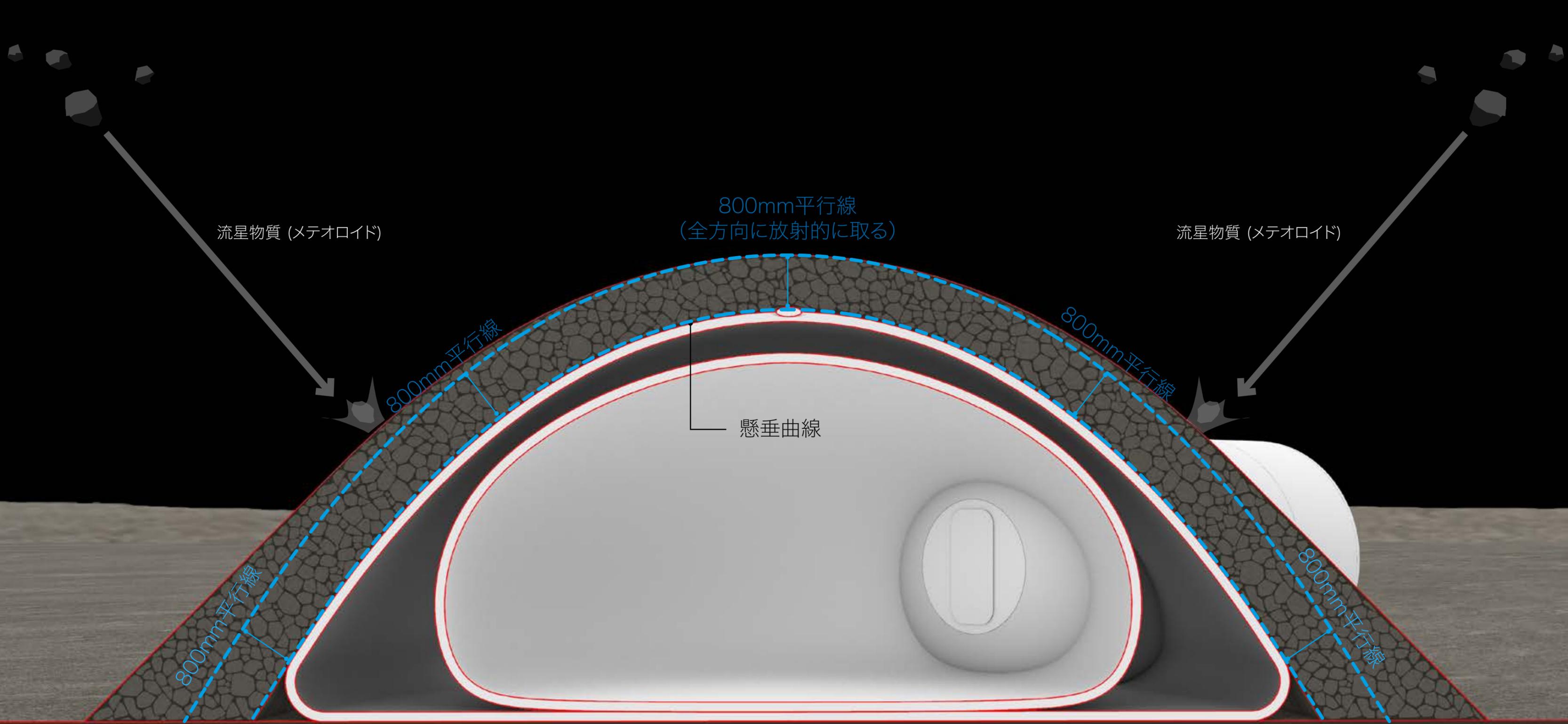
カサ・ミラに展示されている懸垂曲線のモデル

2つの固定点から垂れ下がるロープや鎖が重力によって作る曲線: 懸垂曲線(カテナリー曲線)の部材には引張力だけが働く。



圧縮

懸垂曲線



流星物質 (メテオロイド)

800mm平行線  
(全方向に放射的に取る)

流星物質 (メテオロイド)

800mm平行線

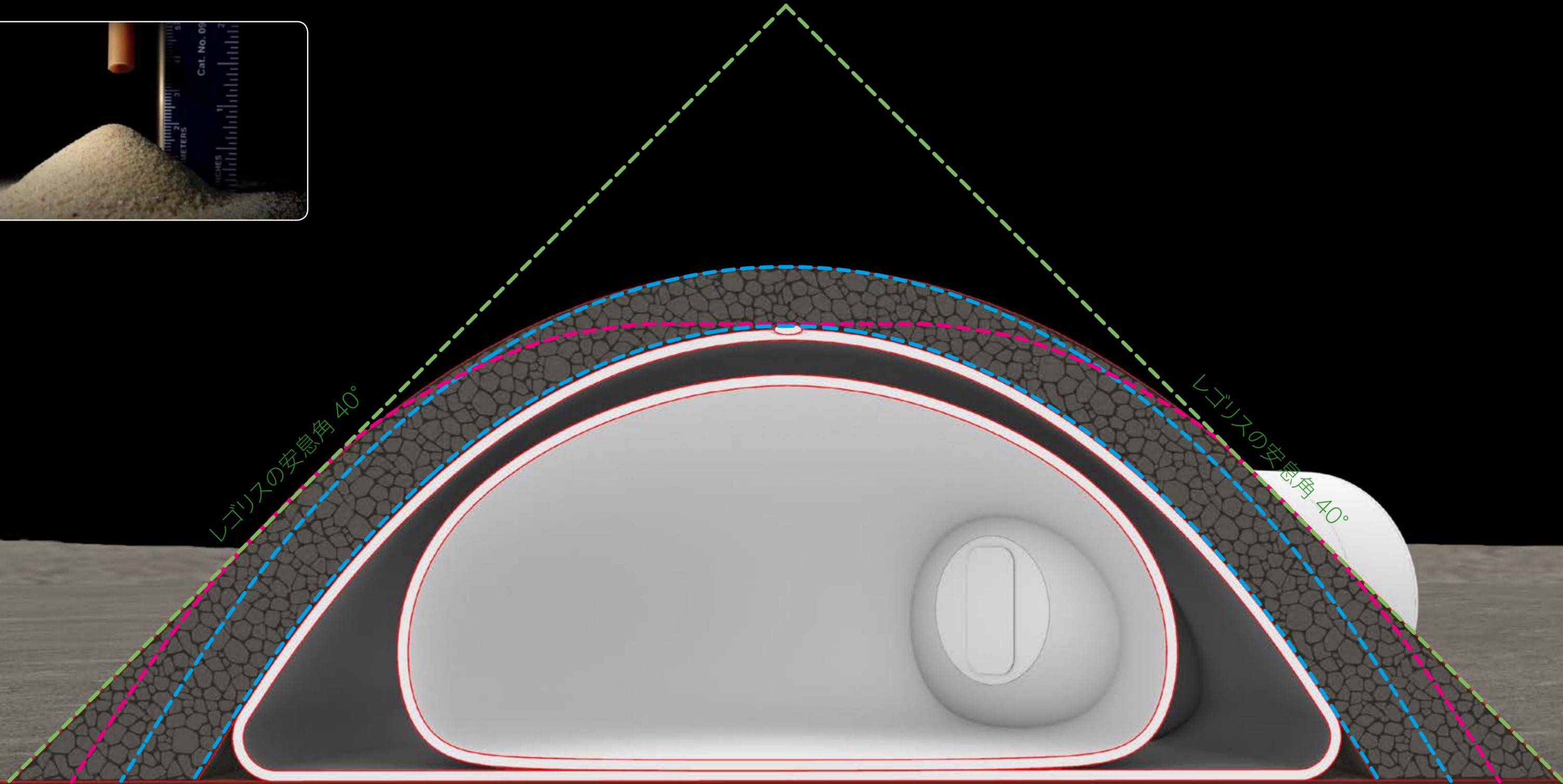
800mm平行線

懸垂曲線

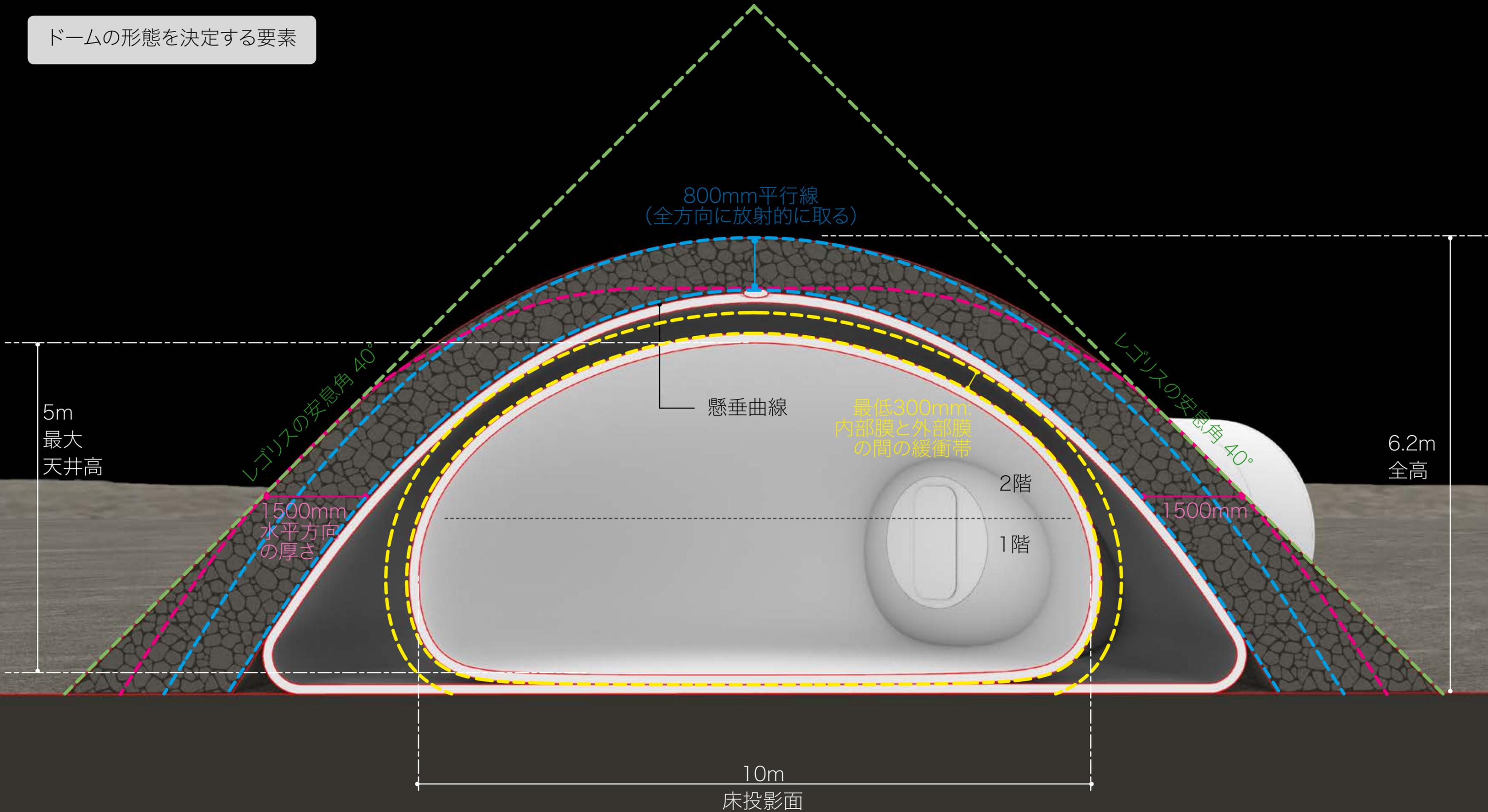
800mm平行線

800mm平行線



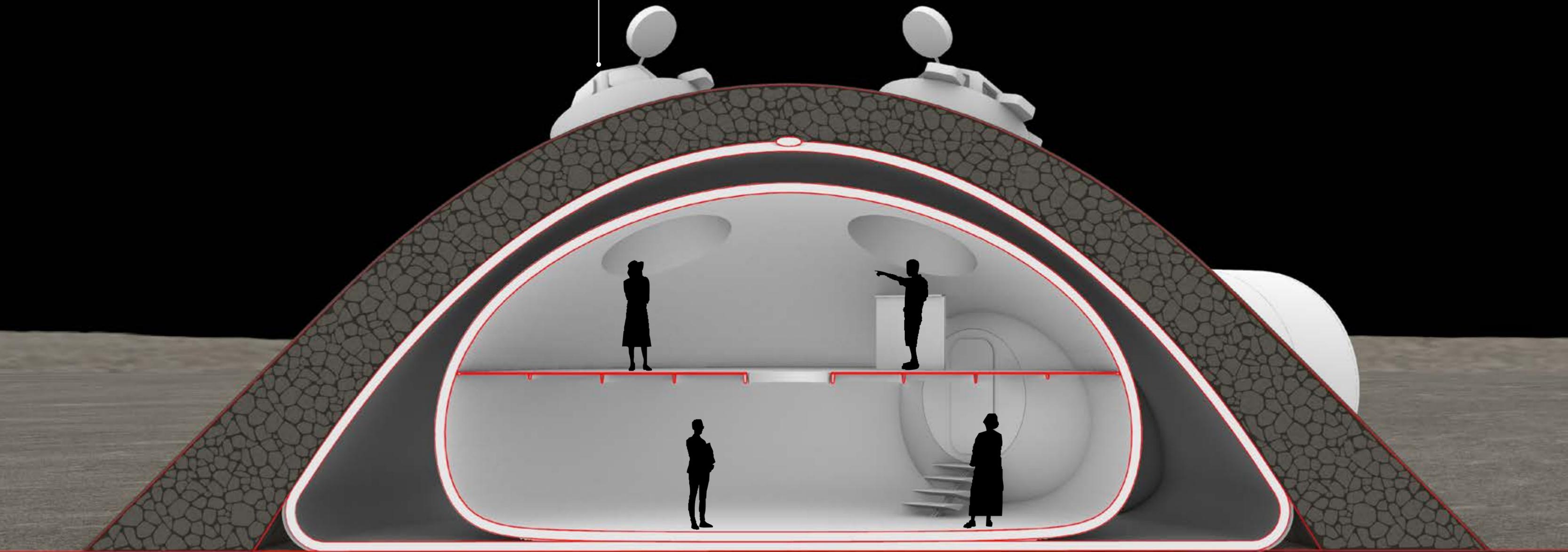


ドームの形態を決定する要素



無人施工開始から3ヶ月後、クルー到着

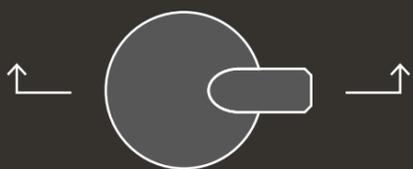
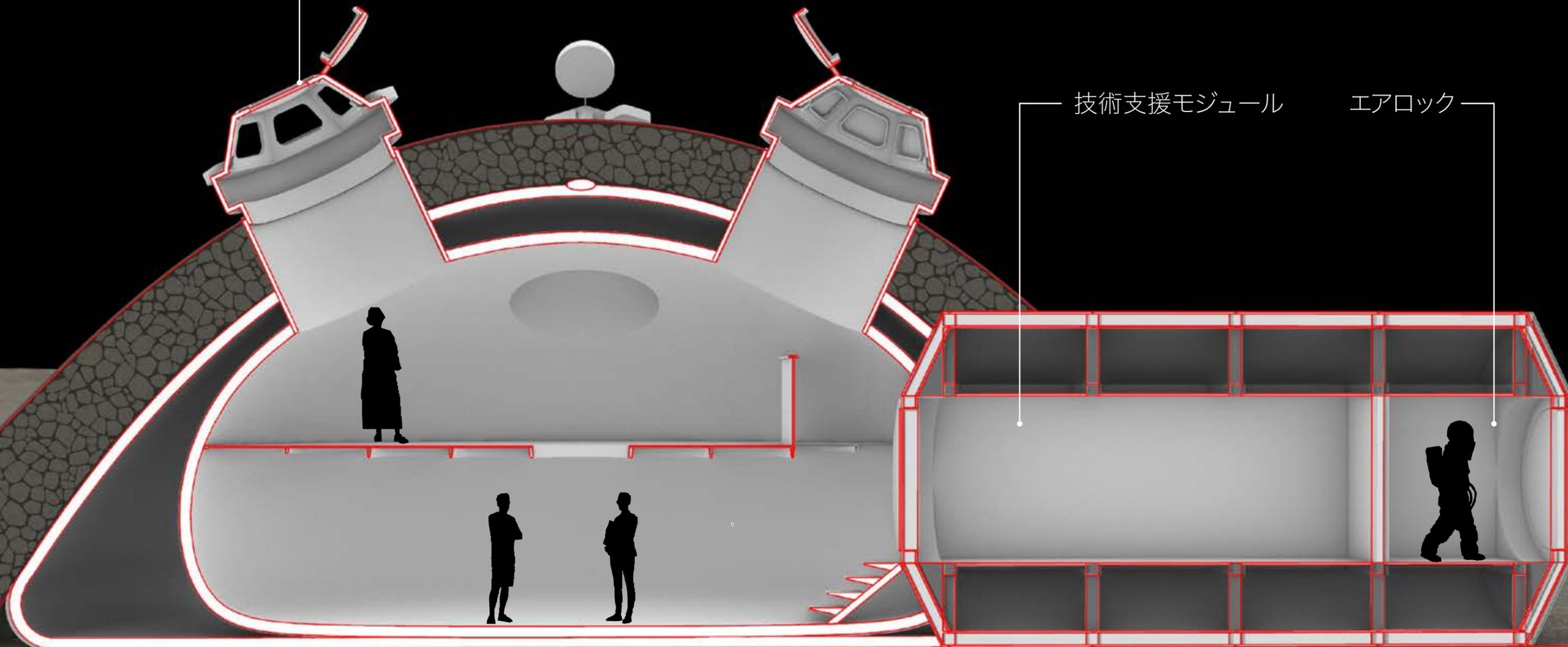
自然光彩光ユニット(キューポラ)

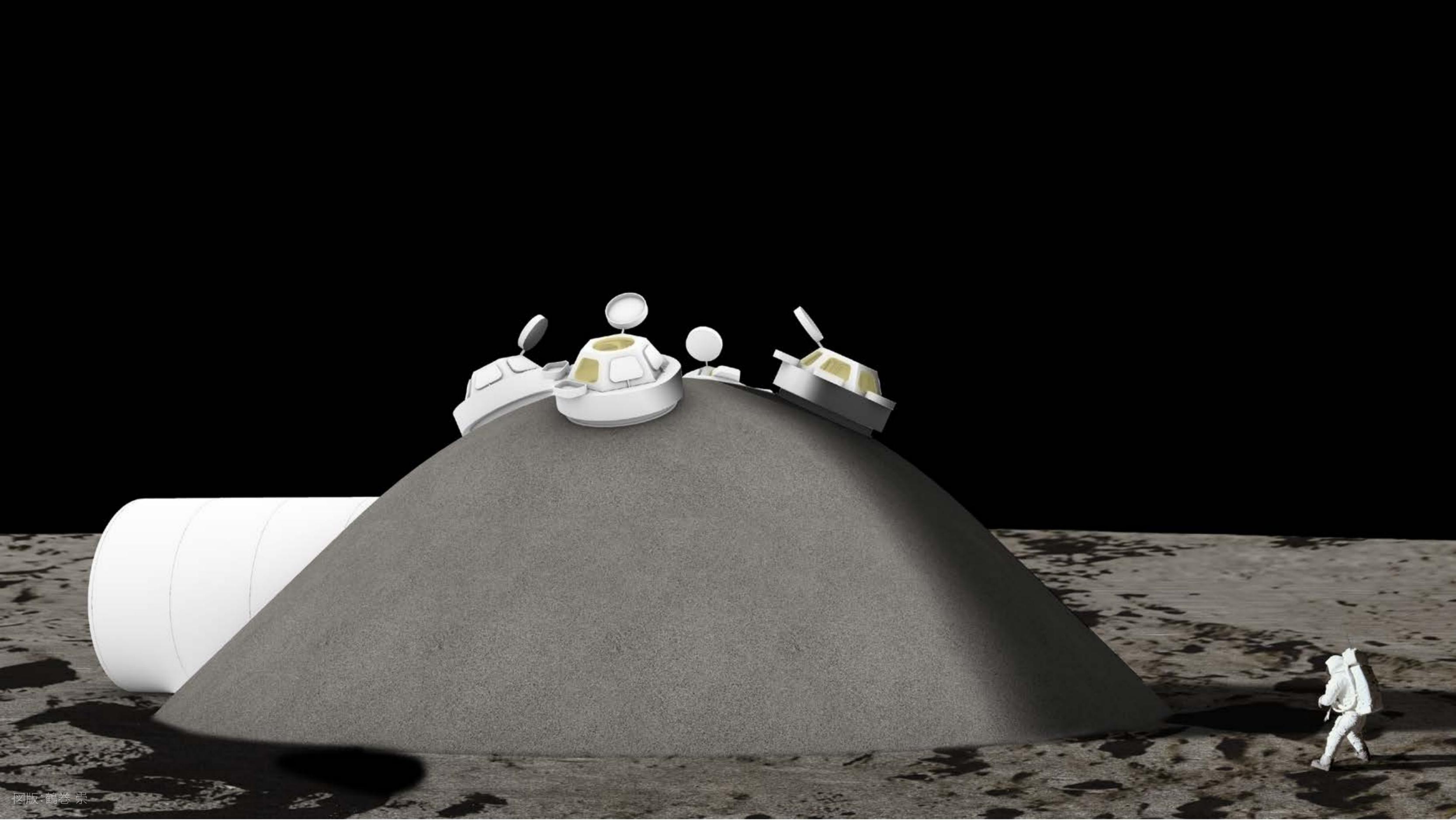


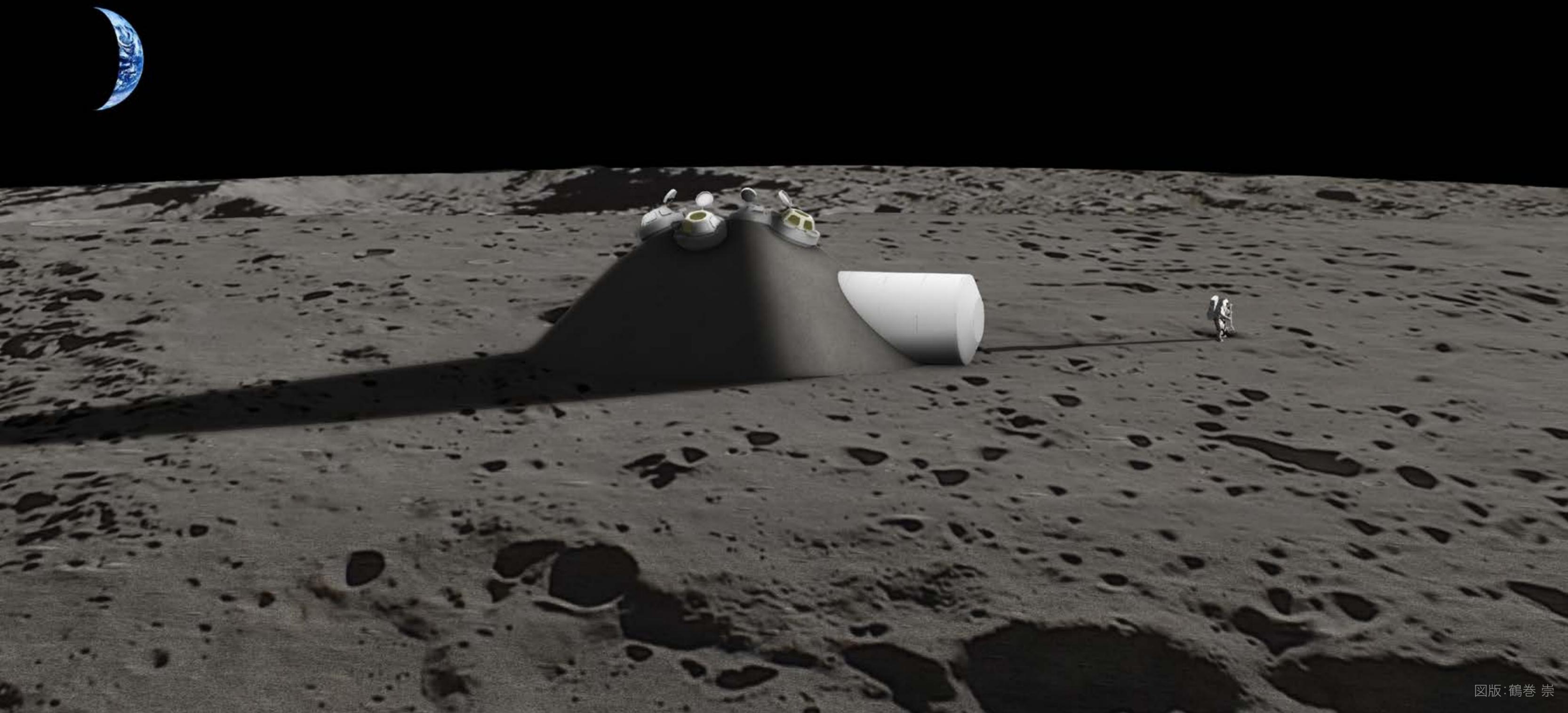
自然光彩光ユニット(キューポラ)

技術支援モジュール

エアロック

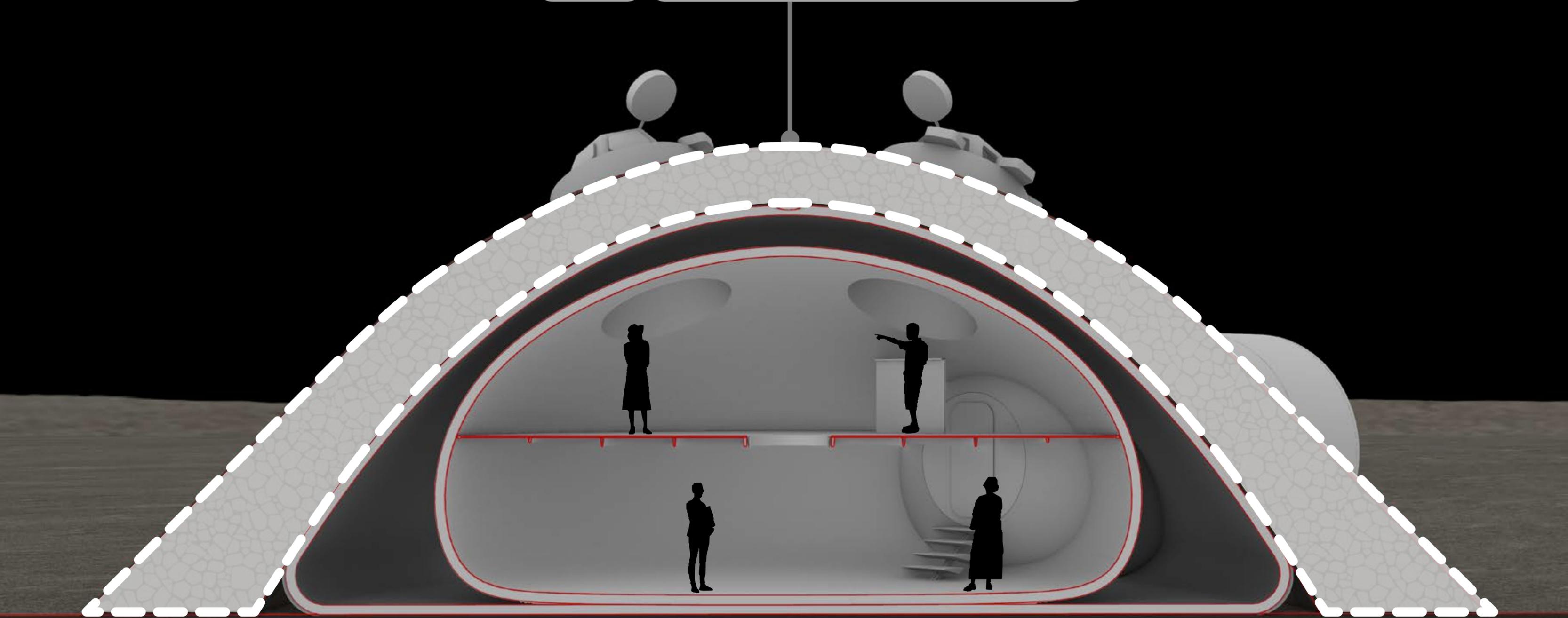






6-1

3Dプリント技術による外殻構造

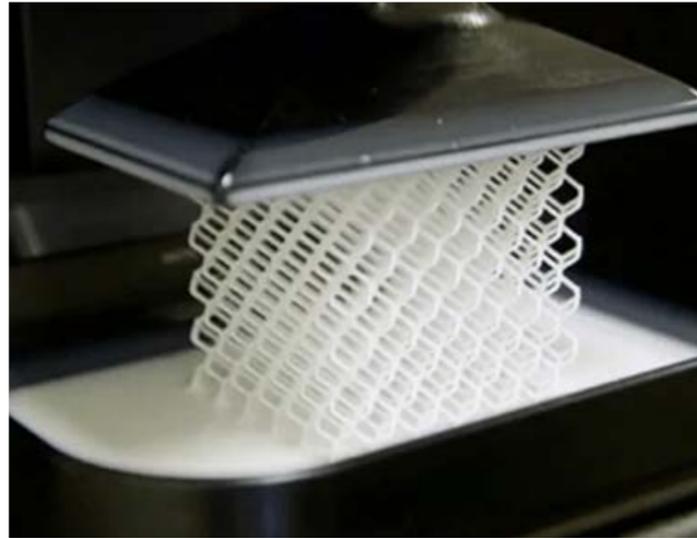




Additive manufacturing  
積層造形技術  
3D プリント

積層造形技術とは  
デジタルモデルに基づいて材料の層を一枚ずつ重ねて立体物を製造する方法。  
材料のブロックから削り出したり、型枠に材料を流し込んで形を形成する方法と区別する目的で作られた名称。3Dプリントは商標登録された商品が呼称として定着した俗称

## 1. 光造形方式



UVで硬化する液体樹脂に下部からLED光線を当て一層ずつ造形する方式

材料:  
エポキシ系樹脂  
など

## 3. シート積層方式



薄いシート状の素材をラミネート(積層)していく方式

材料:  
PVC(塩ビ、ポリ塩化ビニル)  
プラスチックシート  
接着剤でコーティングされた紙  
薄い金属  
など

## 5. バインダージェットティング (粉末固着(接着)方式)



粉末固着方式は、石膏などの粉末材料を敷き詰めた上に、ヘッドを移動させて接着剤を吹き付けて固めていく方式

材料:  
石膏粉末  
砂  
金属粉  
など

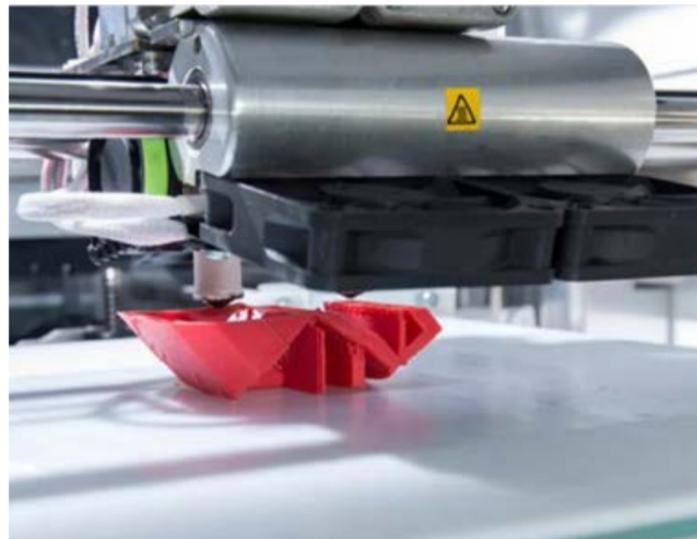
## 7. 指向性エネルギー堆積方式



噴射ノズルから粉末を供給しつつ、同時にレーザーで熱を加える事で熔融結合していく造形方式

材料:  
金属  
など

## 2. 材料押出構法 (熱溶解積層方式)



熱溶解積層方式は、プリンターヘッドから溶けた樹脂を押し出しながら積層する方式

材料:  
ABS樹脂、  
PLA樹脂、  
コンクリート  
など

## 4. 粉末燃結方式



粉末状の材料にレーザー光線を当てて焼結させる方式

材料:  
樹脂系素材  
金属系素材(チタン・ニッケル)  
ナイロン  
など

## 6. マテリアルジェットティング



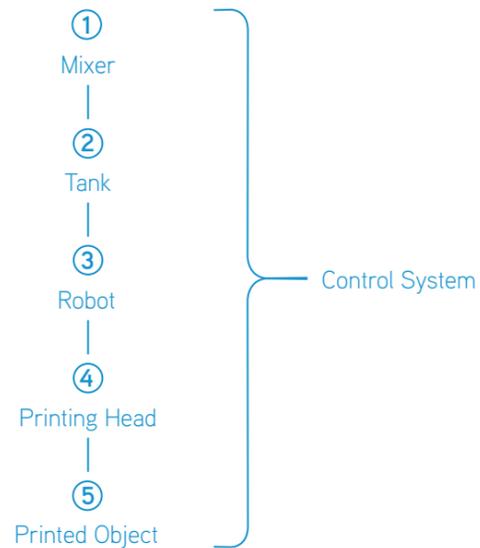
インクジェットヘッドから噴射した樹脂を、紫外線で固めて積層する方式

材料:  
光硬化性樹脂  
ワックス  
など

国際標準化機構(ISO)  
による積層造形の方式に関する  
分類



# OPERATING PRINCIPLE



XtreeE's 3D printing system relies on an industrial 6-axis ABB robot, which allows more complexity for the printed shapes. The printed material is brought to the end of the robot's arm, where the printing head developed by XtreeE is placed. The robot deposits material layers that progressively accumulate and form the desired object.

## 3Dプリント応用事例



### XTREE CORE

CONNECTED 3D PRINTING SYSTEMS

XtreeE seeks to develop technologies making quality construction available to everyone, by renting/selling connected large-scale 3D printing systems using multiple materials. Our systems include 3D printing heads, stationary 3D printing units, mobile 3D printing units and a cable robot, under development. XtreeE also offers training sessions necessary to launch production at our clients' facilities.

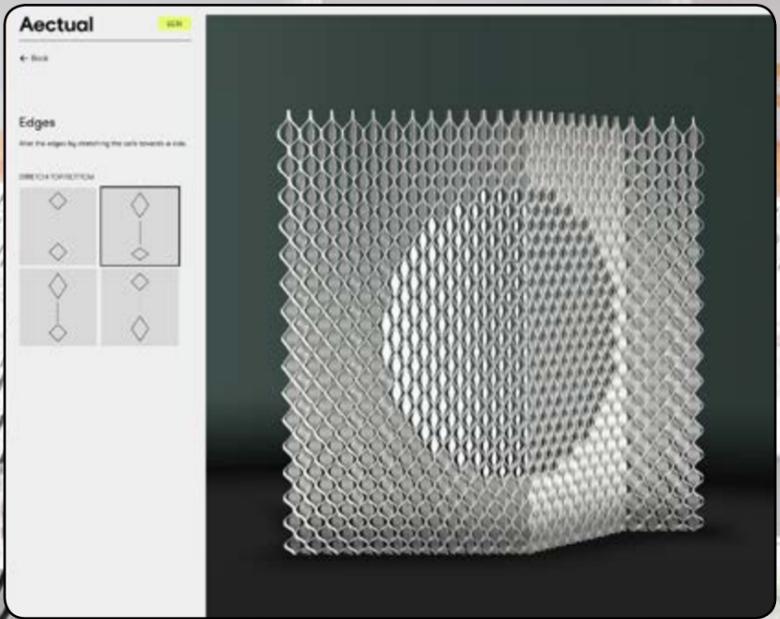


2. 材料押出構法  
材料:コンクリート

Stormwater Collector  
(Lille, 2017)

Client : Métropole Européenne de Lille  
Machine Files & Manufacturing: Point P + XtreeE  
On-site placing: La Sade





2. 材料押出構法  
材料:プラスチック



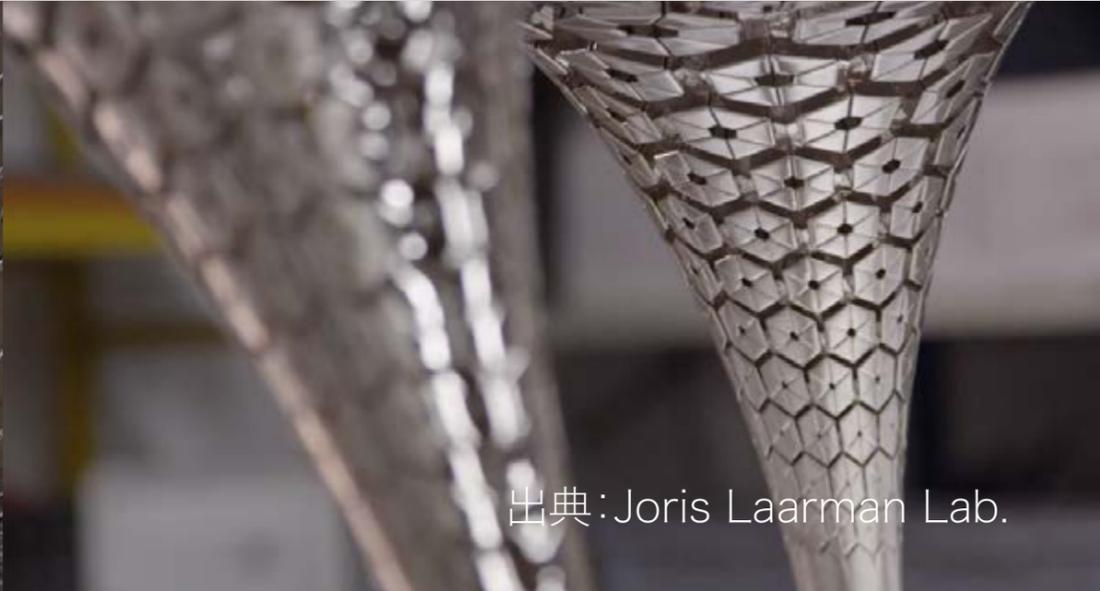
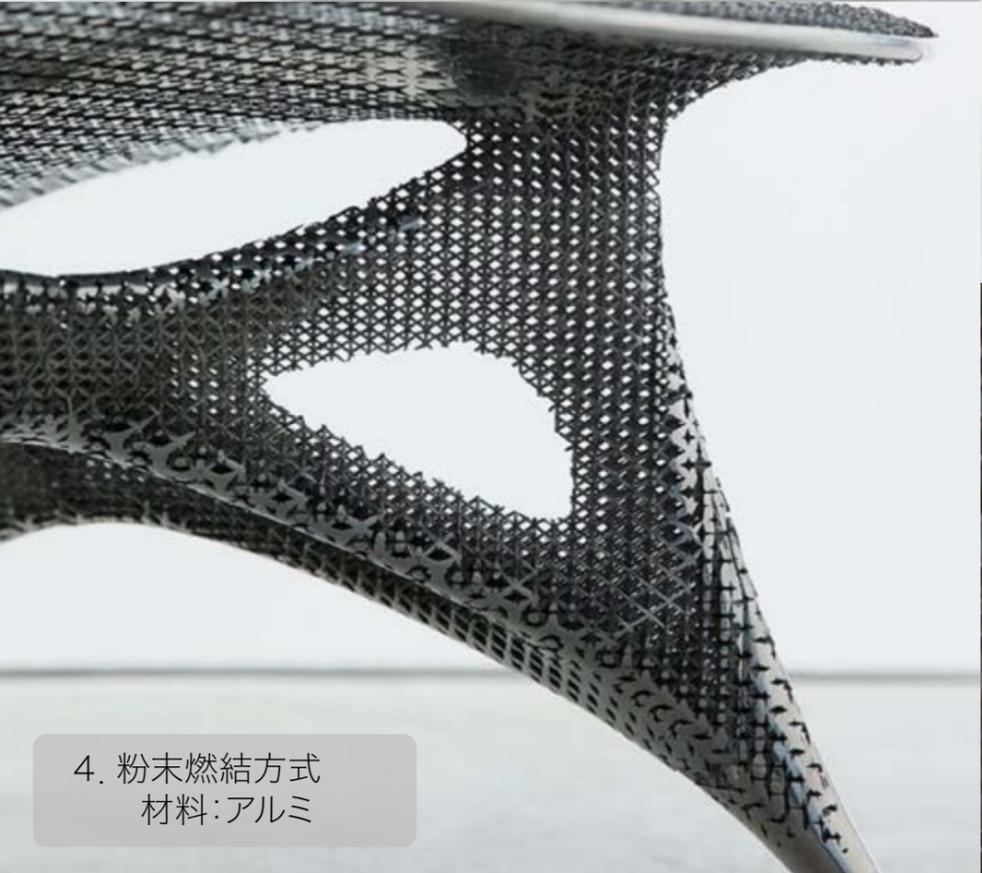
3Dプリント応用事例



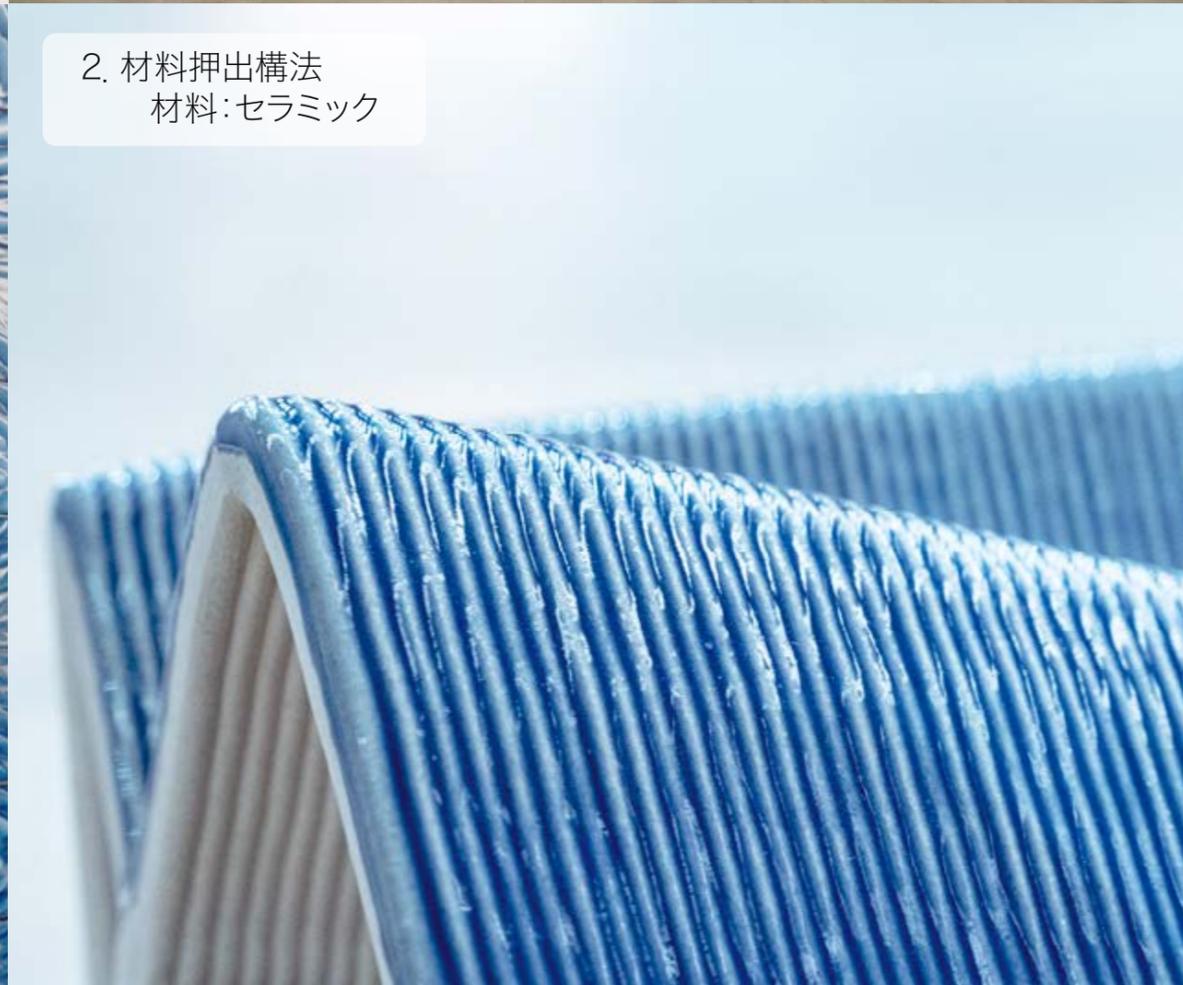
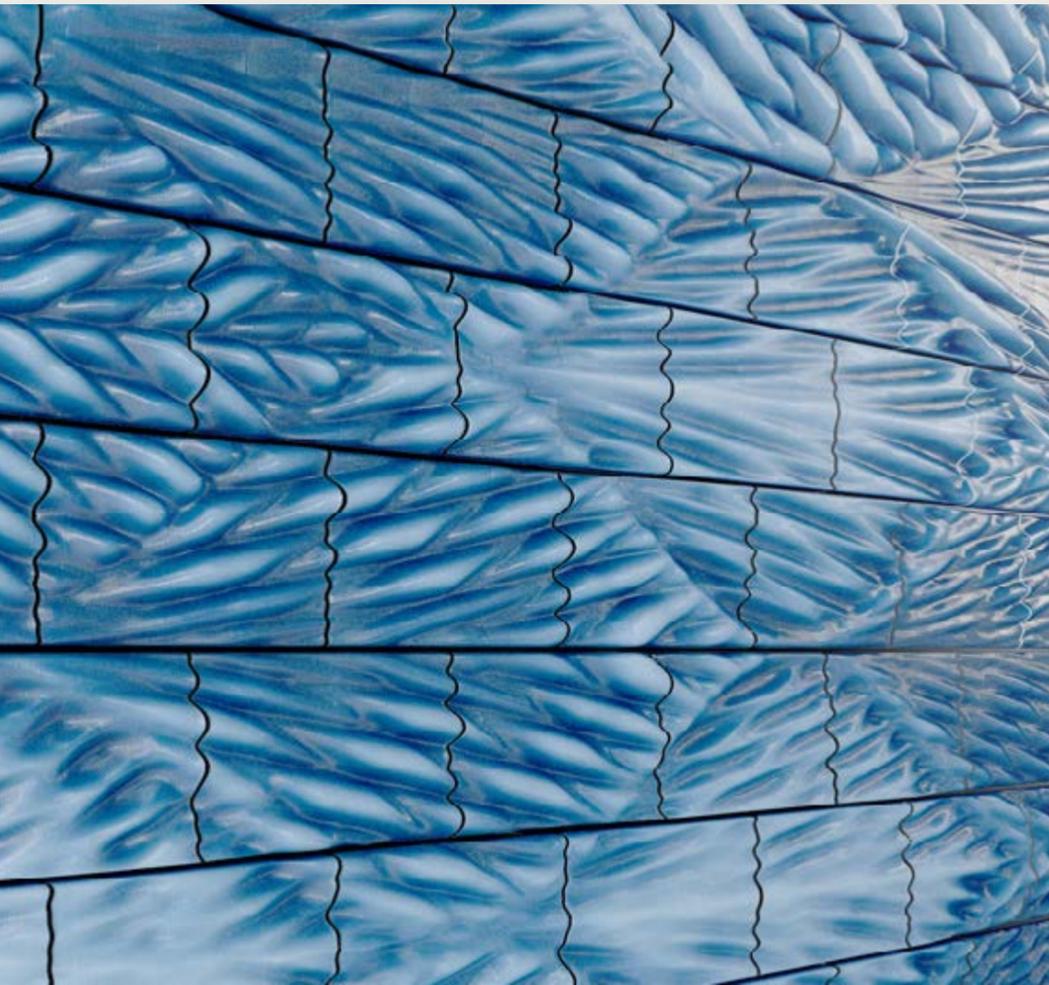
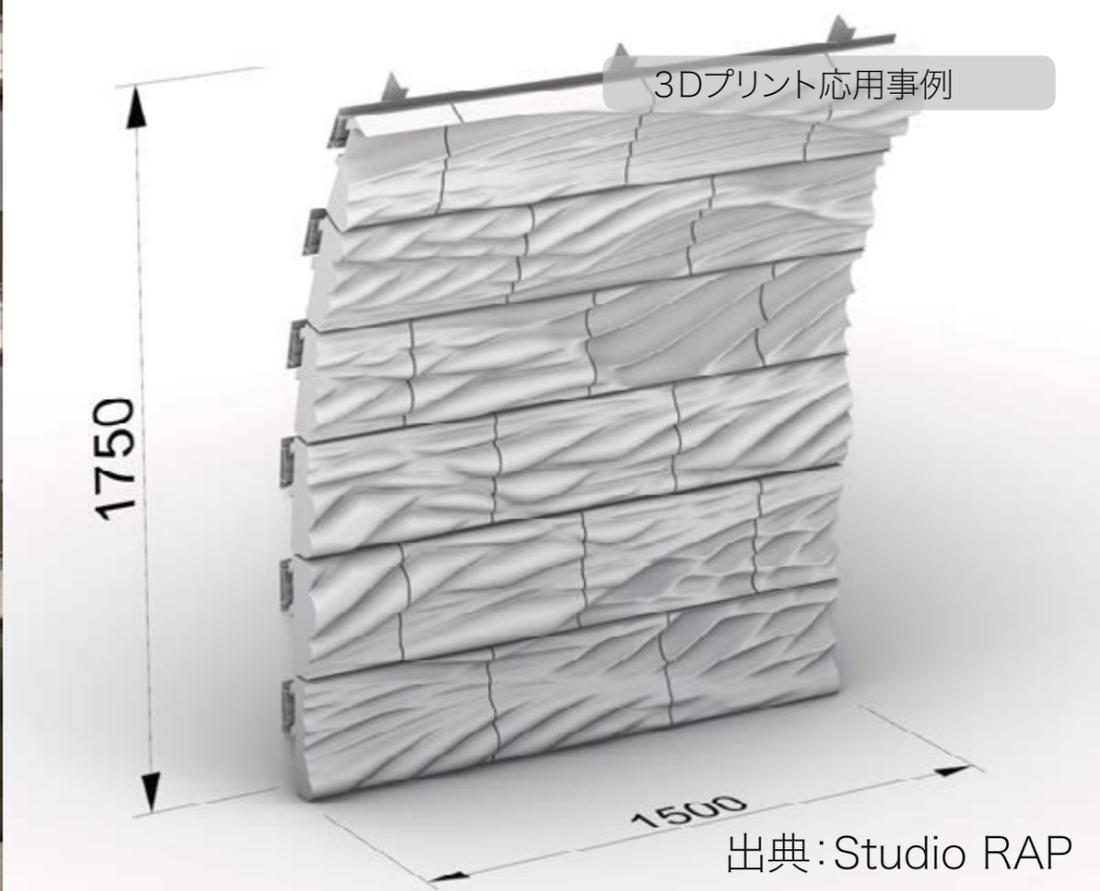
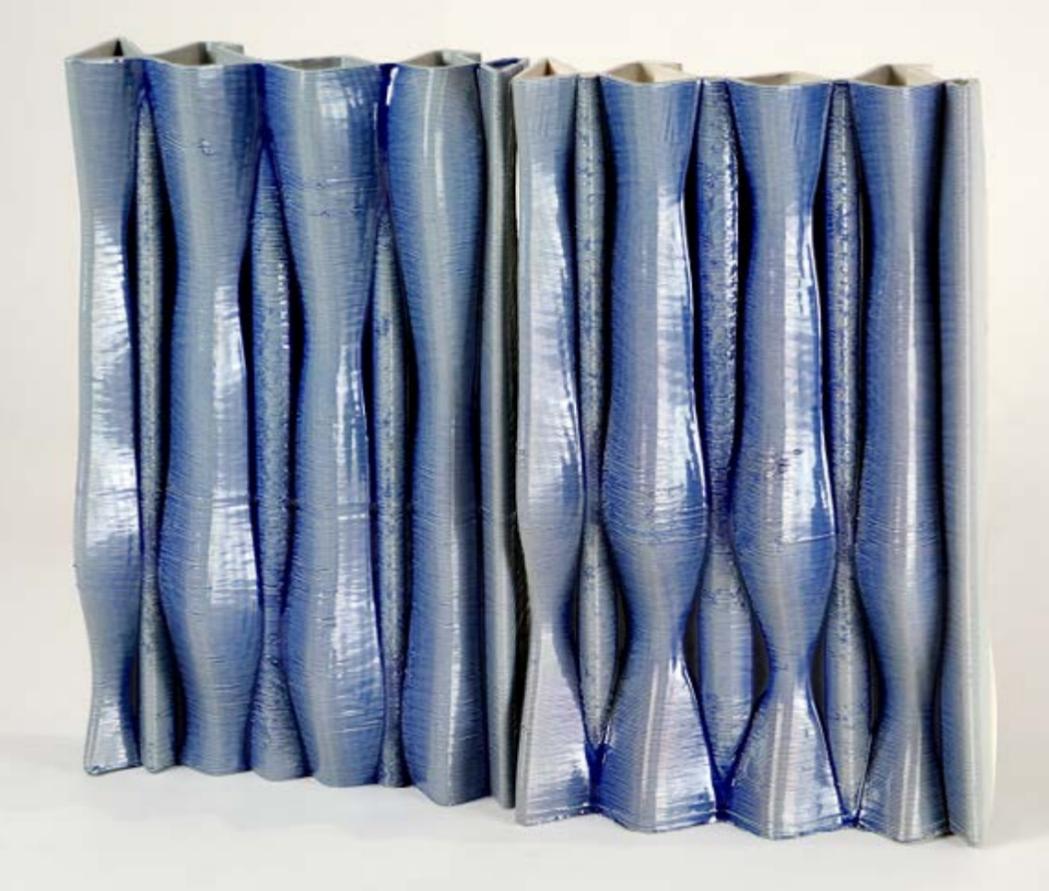
4. 粉末燃結方式  
材料: 鉄



出典: Joris Laarman Lab.



4. 粉末燃結方式  
材料:アルミ

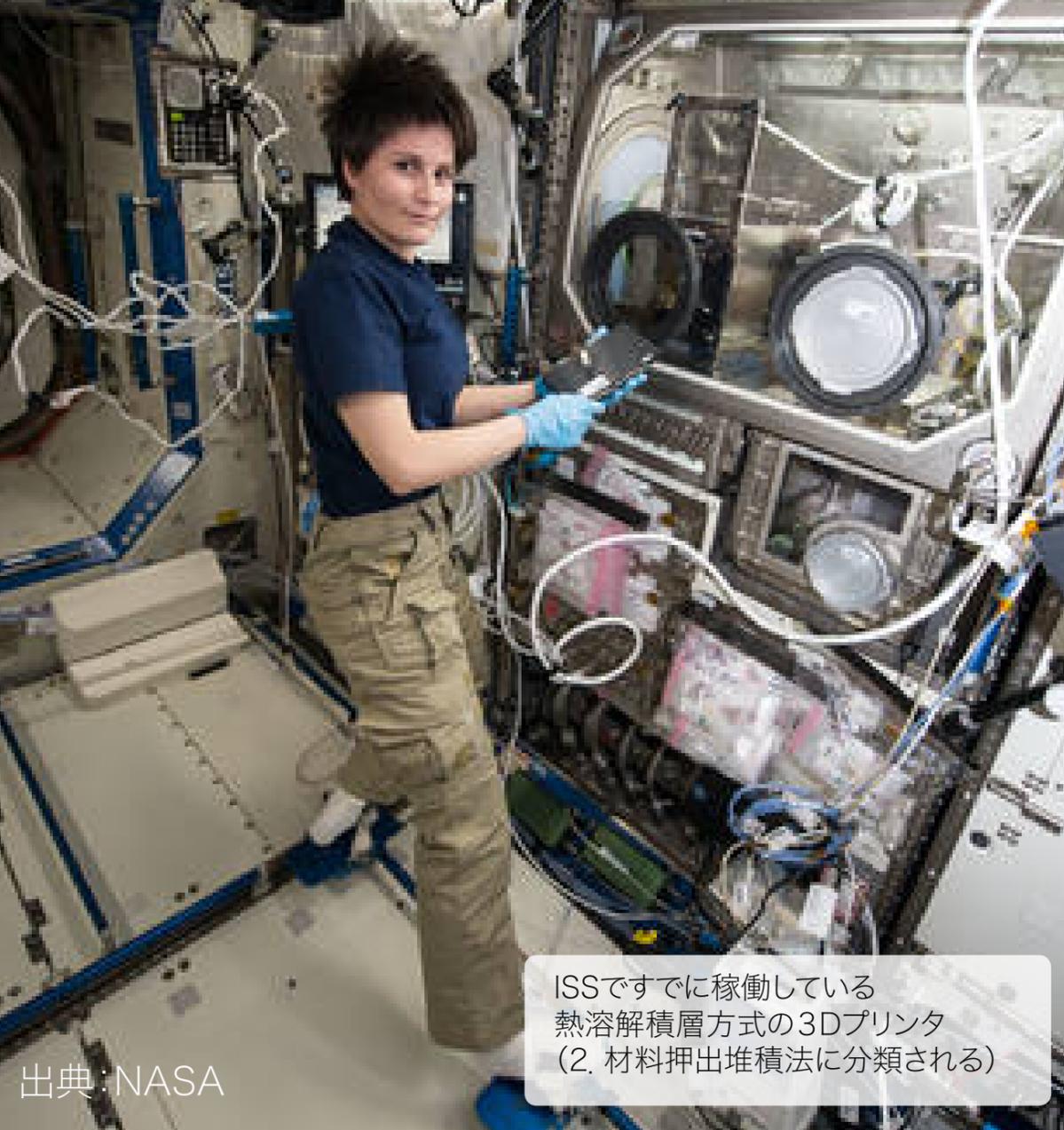


2. 材料押出構法  
材料: セラミック



4. 粉末燃結方式  
材料:ナイロン





ISSですでに稼働している  
熱溶解積層方式の3Dプリンタ  
(2. 材料押出堆積法に分類される)

地球に依存しない精密部品の現地調達を目指して

出典: NASA



太陽光焼結方式  
(4. 粉末燃結方式に分類される)

出典: DRL



電子ビーム積層造形方式  
(4. 粉末燃結方式に分類される)

出典: ESA



出典: Lithoz

1. 光造形方式  
材料: セラミック



1. 光造形方式  
材料: レゴリス擬似材料

5. バインダーージェットティング  
材料:レゴリス擬似材料



出典:ESA



出典:ESA/Monolite

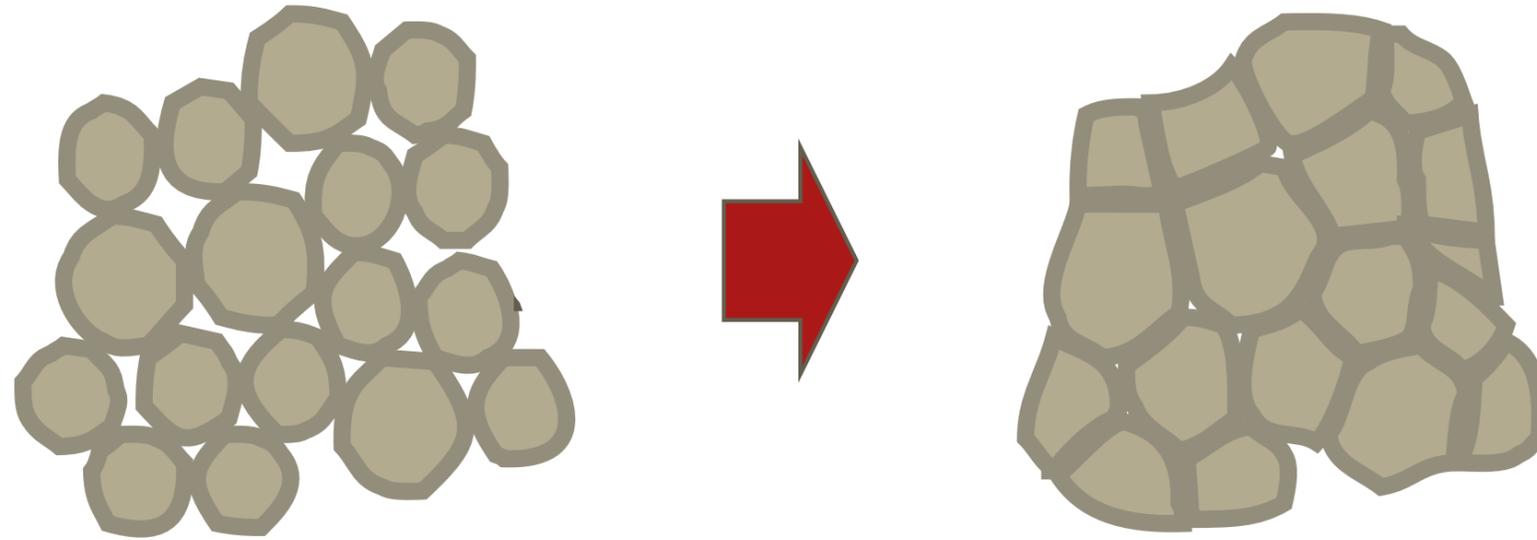
課題点:  
バインダーージェットティング3D  
プリントの使用を前提とすると、  
凝固剤が建設上不可欠な材料と  
なる。  
凝固剤は現地では生産不可能な  
ため、常に地球から安定的に供  
給されなければ、大量かつ大型  
の建造物を建設する上で不利に  
なる。  
運搬の費用も莫大なものとなる。

(ESAによる1kgあたりの物資運搬費用の  
試算:\$780,000)



出典:ESA

今後の展望：  
月面にあるもの、太陽エネルギーとレゴリスを使った太陽光焼結方式の3Dプリントを利用する。



粉末焼結(燃結)方式3Dプリント：加熱により原子同士が接合する現象を利用

4. 粉末焼結方式  
材料：砂・レゴリス



出典：Markus Kyser



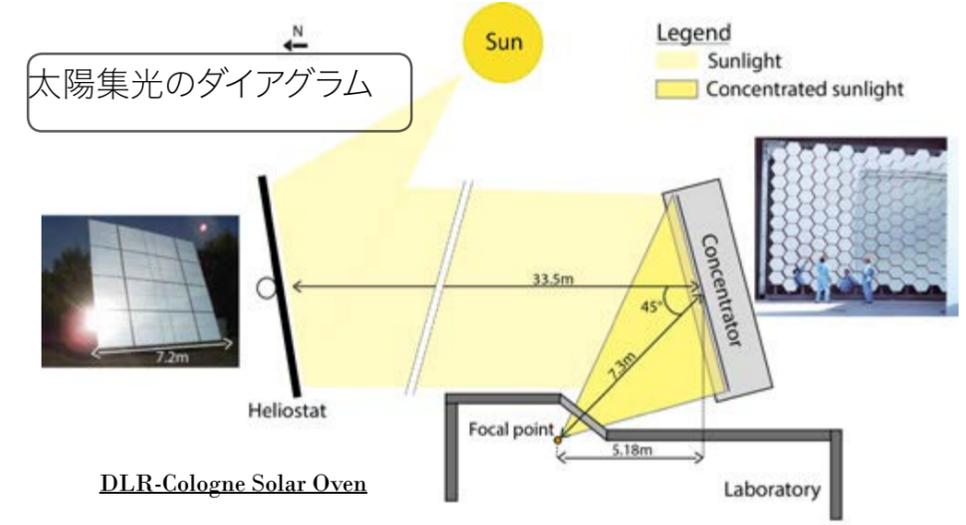
出典：Markus Kyser

類似事例

ドイツ人アーティスト、Markus Kyser(マーカス・カイザー)によるサハラ砂漠の砂を利用したSolar Sintering 3Dプリント(太陽焼結方式)の例

DLR(ドイツ航空宇宙センター)ではEUのプロジェクトとして太陽焼結方式の3Dプリントで月面基地の外殻を形成するインターロッキングのブロックを開発しています。

Solar 3D printing of lunar regolith

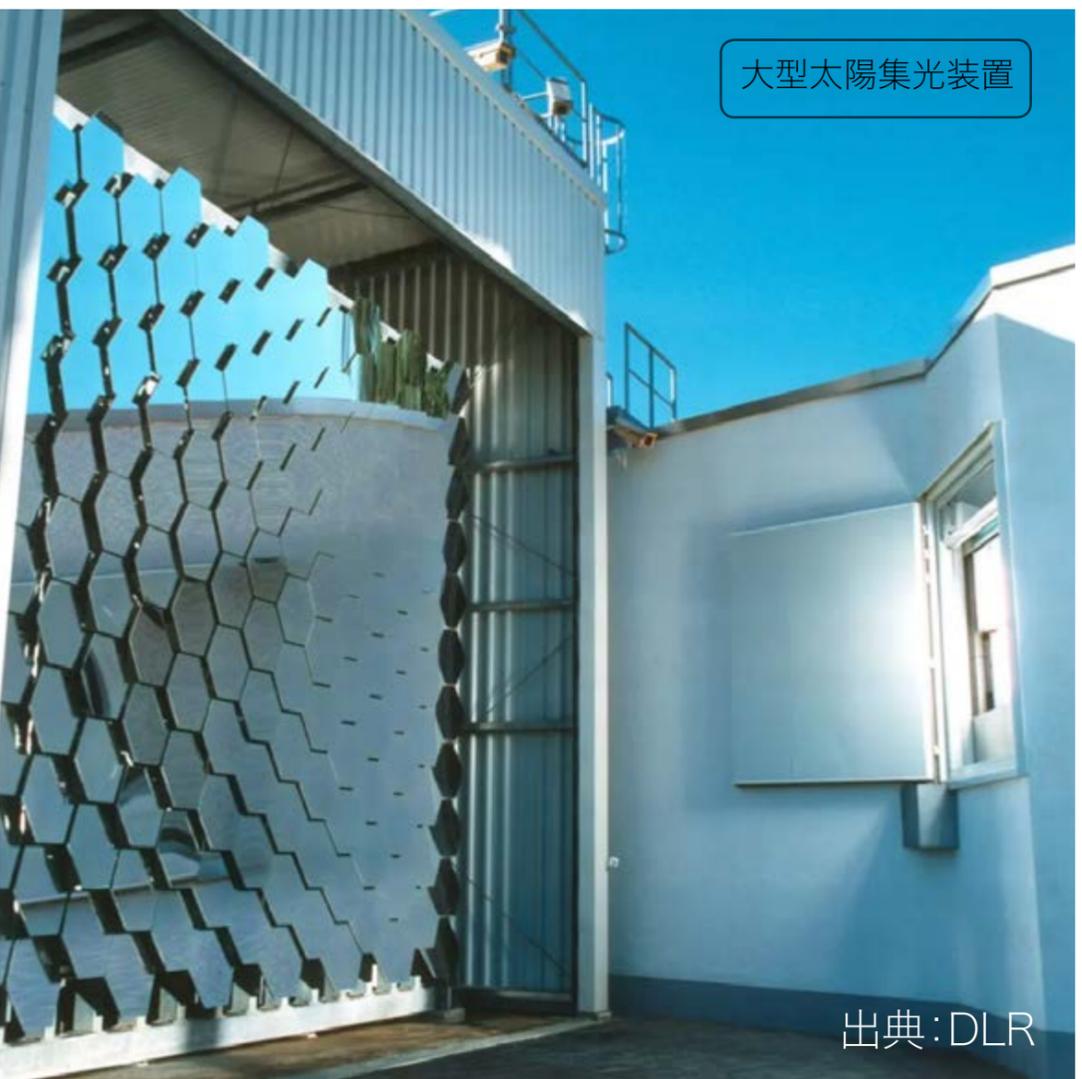


- Mobile 3D printer**
- demonstrates printing operations in an operational setting closer in scale to one that would be used on the moon surface
  - comprised of a lightweight lens oriented in a 3-dimensional space
  - lens moves, as opposed to the sintering bed
  - allows the construction of larger building blocks
- reuses:**  
 feeder (FEMA)  
 software components (NCGU)

Solar sintering



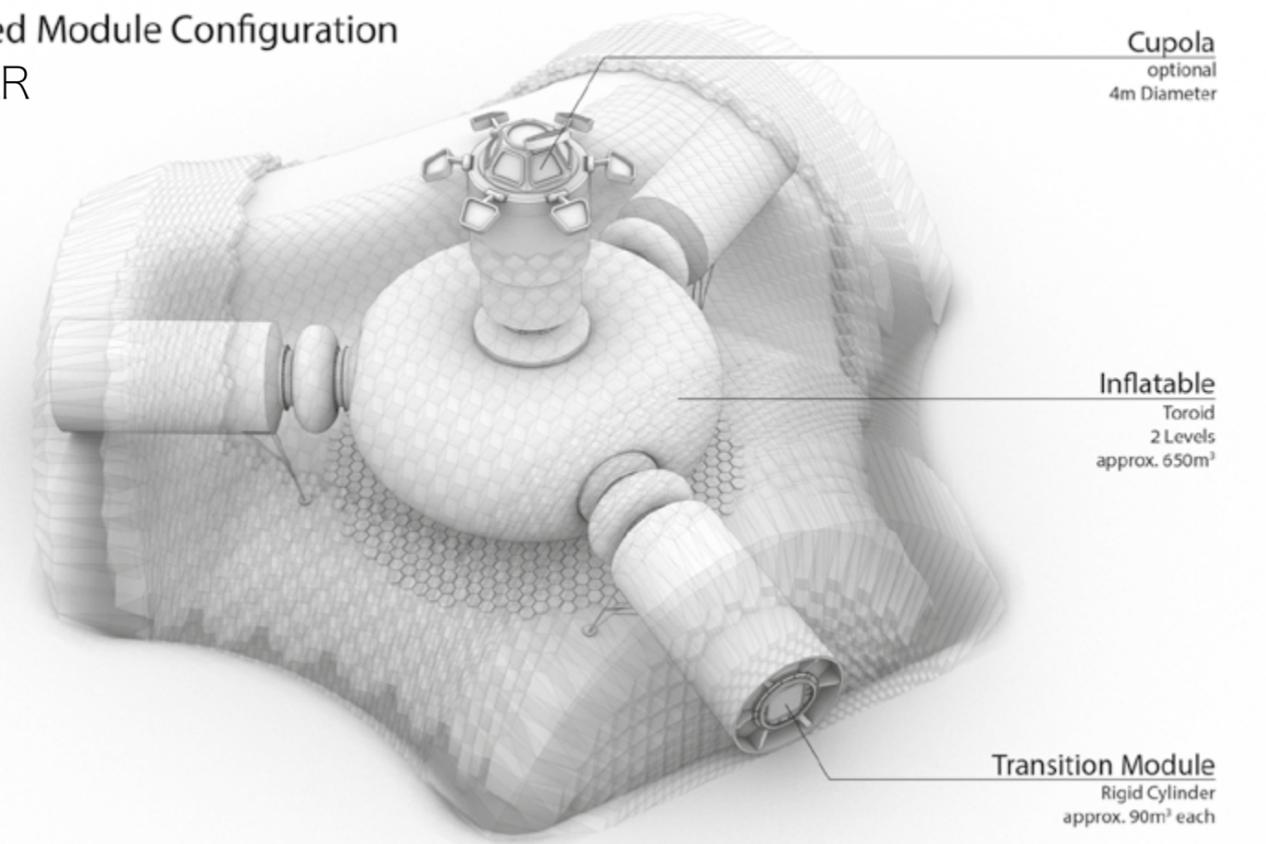
携行型太陽集光装置の開発



今後の展望:

月面にあるもの、太陽エネルギーとレゴリスを使った太陽光焼結方式の3Dプリントで、月居住施設の外殻を形成するインターロッキングブロックを作る

Dome Chamber Pressurized Module Configuration  
 出典:DLR



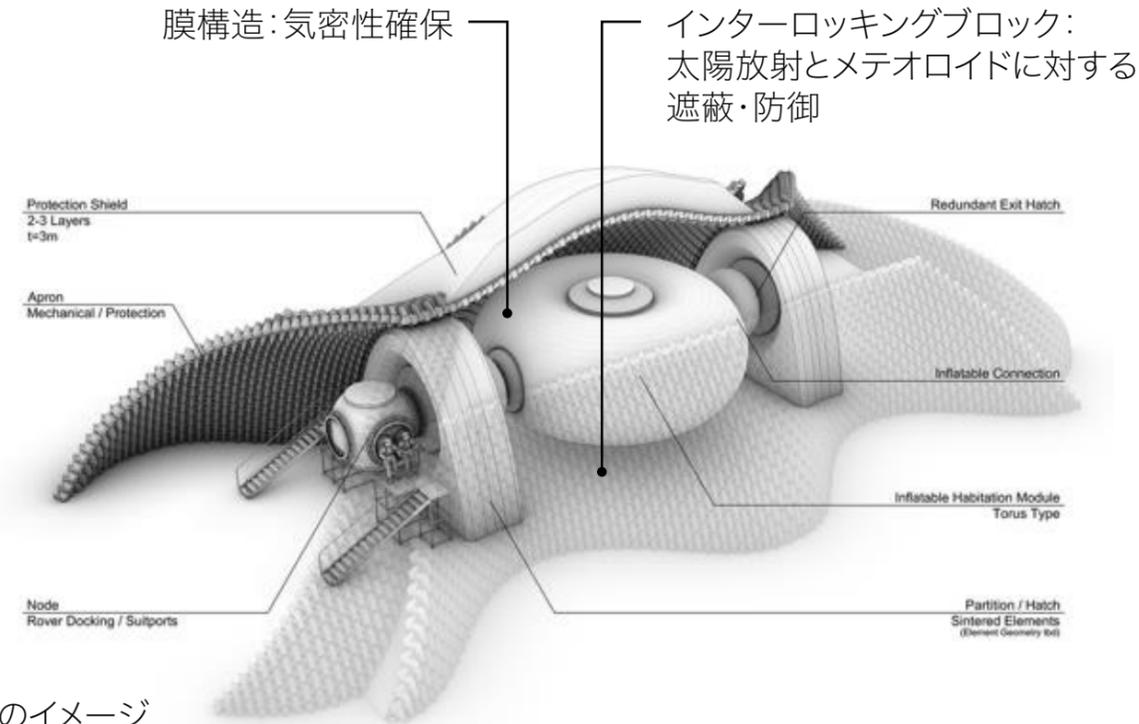
インターロッキングを利用した住居施設のイメージ  
 (外殻は太陽光焼結方式3Dプリントのインターロッキングで建設される。内部気密エリアは膜構造による)



出典: DLR

### Lunar habitat envelope constructed through tetrahedron elements

The interior can be outfitted with inflatable pressure-bearing volumes to create inhabitable zones



インターロッキングを利用した住居施設のイメージ  
(外殻は太陽光焼結方式3Dプリントのインターロッキングで建設される。内部気密エリアは膜構造による)



### Interlocking building elements

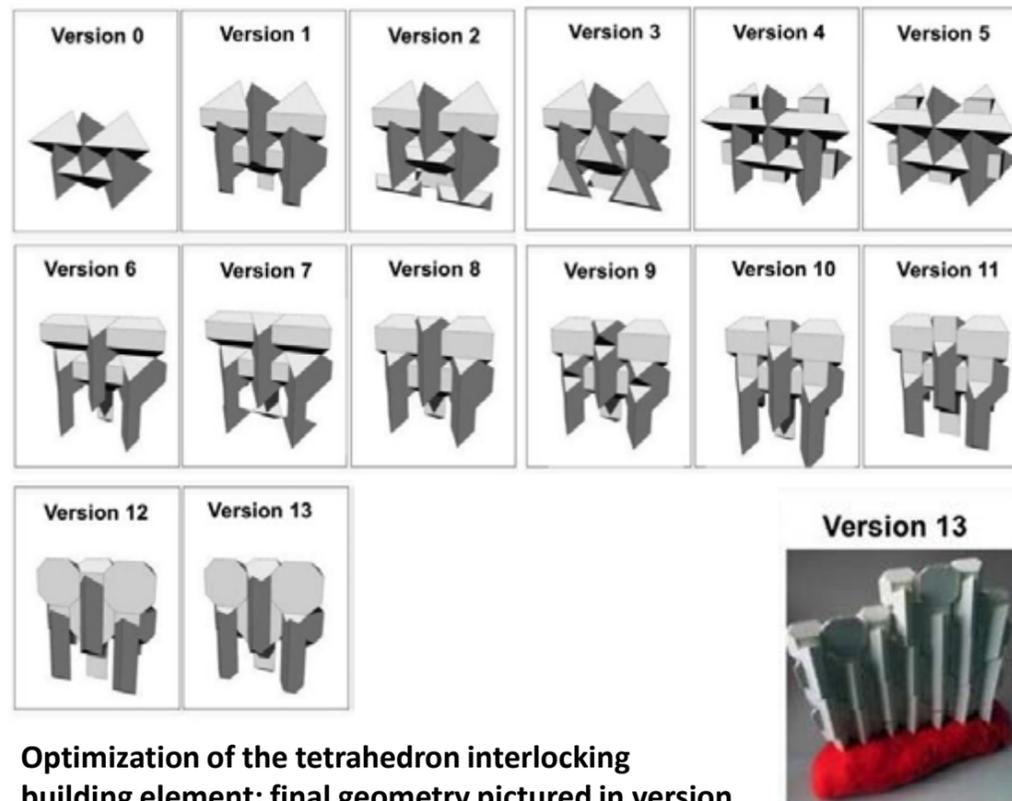
- Extensive geometric studies were undergone
- geometries are adapted in an iterative process after each sintering campaign in coordination with the material tests

### Tetrahedron

- self-centers during construction - eliminating the need for external scaffolding
- has sharp edges and allows the construction of a completely sealed habitat envelope

出典: DLR

### Building Elements



Optimization of the tetrahedron interlocking building element; final geometry pictured in version 13.



出典: Studio Dror

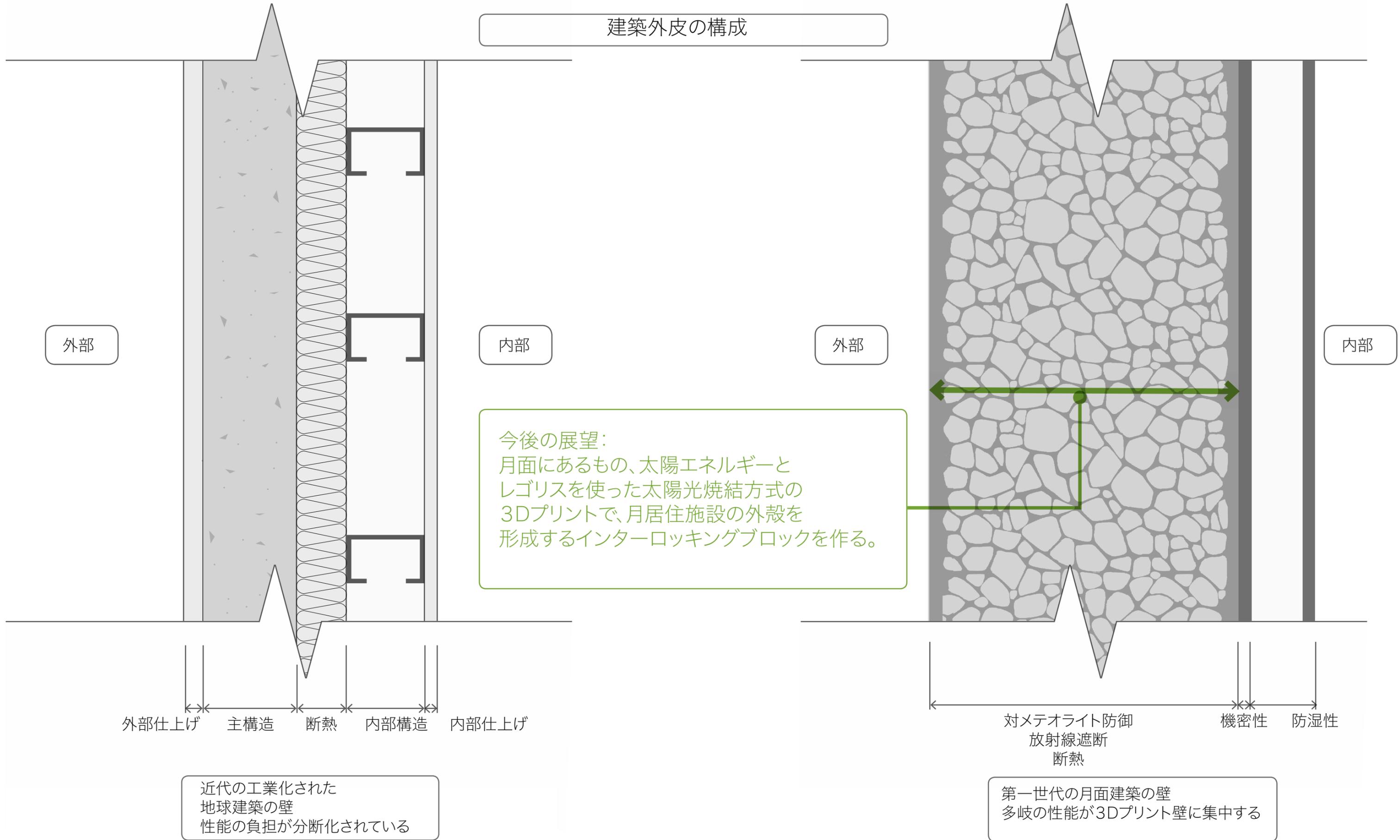


出典: Studio Dror

フラットパックブロックのアイデア  
趣旨は少し異なるが、ジオメトリーとシステムの考察において示唆的なプロジェクト

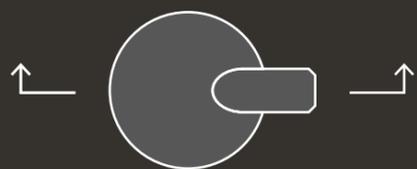
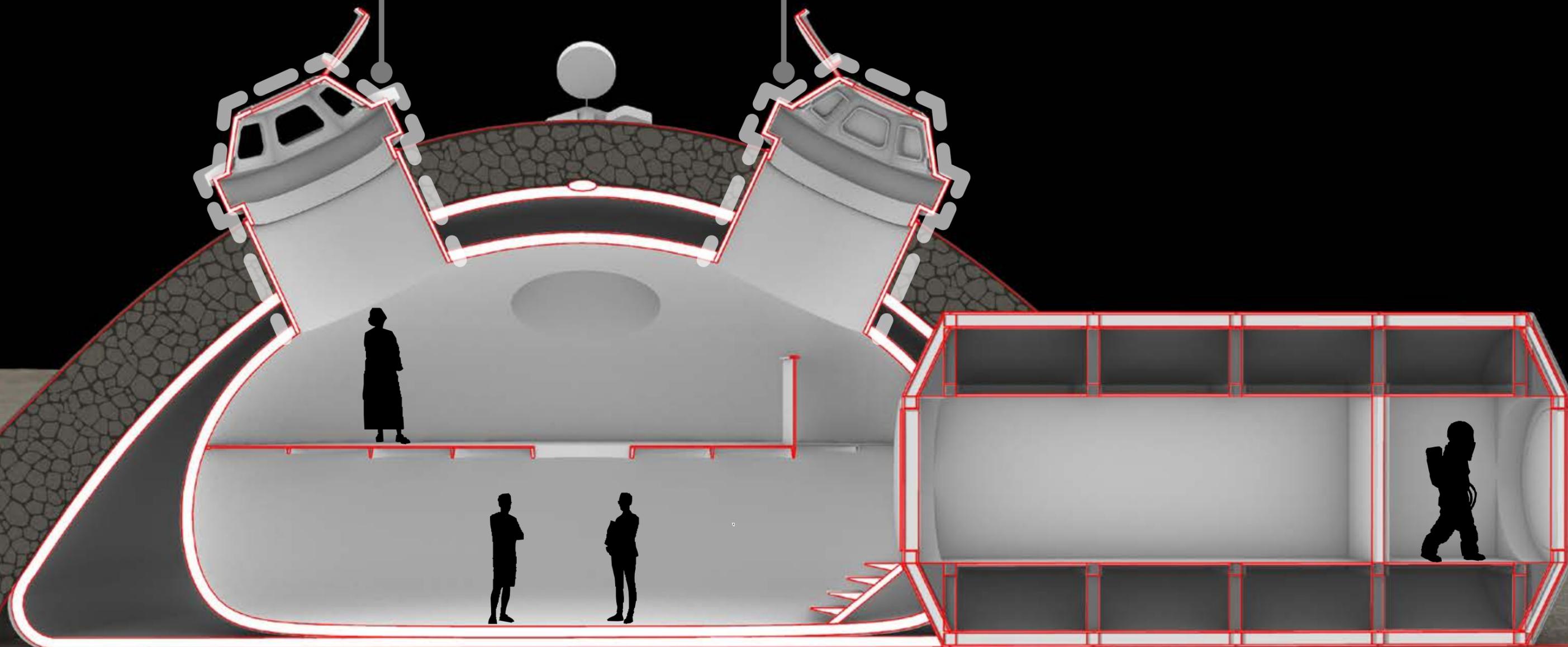
建築家によるブロックの形状と施設全体のジオメトリーのコーディネーションが重要

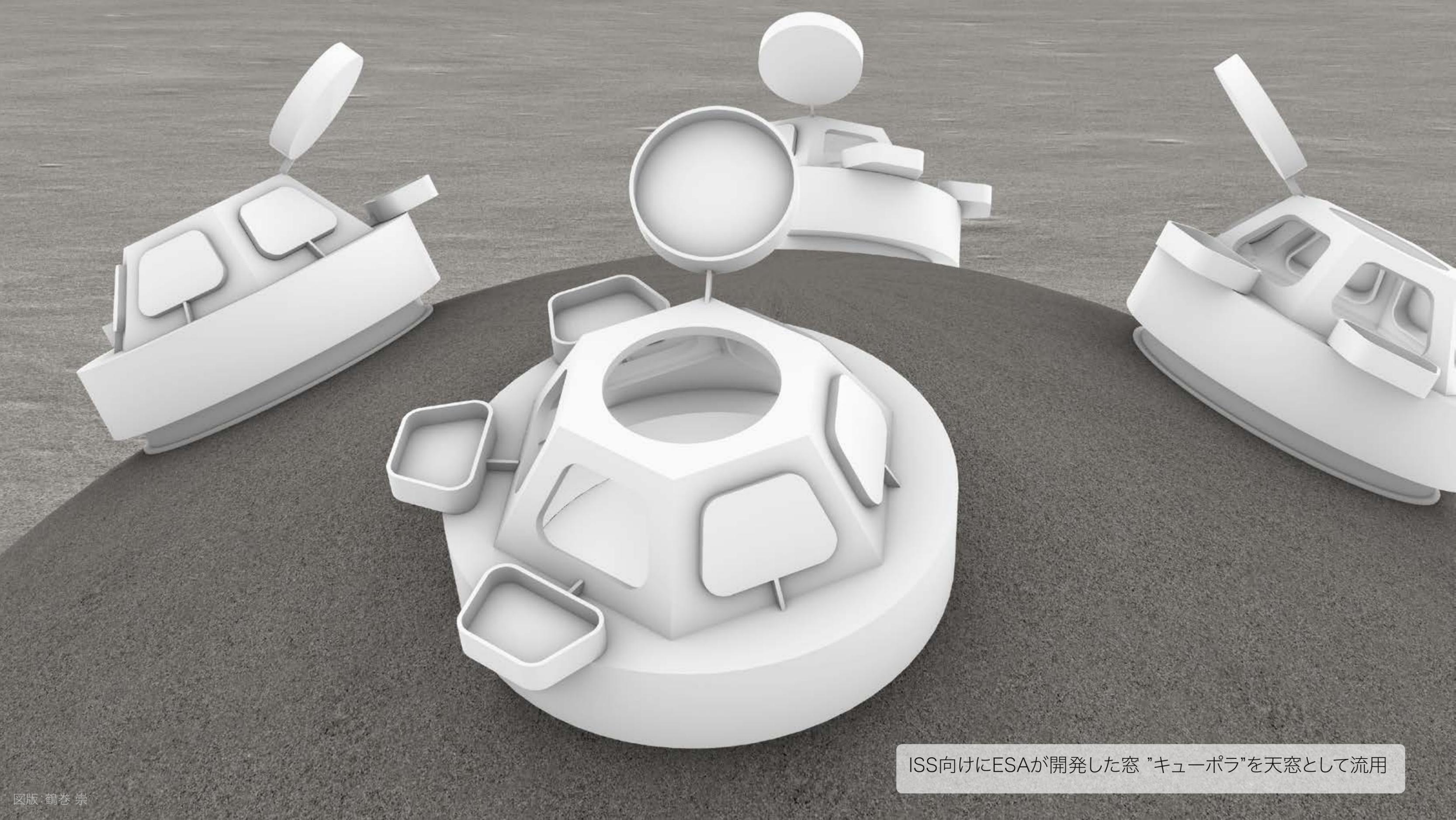
# 建築外皮の構成



6-2

窓・生命の保護と視界の確保





ISS向けにESAが開発した窓 "キューポラ"を天窓として流用

出典: NASA

### ISS キューポラの設置目的

- 外部との視覚的コミュニケーション (船外活動者とのコミュニケーション・ロボットアーム操作)
- 外界を視覚的に確認(精神的側面)

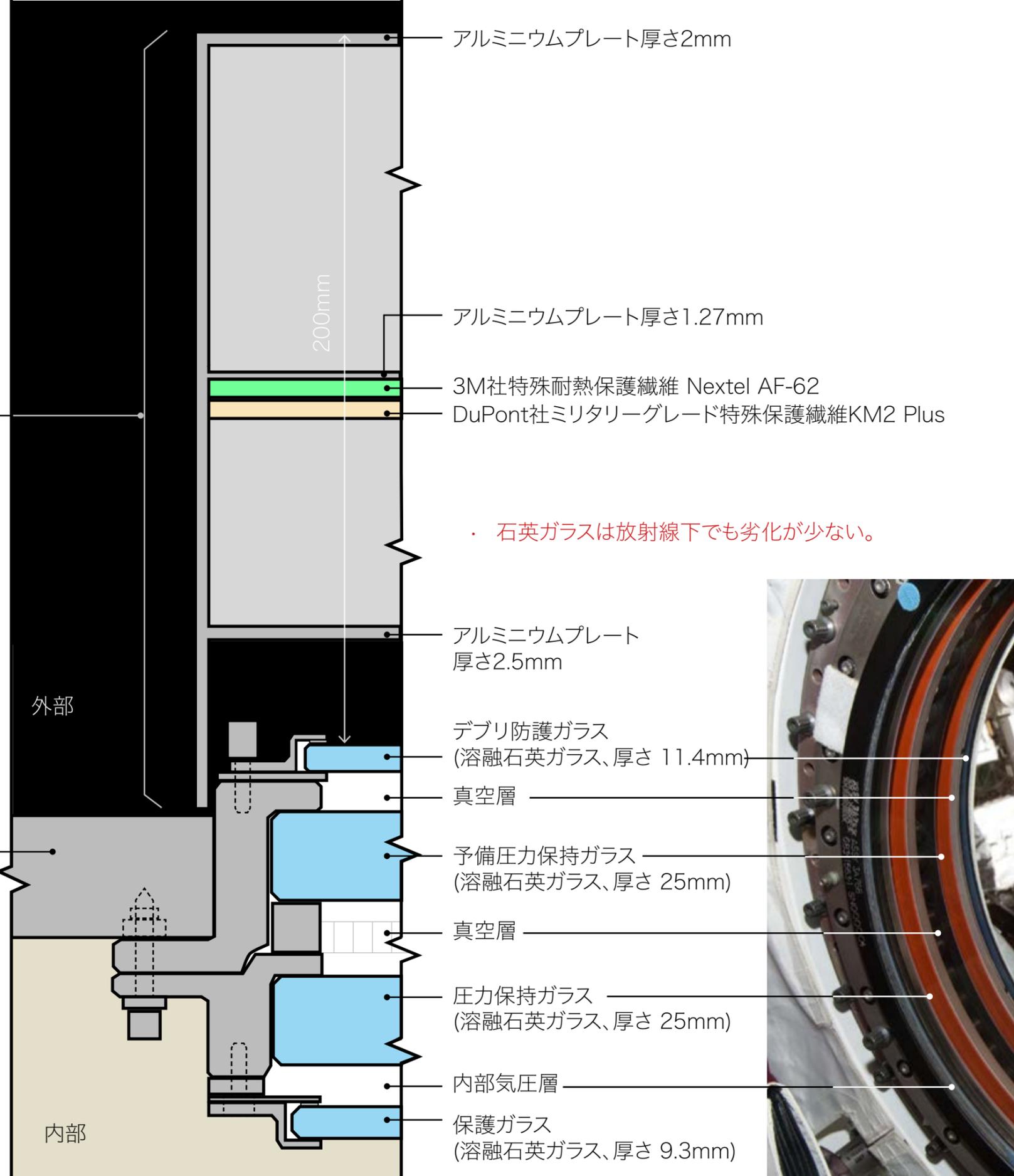


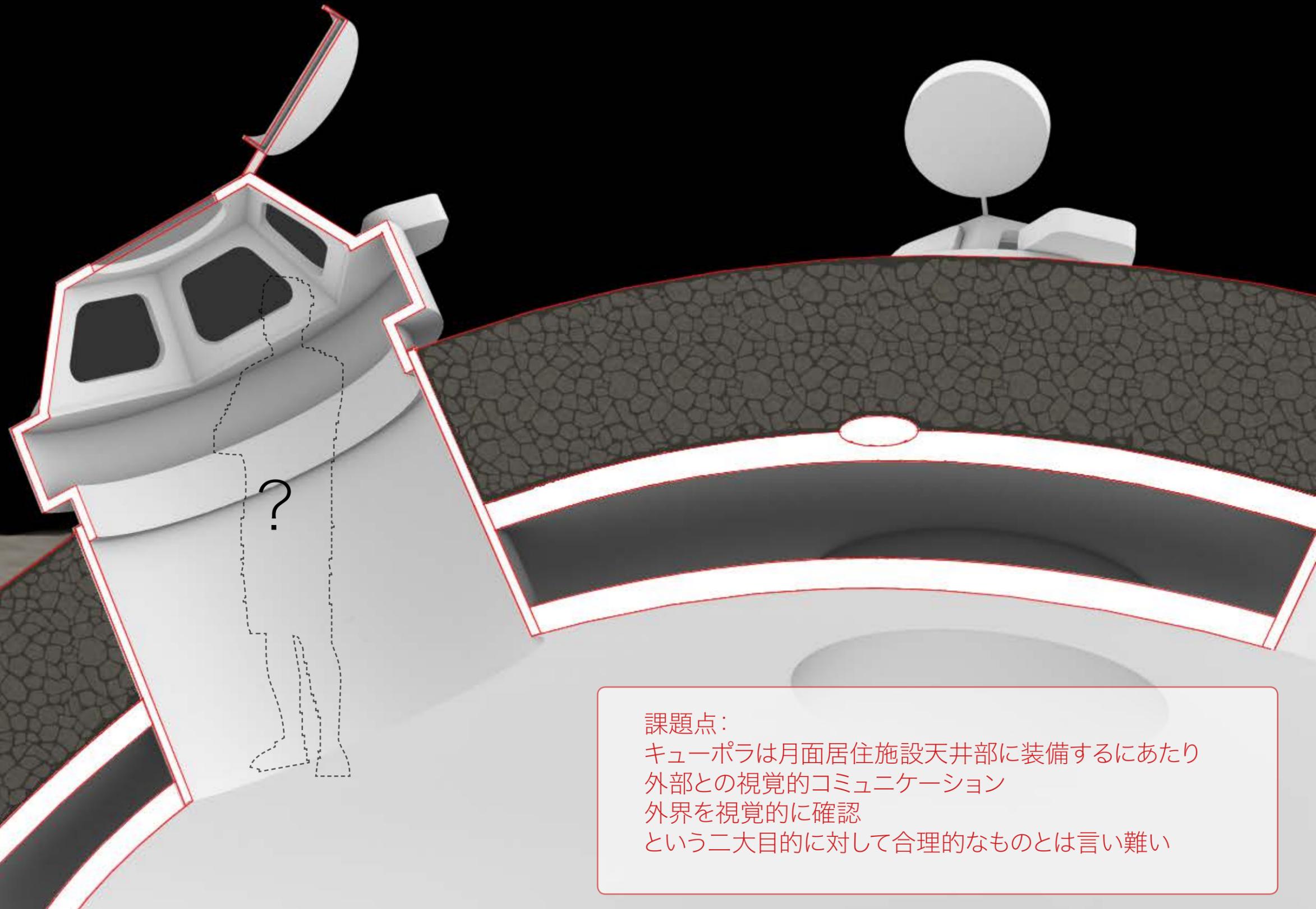
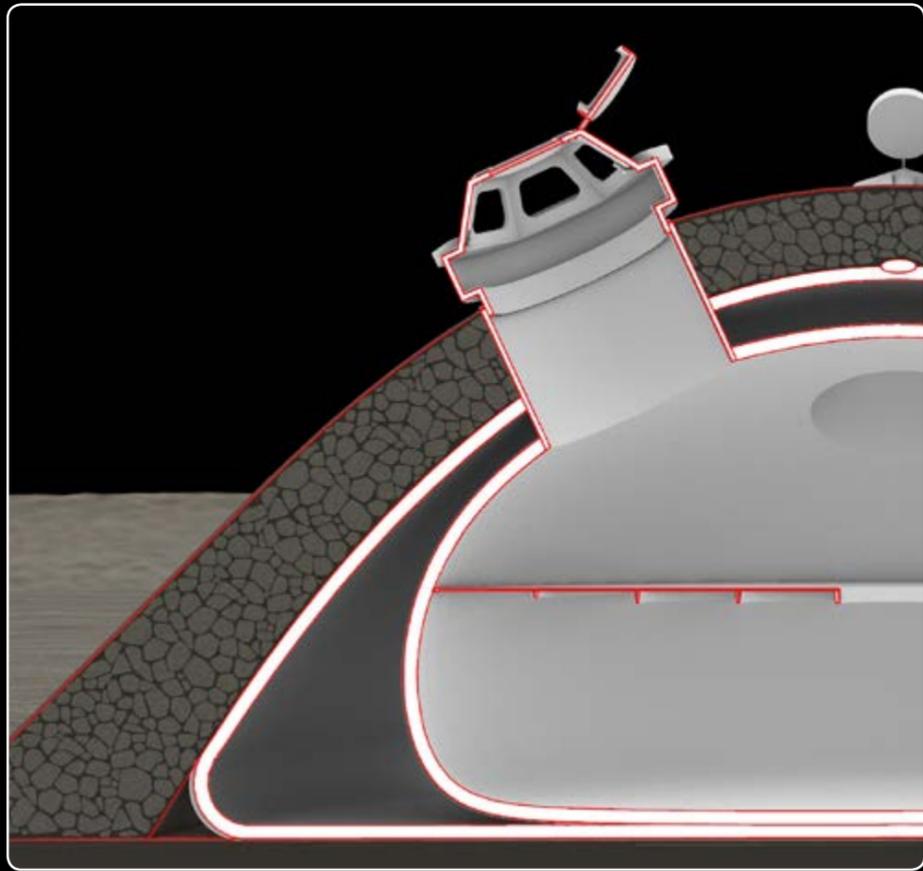
出典: NASA

直径80cm(宇宙で最大のガラス窓)

シャッター  
(デブリによる損傷、太陽の放熱による熱割れや内部温度の上昇を防ぐために通常は閉めたままにされ、使用するときのみ手動操作で開閉)

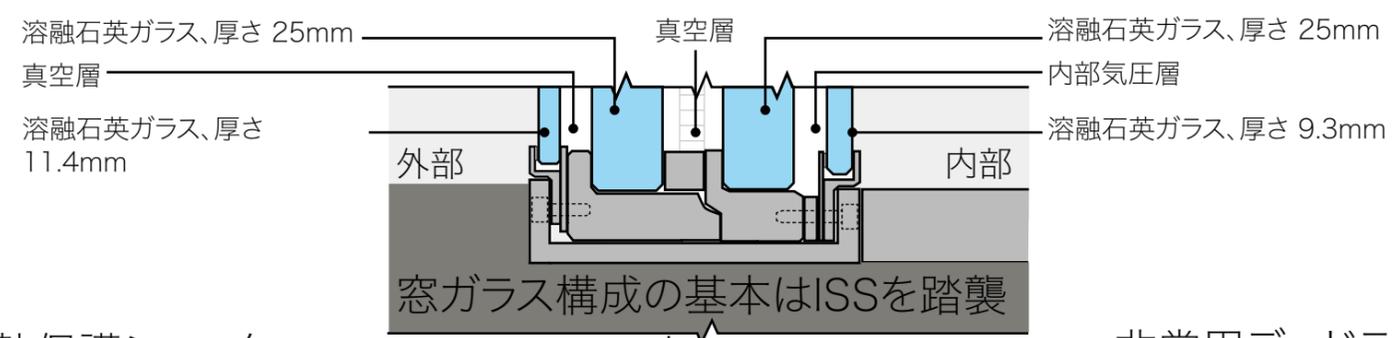
キューポラ主構造:  
アルミニウムの鍛造  
(鍛造により、高い強度と靱性を得る)





課題点：  
キューポラは月面居住施設天井部に装備するにあたり  
外部との視覚的コミュニケーション  
外界を視覚的に確認  
という二大目的に対して合理的なものとは言い難い

今後の展望：  
 月面での安全対策と機能を精査した上で  
 居住施設床レベルでの水平方向のコミュニケーション用  
 に窓の開発を行う



窓ガラス構成の基本はISSを踏襲

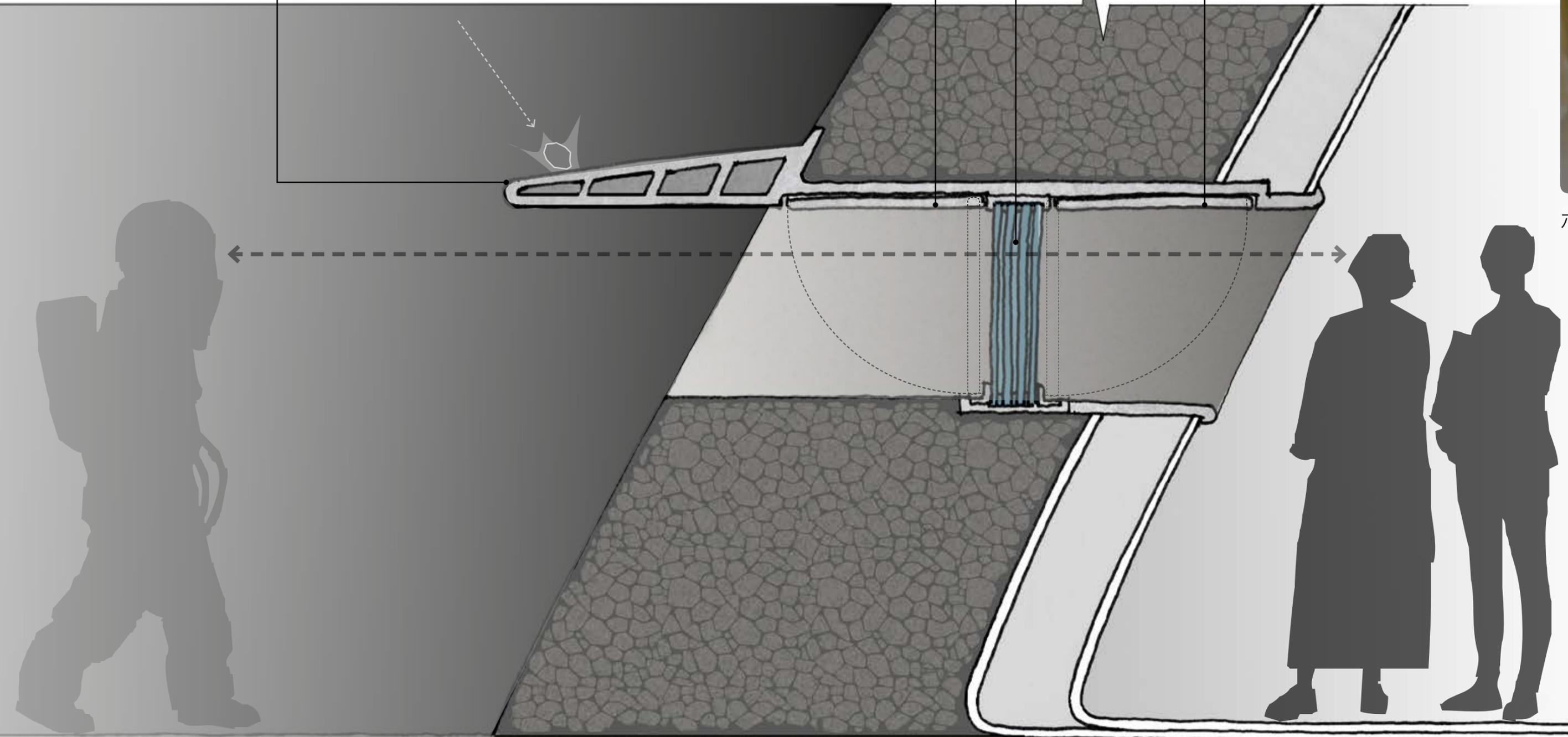
対メテオロイド防護庇

太陽フレア、太陽熱保護シャッター  
 (気密性・断熱性確保)

非常用デッドライト  
 (気密性確保)



ポートホール(船舶窓)



6-3

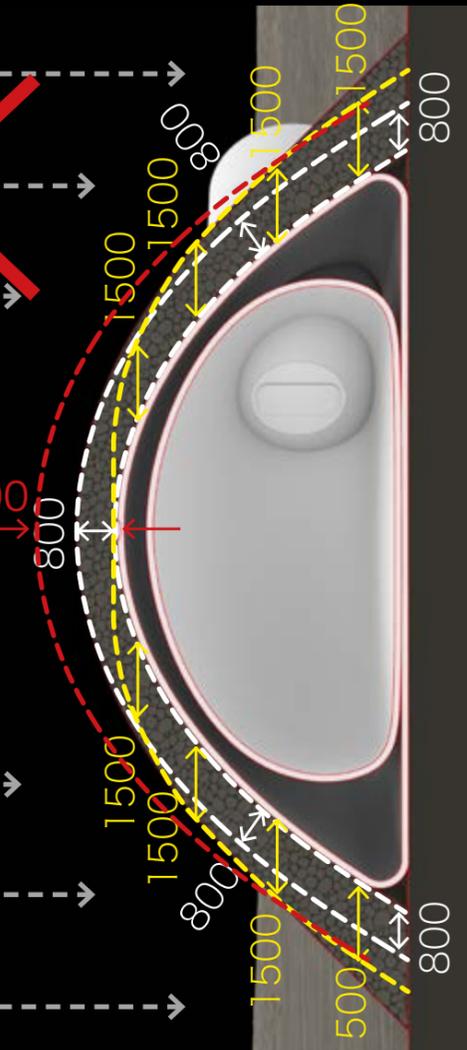
# 月面他地域への汎用性

課題点:  
 同計画の寸法をそのまま赤道地域に展開すると  
 外殻壁の厚さが太陽からの放射線に対して不足し、  
 被曝量が過多になる

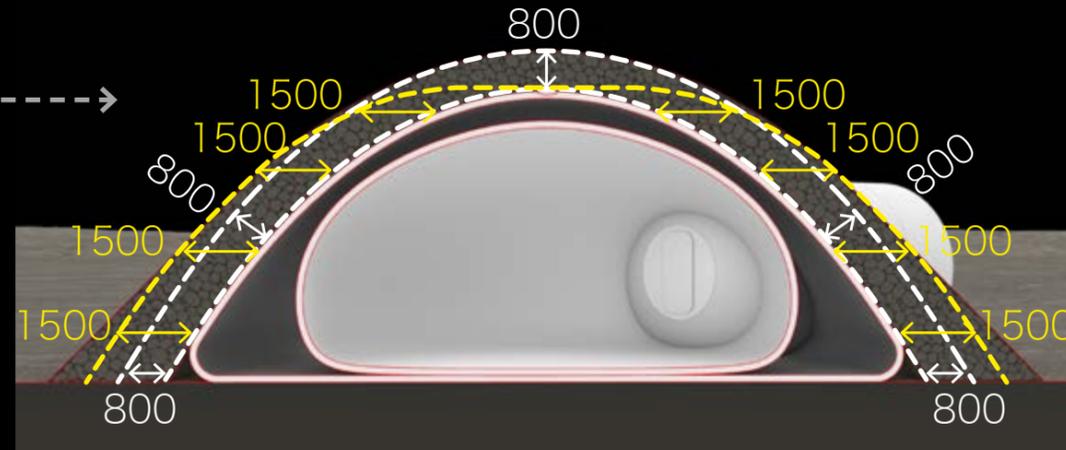


必要外殻厚さ

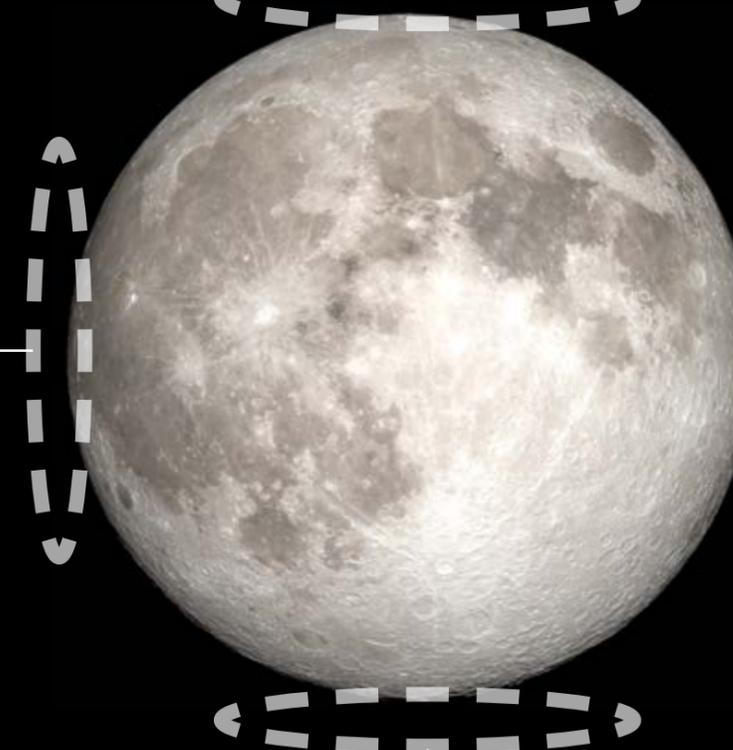
対メテオロイド: 800mm  
 対多用放射: 1500mm



赤道

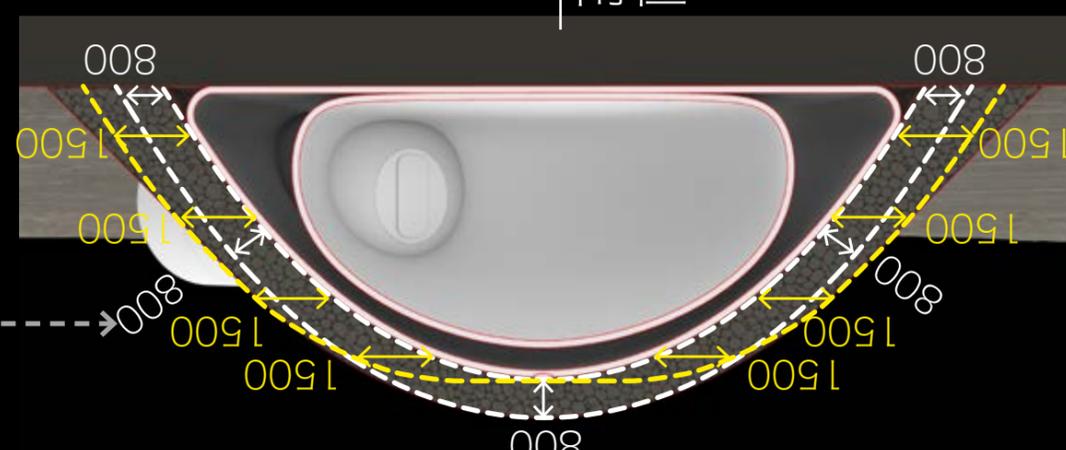


北極



南極

今後の展望:  
 外殻の構造をレゴリス太陽光焼結方式の3Dプリント  
 で建設可能なものとして見直す際に、月面全地域に  
 展開可能なシステムとして開発する。



6-4

## 空間構成

一人当たりの空間の大きさの例(単位:立法メートル)

ISS	85.17
NASAのスカイラブ	117
ロシアのミール	45
ソビエト連邦のサリュート	33.5

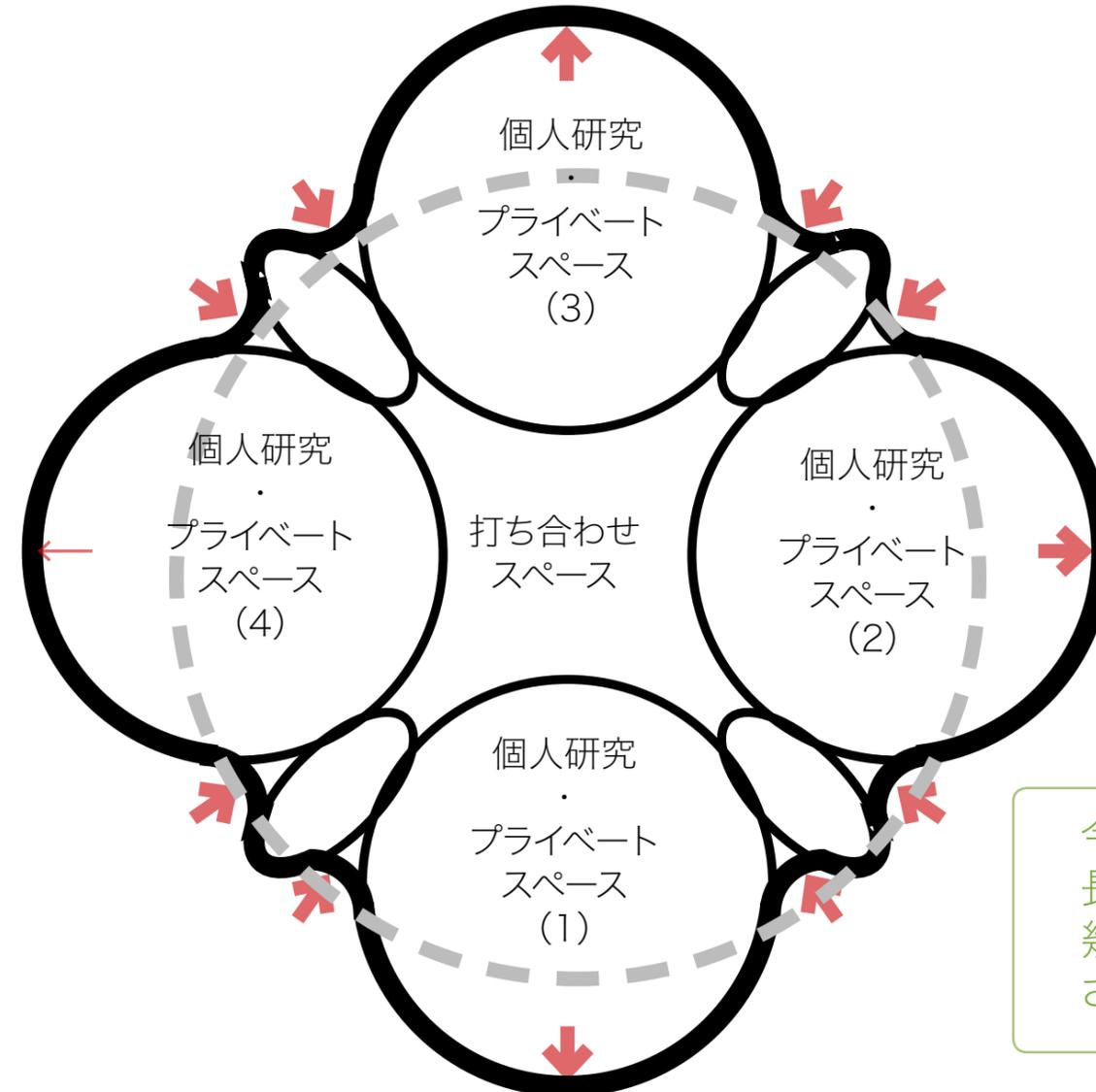
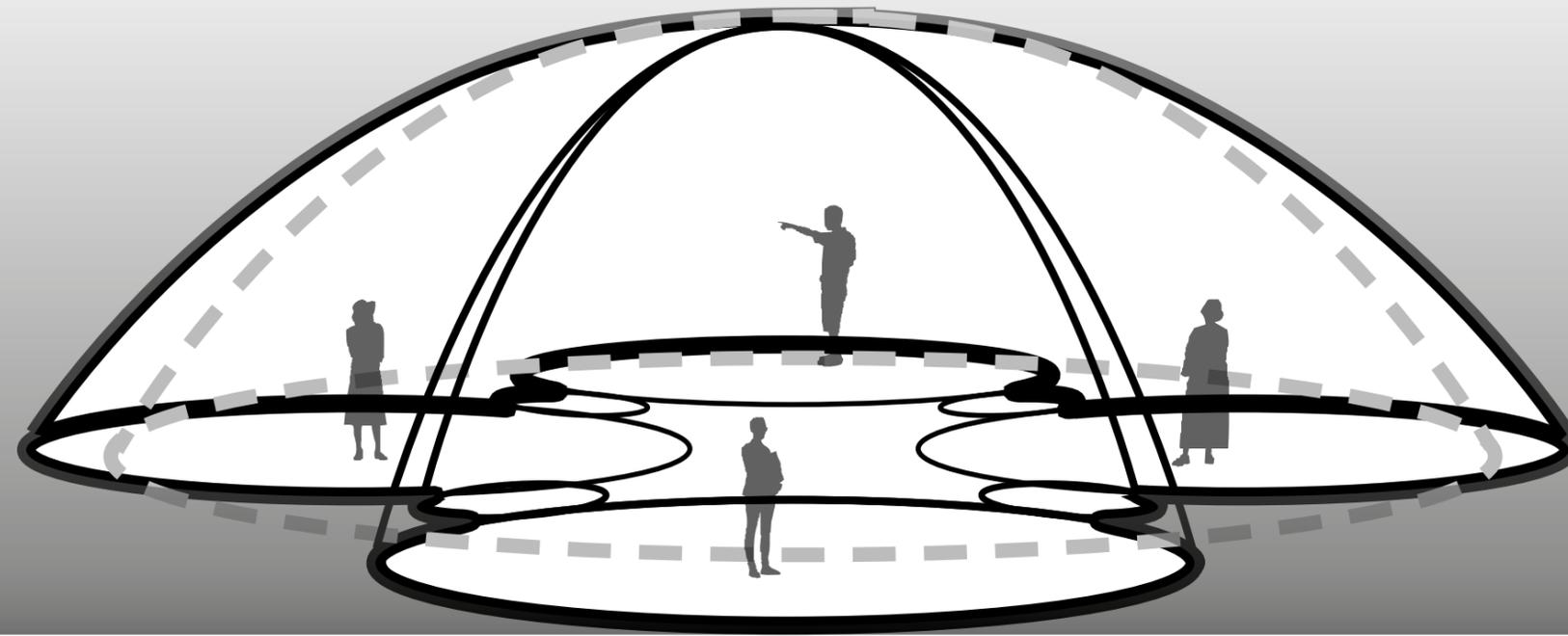
課題点:

真円という構造的に最も合理的な建物形態が4人のクルーが長期滞在する上で、最も快適な空間を作るものであるかは疑問が多い。

- ・ 合計気積:257立方メートル
- ・ 合計面積:135平方メートル (75平方メートル(1階)、60平方メートル(2階))

(技術支援モジュールを含まない)  
(天井高2m以下の部分を差し引くとこれはさらに小さくなる。)





今後の展望：  
長期滞在施設として、真円より個人スペースを作りやすい、  
幾何学形を模索し、構造システムと建設システムと最適化  
させる。

