

宇宙開発の未来共創2019

宇宙、未来から日常へ
フロンティアビジネス研究会 公開シンポジウム
パネルディスカッション1：2040年の月面生活とは
資源WG 2019活動報告

資源WG(五十音順)

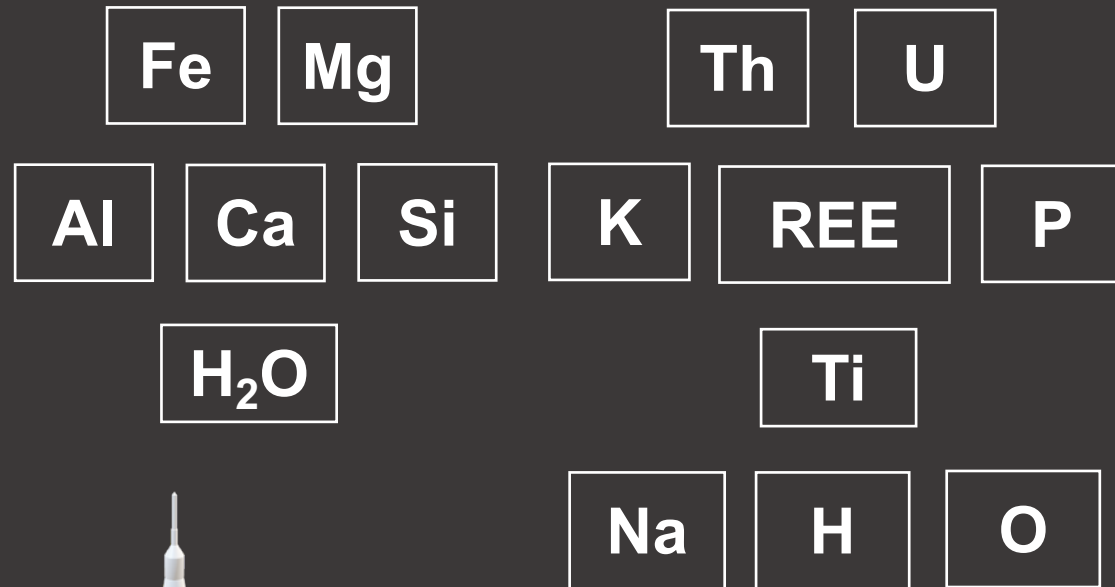
- ispace(袴田、中村、池田、大谷、佐藤、朝妻)
- OUTSENSE (高橋、堀江)
- 大成建設 (廣木、薦田)
- 大林組 (小田)
- 千代田化工(永瀬、中村、中神、小野)
- 東京大学(船瀬)
- JAMSS(峰松、今井、伊巻、石田、倉重)
- スカパーJSAT(内山、小林、田中)
- セック (松久)
- 日揮(深浦)
- 三菱重工(北坂、武田)
- 三菱総研(内田、山中)



2019年12月18日

Resources on the Lunar Surface 月面資源を利活用する

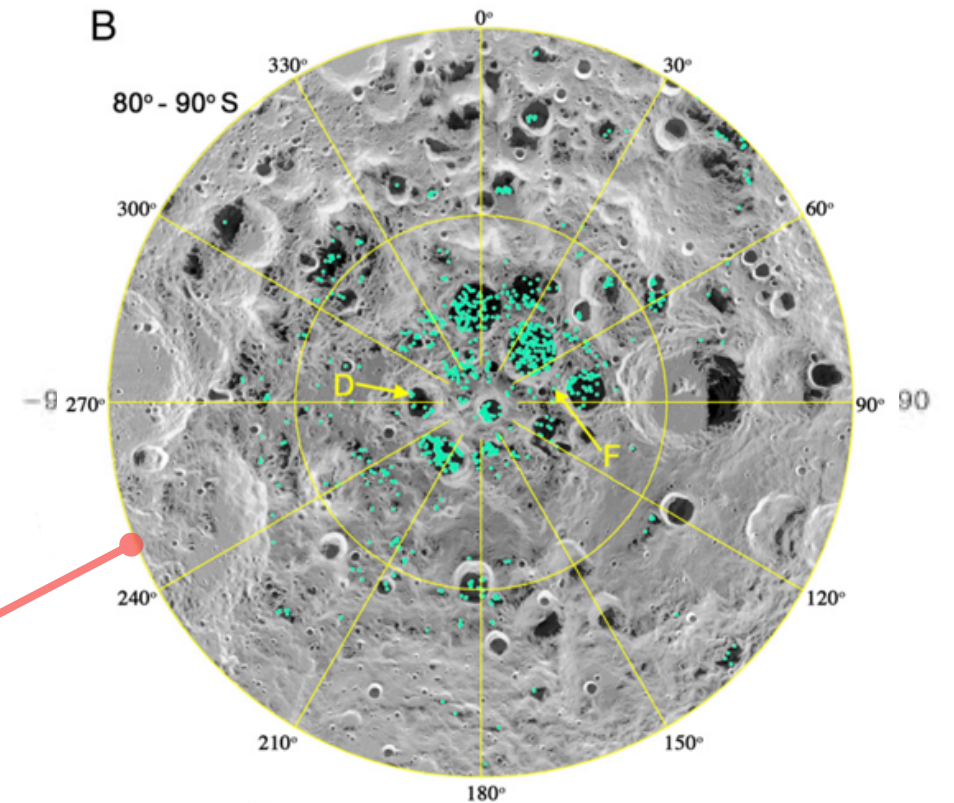
これまでの調査で、月面には、多くの鉱物の可能性が示唆されており資源WGでは、その資源をどのように利活用するかを議論してきています。



H₂O は、水電気分解により、ロケット燃料にもなり、飲料水としても活用が可能。ULA (United Launch Alliance) によるとLEO軌道で、1 kgあたり約35万円相当、月面上では、1 kgあたり、約5万円の相当と見込んでいる。

The Moon

Resource Maps



数十億トンの水が存在しうると予想

(Shuai Lia et al, 2018)

2019年資源WGの注力ポイント

水とレゴリスの資源について議論を進めつつ、具体性を上げて、必要要件を整理し、具体的なコストを検証。

(A)

水資源の精製プロセス

- ・ 飲料精製
- ・ 燃料精製

月には、どんな資源があってどう活用していくのか？

(B)

レゴリスを利用した
建設プロセス

- ・ シリケート
- ・ 希金属ほか
- ・ レゴリスブロック

レゴリスの有効利用の鍵は？

(C)

それぞれのフローを設計する
ために必要な前提の
データ獲得プロセス
ミッション&ペイロード
実施スキーム検証

どうやって今後進めていくのか？
自社ビジネスとの関わりは？

(A) 月面資源生産フロー整理

探査・採掘

生産

貯蔵

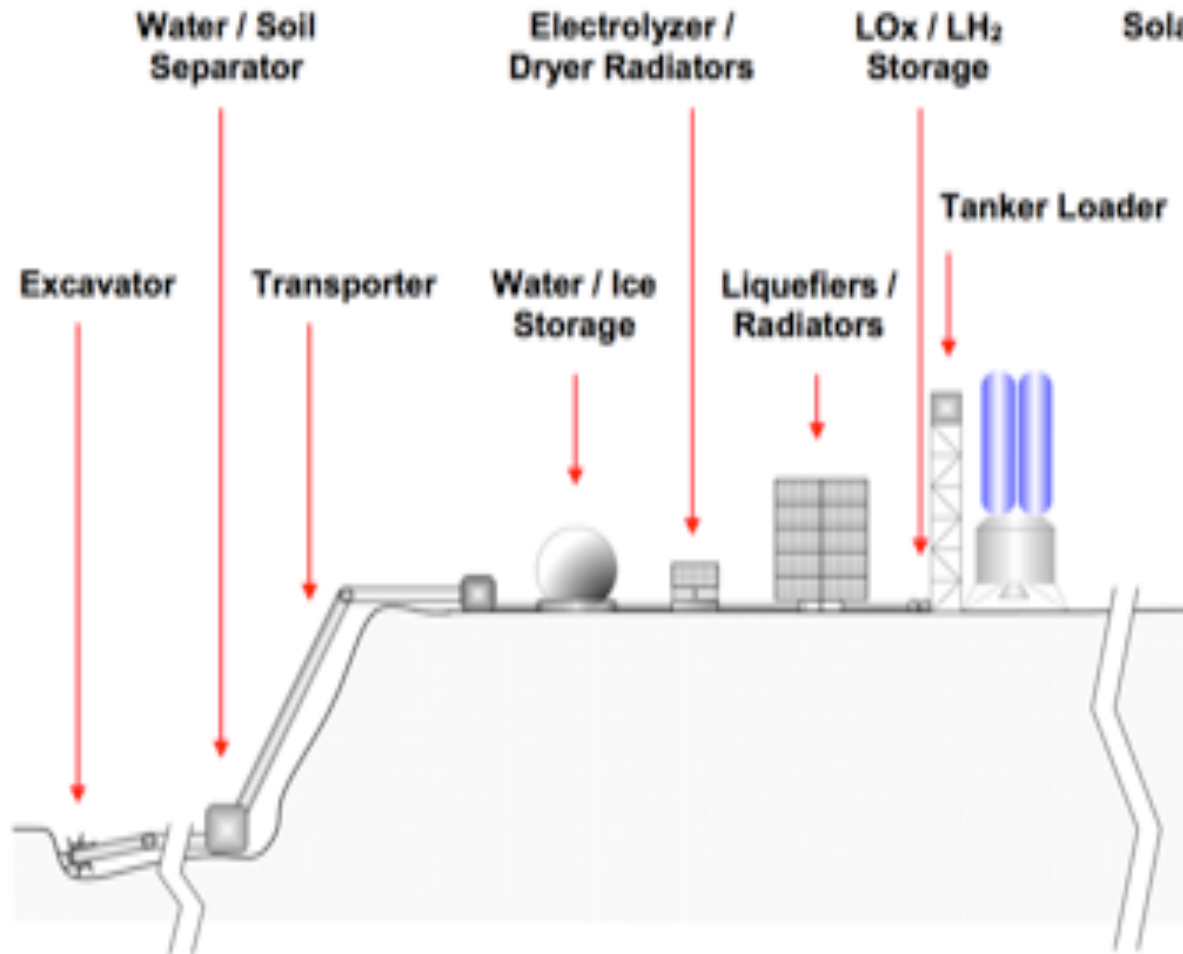
輸送・供給

利活用

モビリティ (燃料電池)

越夜

ハビテーション

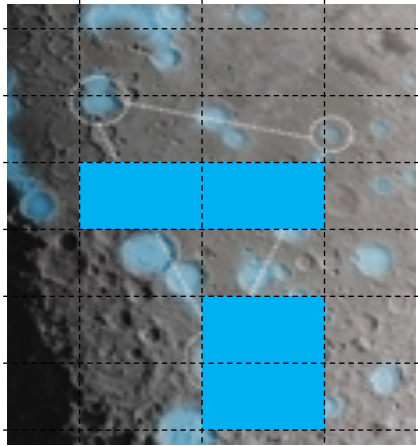


出典 清水建設様

(A) 月面資源生産バリューチェーンの課題と手法

探査・採掘

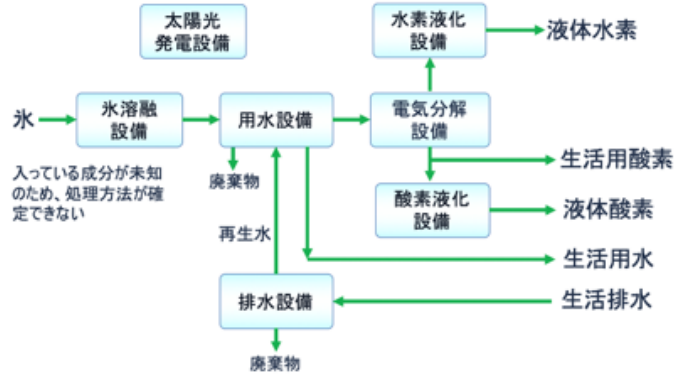
解像度（分解能） 5Km



<課題>

- スペクトル観測機分解能度UP
- データ入手プロセス
- 氷の存在範囲と着陸船の精度UP

生産



<課題>

- 電力消費が大きい
→5-6kWh: 1m³
- 1/6重力での電解泡の電極からの分離
- プラント製造コストに対しての資金回収スケジュール
- 光触媒の場合は、変換効率の低さ（現状は1%程度。地上の場合は、10%は必要）

貯蔵

<課題>

- ① 高圧で圧縮
- ② 低温で液化
- ③ ~~金属などに吸蔵~~
吸着
- ④ ~~他の物質に変換~~
- ⑤ ~~有機ハイドライド~~
適切な触媒反応

シンプルな手法が必要

輸送・供給

<課題>

- 高密度維持。
- インターフェースなど仕様の整理。
- 規格の整理。
- 使用用途（有人か無人か）の設定

利活用

モビリティ（燃料電池）

昼間の太陽光発電等で水素・酸素を生成（蓄電）し、夜間に燃料電池で発電・加温する。実証が課題。

越夜

<課題>

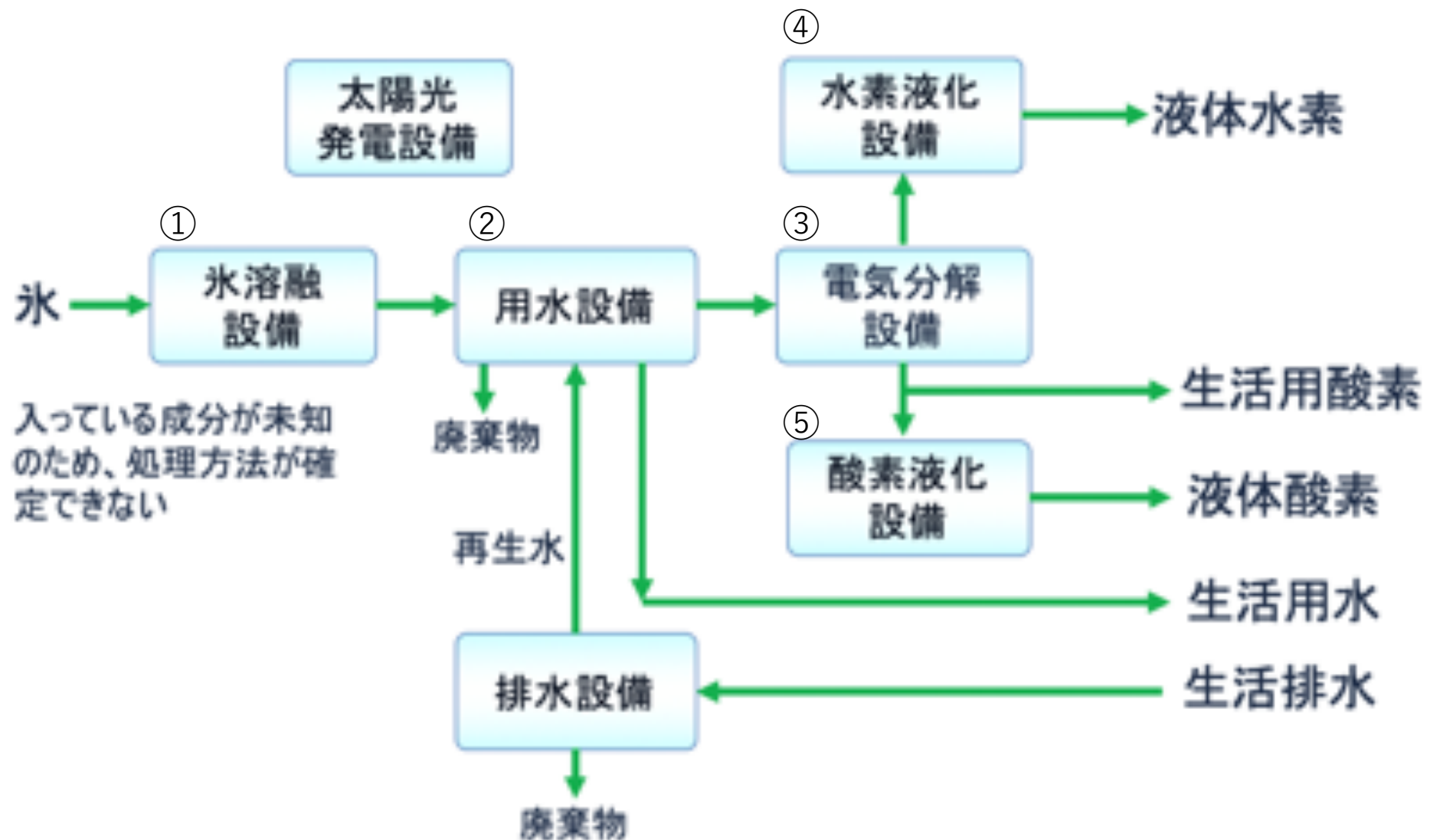
原子力電池を使用せずに、越夜をする手法

新たな採掘手法

Thermal Mining

(A)水素酸素生成プラント構成

生産



(A)水素酸素生成プラント構成設備概要

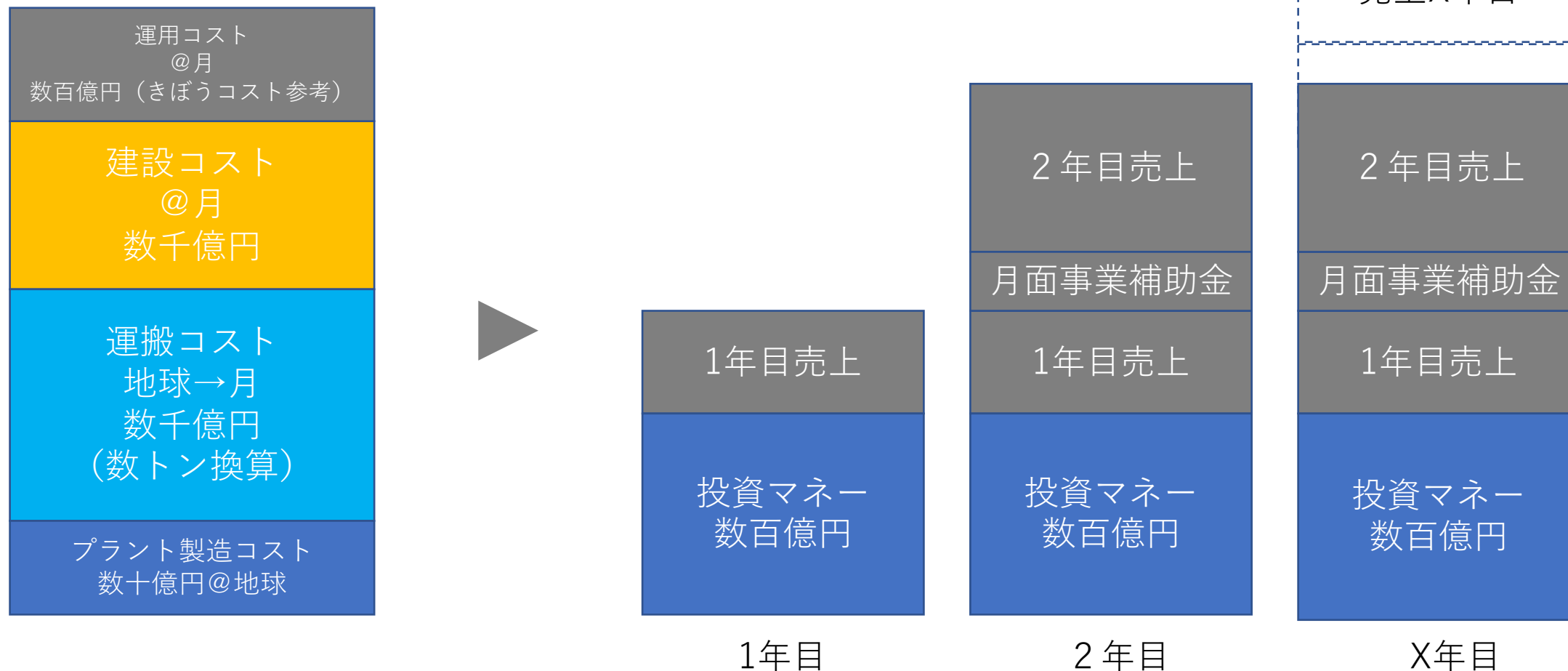
生産

①ー⑤トータルは、地上設備の費用の算出中。テストモデルケースの地上製作コストとして、数十億程度付近で検討中。

	設備名	概要	処理能力	電力消費量 (KWh/日)	地上設備 設置面積	備考
①	氷溶融 設備	砂礫混じりの氷を電熱融解し比重分離する。	100m ³ /年H ₂ O 100日/年稼動	96KWh/日 (約4KW×24Hr)	3 m × 3 m	氷潜熱337kJ/kg、砂礫の昇温電力は除外
②	用水（水処理）設備	上記融解水をMF濾過・貯留する。	100m ³ /年H ₂ O 100日/年稼動	TBD 120KWh/日 (5KW×24Hr)	3 m × 3 m	
③	電気分解 設備	上記水を電気分解し酸素・水素を生成する。	100m ³ /年H ₂ O 100日/年稼動	6200KWh/日		装置性能 5kWh/Nm ³ H ₂ とする
④	水素液化 設備	TBD 生成水素を液化し貯留する。	11ton/年H ₂ 100日/年稼動			
⑤	酸素液化 設備	生成酸素を液化し貯留する。	89ton/年O ₂ 100日/年稼動			

(A)水素資源テストプラントに関するコスト考察

数千億円規模のコスト



- ・ 運用コスト、地上でかかるコストの算出 = 数千億円
- ・ 需要の確認と、コスト回収までの期間設定 X=5年
- ・ 耐用年数条件の設定、補助金、最低投資マネー額の設定

数十万円/Kgの燃料売価
年間数百億円の売上必須

(B)レゴリス資源フロー

採掘

生産

輸送

建設

維持

<手法>

露天掘り
地下掘り
In Situ Leach(原位置抽出法)

<課題>

大型重機の輸送方法
具体的な採掘方法検証
真空で稼働する重機

<手法>

・無加工レゴリスによる放射線遮蔽
・レゴリスを焼結
・流し込み、再度結晶化させて玄武岩を形作る熔融鑄造玄武岩
・鉄、アルミニウム、マグネシウム、カルシウム、チタニウムといった金属の生産。

<懸念点>

・大量のエネルギーを利用するために原子力発電施設の有無の確認が必要。
・安全確保のために遠い場所に工場を作る必要があるか。

<レゴリス加工せず>

①:砂かぶせる案
②:地面に埋める案
③:砂を袋に詰めて建物守る案

<懸念点>放射線を防ぎずらい(隙間がある)

<レゴリス加工>

① 3Dプリンター
② ブロックとして利用

<手法>

破壊要因からの修繕方法

・コンクリート:クラックにモルタルを塗る
・レンガ・ブロック:つなぎ目の接着部分

<点検>

ロボットでの破損個所の点検が必要

(B)事前実証を見据えた、レゴリス資源利用方針の議論

レゴリスの幅が1 m程度だと、放射線を防ぐことができず、むしろ逆効果となる見解があることから、改めて初期段階の事前実証手法を検討

月面上で建設

VS

縦穴で建設

どうやって掘るのか？集めるのか？

→採掘手法、採掘する機器のシステム、地盤調査を検証。

(B) レゴリスの利用について

月レゴリスの活用は地産地消の観点から注目されている。
既存研究では下記の用途が想定。

- 放射線の遮蔽材[1]
 - そのまま
 - コンクリート
 - ジェル
- 建設資材[2]
 - コンクリート
 - 焼結材、ジオポリマー
- 舗装材[3]
 - コンクリート
- 水の原料[4]
 - レゴリスの内、イルメナイトリッチのもの
- 蓄熱材[5]
 - レゴリスの低熱伝導率を利用

月環境における主な放射線 [6]

- 1次成分
 - 銀河宇宙線
 - 約98%は陽子や重粒子、残りの約2%が電子と陽電子
 - 高エネルギー成分を持つ
 - 太陽粒子線
 - 陽子/電子の粒子
 - 太陽イベント（フレア）発生時に放射線量が膨大となり月環境が一変してしまう可能性
- **2次成分**
 - **2次中性子及び γ 線**
 - **銀河宇宙線がレゴリスの特に重金属成分を通過する際に生成**
 - **無視できない線量であると言われている**
 - **遮蔽が難しい**

(B)レゴリス/遮蔽材料の利用について

遮蔽材料の第一候補は、アルミニウム (ISS参考値)

レゴリスでの遮蔽に必要な厚さは、1.6m 程度という文献と、数メートルという見解が存在。

<金属>

- アルミニウム 23g/cm²程度 (「きぼう」平均船厚)
→より原子番号の低い材料の採用も効果が期待でき、低エネルギー成分の遮蔽が期待できる。太陽フレア発生時のエネルギースペクトルは比較的低領域で、遮蔽に寄与が期待できる。

<H、電荷量に富む材料>

陽子や重核の低減、中性子の低減・減速が期待できる

- ポリエチレン (PE) Hの比率 14%、電荷量0.57
- 液体水素 (LH2)
- 水
- **レゴリス**

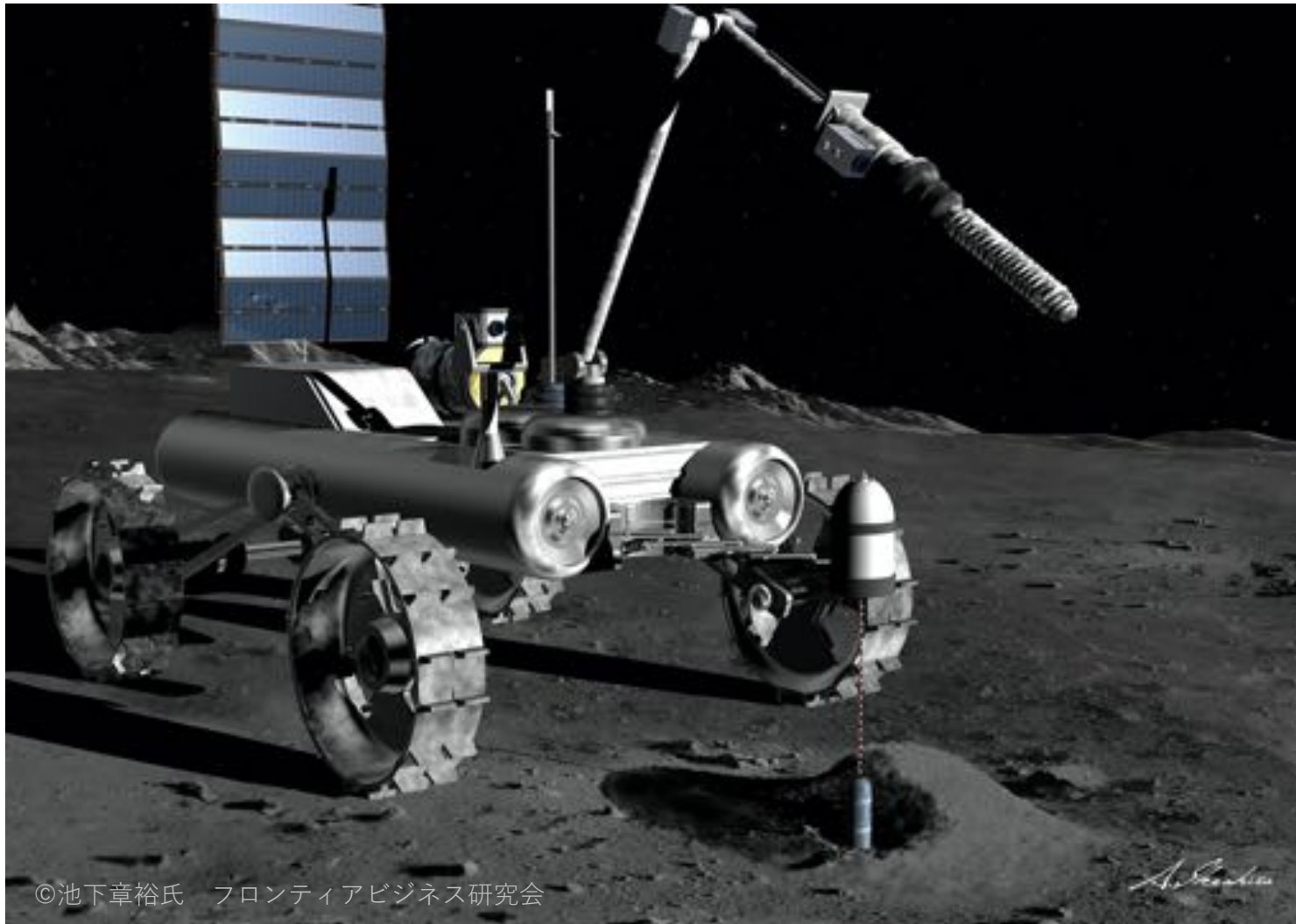
→**厚みをかせぐことで遮蔽が期待できるが、2次中性子線対策が必要**

より利用しやすくするためには…

- 重金属成分を含まないレゴリス
- H、電荷量を多く含む組成
- 密度が高いもの

- 月面において、約500g/cm²使ってシェルターを作ることができれば、密度を3.11g/cm³として地下1.6m程度の深さが必要。(0.9g/cm³説もあり)
- 中性子線だけ考えると、年間50mSvをクリアするためには、約300g/cm²が必要。

(B)事前ミッション具体例：放射線カウンターの月面上利用イメージ



①月面表面の放射線測定
=ランダー／ローバーで測定

②レゴリスを遮蔽材と想定
=地中の放射線測定1-数メートル

③アルミ、水、ポリエチレン
等を遮蔽材として使用
=配合配分データ測定

月面ミッション化するために、ミッションデータの共有コンソーシアムの枠組みを検討、ローデータとソリューションデータの販売をROIとして賛同してくださるか各社へお伺い。

(C)放射線カウンターペイロードに関するROIの考え方

月面放射線データについては、今後、月面用宇宙服の開発、居住エリアの建設要件に必要。

そのデータの収集について、先行投資金額に応じたビジネスモデルを検討。

数十億円規模のコスト



- ・ 製造コスト、運搬コストの算出 = 数億円
- ・ 需要の確認と、コスト回収の参加社数設定 X=10社 (例)
- ・ 補助金目処、最低先行投資マネー額の設定

投資額に応じたデータ配布
投資額によって配布時期が変動

(C)ロードマップの同時進行による時間短縮化

ロードマップ→細分化しテクノロジーロードマップ化→**同時進行プラットフォームの検証**

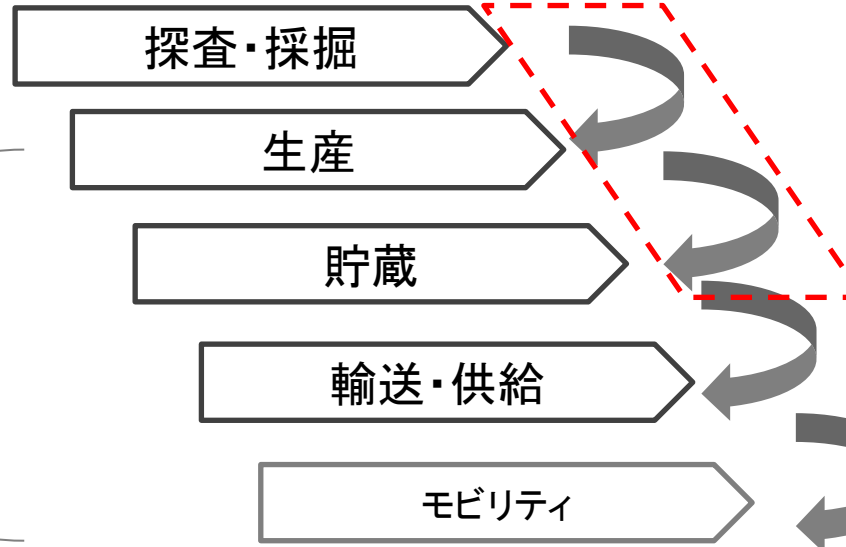
2021

2030



2021

2025



顧客の顧客の発見を
バリューチェーン上で達成すると、
投資フェーズに入りやすい。

ミニチュアで月面実証もしくは、
地上試験検証をスタート。

参考事例

2007



スマートフォン

2020

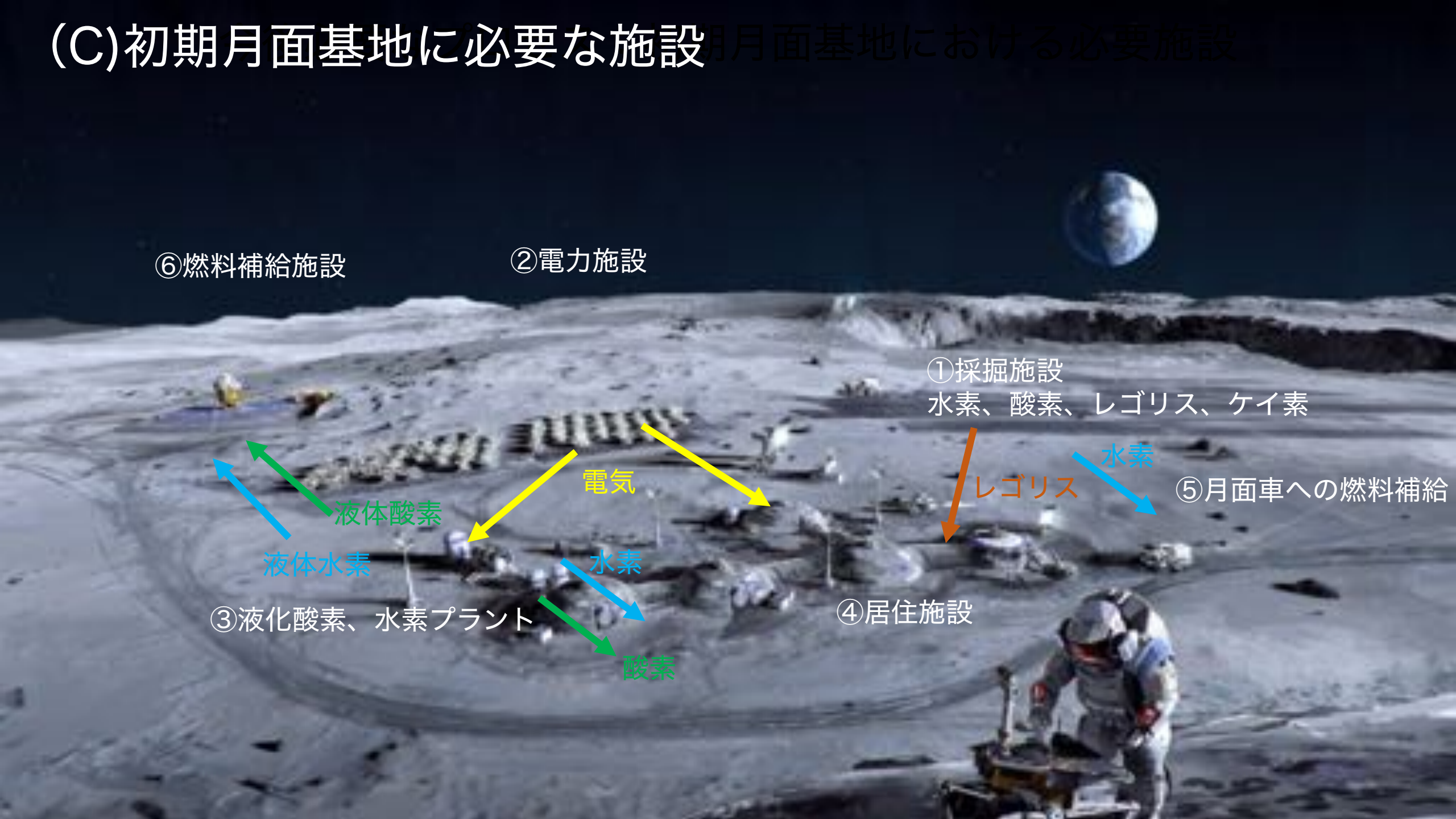
音楽アプリ

カメラアプリ

地図アプリ

GPS利用アプリ

(C) 初期月面基地に必要な施設



⑥ 燃料補給施設

② 電力施設

① 採掘施設

水素、酸素、レゴリス、ケイ素

液体酸素

液体水素

③ 液化酸素、水素プラント

電気

水素

酸素

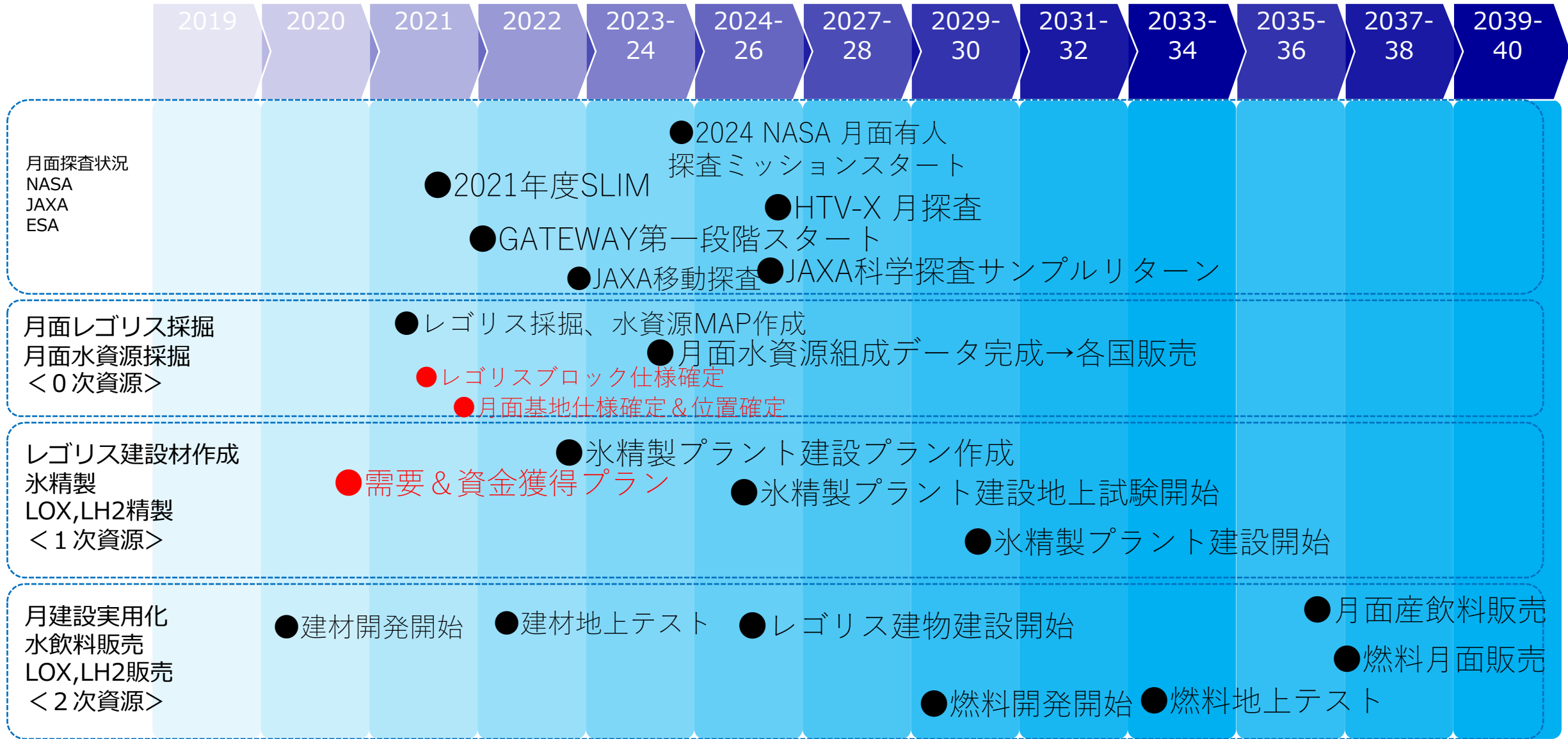
④ 居住施設

レゴリス

水素

⑤ 月面車への燃料補給

(C)月面資源ロードマップ



2019年資源WGのまとめ

月には、どんな資源があっ
てどう活用していくのか？

(A)

水資源の精製プロセス

- ・ 飲料精製
- ・ 燃料精製



水素と酸素の生成が鍵で
数千億規模の施設が必要。
参入障壁をどう下げるか。

レゴリスの有効利用の鍵は？

(B)

レゴリスを利用した
建設プロセス

- ・ シリケート
- ・ 希金属ほか
- ・ レゴリスブロック



放射線の計測とデータが鍵。
ペイロードとミッションを
どうするか。

どうやって今後進めていくのか？
自社ビジネスとの関わりは？

(C)

それぞれのフローを設計す
るために必要な前提の
データ獲得プロセス
ミッション&ペイロード
実施スキーム検証



放射線の解決策の販売で投資
対効果をデザインして、リ
ターンを描く。

参考/引用文献

- [1]永松愛子, 俵裕子, 佐藤達彦, 安田仲宏, 小平聡, 26506032 研究成果報告書 – KAKEN, 2016
<https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PROJECT-26506032/26506032seika.pdf>
- [2] http://www.ihub-tansa.jaxa.jp/files/event_20160329_05.pdf 他
- [3] <http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00035/2001/56-5/56-5-0108.pdf>
- [4] <http://www.chem-eng.kyushu-u.ac.jp/lab5/Pages/review/lunar.html>
- [5] <https://www.newglass.jp/mag/TITL/maghtml/55-pdf/+55-p007.pdf>
- [6] 早津佳那子, 博士論文, 2012年2月
<https://core.ac.uk/download/pdf/46886634.pdf>
- [7] <https://www.lpi.usra.edu/meetings/leag2010/presentations/WedAM/spence.pdf> 他
- [8] <https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/bitstream/a-is/599460/1/AA1630038004.pdf>
- [9] Maurice, S., Feldman, W. C., Lawrence, D. J., Elphic, R. C., Gasnault, O., d'Uston, C., Genetay, I., Lucey, P. G., 2000, High-energy neutrons from the Moon, J. Geophys. Res., 105, E8, 20365-20375.
- [10] 国際放射線防護委員会2007年勧告 (ICRP Publication103) の「国際宇宙ステーション搭乗宇宙飛行士 放射線被ばく管理規程」への取入れに係る検討結果報告書, 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 有人サポート委員会 宇宙放射線被ばく管理分科会, 2013年2月
- [11] Nagamatsu, A. et al., Area radiation monitoring on ISS Increments 17 to 22 using PADLES in the Japanese Experiment Module Kibo, Radiat. Meas.59, 84-93, 2013.

月環境における放射線量の評価 (早津 佳那子)

: <https://core.ac.uk/download/pdf/46886634.pdf>

月環境における放射線量の評価 (村川恭介)

: http://www.spaceref.co.jp/homepage/colum/images/lunar_resource_utilization.pdf

月にいると宇宙線がたくさん降ってきそうですが、どのくらいの量になるのでしょうか？ (寺園先生)

: <https://moonstation.jp/faq-items/f613>

物質との反応について考えよう (高エネルギー加速器研究機構 多田 将)

: <http://radiation.shotada.com/chapter/04/>