

2021/09/08

月惑星に社会を作るための勉強会

月社会構築リファレンスモデル検討

中間報告

動機と問題意識

- Moon Villageや月での社会構築とか言っても、多くの議論では現実と非現実が錯綜している。ぼんやりしたまま話を続けるのも悪くはないが、それぞれイメージがバラバラでは、きれいな絵は描けても、議論が進んでいく感じがしない。
- 国家のプログラムの話をするのか、ビジネスの議論をするのか、夢だけを語っておればよいのかさえもはっきりしない、という批判もある。
- 議論の土俵をそろえ、物事を定量化し、月での社会構築をどのようにしたら実行できるのか、何が課題で何を解決すれば現実のことになるのかをあぶり出しておくことは有意義であろう。
- 合意可能な仮定をおいて、前提条件を整え、物事を定量化した上で、技術の問題もそれ以外の問題についても、何が課題なのかを抽出できるようにしてみてもどうか？
- これをリファレンスモデルと呼ぶことにして、このモデルを作ってみたら、議論が具体化し、課題の抽出や実行の方法論の議論などが具体的に出来るだろう。

リファレンスモデル考察の仮定・試案

何人の規模の社会を想定？ **1000人**

. これで施設, インフラ, サプライチェーンなどの規模を定量化してみる

滞在している人は？ 住人, 移住者, 仕事, 訪問者 以下に比率を考える

A. 1000人のワーカー (30代-50代) 滞在1年?

B. **ワーカーとその家族 (ワーカー, 家族 (配偶者, 子供, 親?) 数年の赴任?**

C. 定常的社会 = 移民 年齢構成 = 10人 x 100世代 (0-100歳) 持続的人口ピラミッド

居住・生活の質は？ アポロ級, ISS級, ホテルルーム級, アpartment, マンション, 一軒家 ?

10000人のビジター (=地球からの観光客)

. 毎日30人 * 10日 = 300人の滞在施設, 輸送システムとセットで考える

何を生産し価値を生み出すか?

. . . 人類の活動範囲の拡大自身に価値? 投資・維持経費に見合うかの観点?

. . . ビジネスと事業モデル, 年間売り上げ・支出, 需要の予測 (地球での需要, 宇宙活動の全体 . . .)

* e.g. まずは, 資源ビジネスと観光・旅行を考える?

. 事業規模と必要人員, 観光・旅行ビジネスの訪問客数とサービス提供人員などを定量化

地球から離れた自立的社会運営

. 民主的, 国際的運営, 民間事業のために普遍的に必要な運営ルール

. 現在の世界の地政学的・経済的対立状況を持ち込まない前提ではどうか?

. 地球への依存の程度 物質的, 経済的, 政治的, 社会的?

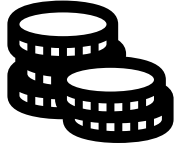
社会を運営するためのルールとシステム 課税, 行政, 公共サービス (病院・学校・警察・消防)

以上をもとに人文科学・人類学的側面 新しい文化, 新しい人類, 子孫, 教育 などについて考える.

分科会とそれぞれの視点



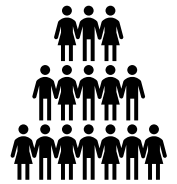
- **アーキテクチャ分科会**：社会建設の技術的な視点
月で人類が持続的な社会を構築するために必要な施設や設備や輸送の仕掛けを具体化し定量化可能な限り月の資源を使って社会運営のシステムを構築するにはどうすればよいか？
必要な資源や資金はどれほどか？



- **ビジネス分科会**：ビジネスの視点
どう言うビジネスモデルがあり得るのか？技術的・経済的な意味で実行可能か？
社会を作るのに必要な投資に見合うだけのリターンを得るにはどのような状態を作ればよいか？
税金で国の仕事として実行出来る部分と民間投資のビジネスの棲み分けはどうするか？



- **社会科学分科会**：社会科学・法制度的視点
持続的な社会を運営し統治する体系とは？社会の活動や経済活動を司るルールはどうするのか？
社会を運営し、構成員の行動を律するための規範やルールとはどのようなものだろうか？
月の社会と地球との政治的、経済的関係はどのようなものだろうか？安全保障との関係はどうか？



- **人文科学分科会**：人文科学的・文化人類学的視点
地球を離れて人類が社会を作る時に考えておくことは何か？
宇宙飛行士や職能集団としてのワーカーの集団という概念を超えて、家族、移民、世代を継ぐ、子孫を作るなどと言うところまでイメージすると、どういうことを考えておくべきか？



- **ライフ分科会**：ライフサイエンスの視点
長期間人間が月面上で生活する、さらには移住する、子孫を作る、世代を重ねる・・・のに必要な医療、健康、生物学的考察。
環境への適合=進化と言う概念まで考える？

アーキテクチャ分科会におけるRM検討状況

小林弘明, 坂本勇樹 (宇宙研)

鵜山尚大, 福島渚, 田崎智之 (清水建設)

北宅善昭 (大阪府立大学)

齋藤晃央, 岡本有生, 笹山容資 (I A)

森田健 (高砂塾学)

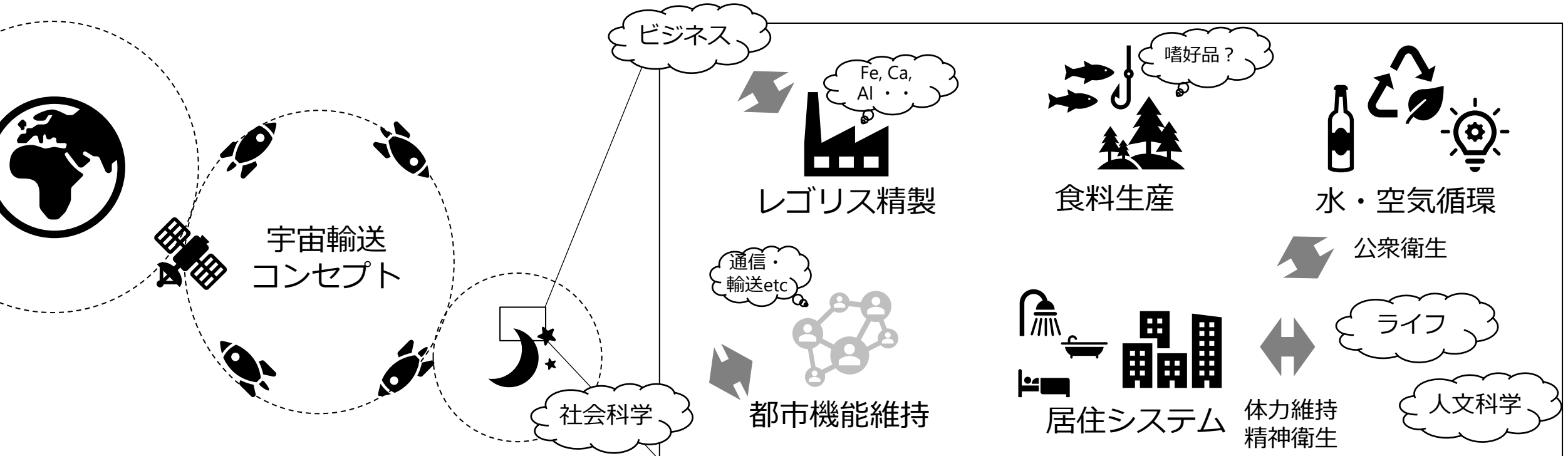
後藤琢也 (同社大学)

宮嶋宏行 (国際医療福祉大学)

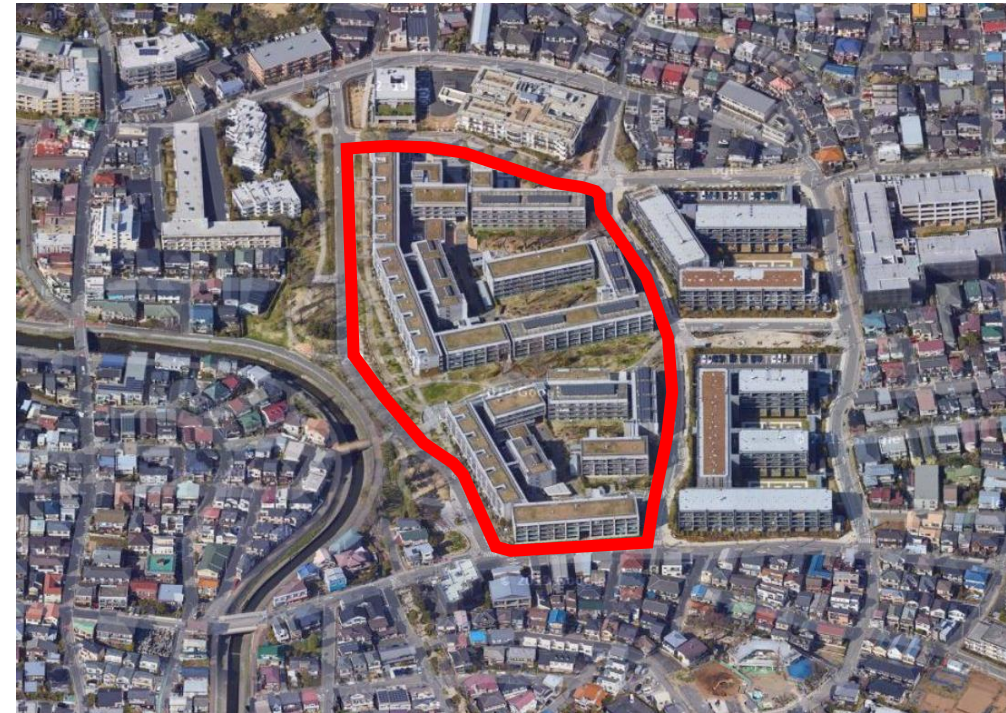
岩崎祥大 (Yspace)

アーキテクチャグループの検討概要

- **都市機能と構成人数**：想定される機能・産業に対して現在の日本国内データを用いて維持に必要な人数を検討
- **居住システム**：人間が快適に暮らせる設備・システムを検討。必要となる備品についても検討
- **エネルギー・液ガス製造**：月面での水資源を電気分解・液化した際の液水・液酸価格を評価。合わせて生活に必須となる空気の製造価格等を検討
- **食料生産**：サツマイモ畑の検討の他，動物の共存についても検討。電力量なども検討。
- **レゴリス精製**：レゴリスから鉄などの無機物を生成するためのエネルギー等を検討
- **地球一月間輸送**：定期運航の絵姿を検討。宇宙機価格・燃料価格をパラメータに経路やISRUの優位性を検討



- 検討趣旨
 - アーキテクチャ分科会の議論で挙げられた想定される月面都市機能・産業について独自に整理
 - 主に日本国内の統計データ等を用いて、各機能・産業の維持に必要な従業者数を大まかに検討・算定
 - 現時点では、具体的な月面都市像に基づかない概算
- 居住区のサイズ
 - 人口：1000人
 - 人口密度：DID（人口集中地区）の下限值と同じ40人/haと想定
※ DIDは「都市的地域」を定めたもの。
 - 月面都市は低層建物がならぶ「低密度な都市的地域」と想定。
 - 居住区面積： $1000/40 = 25\text{ha}$ （ディズニーランドの半分）
 - 500m四方、約400戸の団地程度
- 居住区の詳細は後述



436戸の団地

持続的有人活動のためのインフラの機能・産業と必要人数の検討

想定される産業とそれぞれに必要な人数

主に日本国内のデータに基づき推算

	産業	概要	人数(想定)
循環インフラ系	農業プラント&自然環境エリア管理	エリアの環境維持、農作物の栽培、食品加工、循環促進設備の運用管理	50名
	水・空気成分循環管理	都市の大気・水循環状況の監視、プラント・システムの管理運用	60名
	資源循環管理	廃棄資源の回収、リサイクルプラント・資源循環システムの管理運用	30名
	電力管理	発電所・送電システム・燃料電池の運用管理	10名
都市インフラ系	都市・プラント建設	都市・プラントの建設、建設資材・設備の調達、建設用機材の維持管理	80名~
	土木インフラ、建築物維持管理	道路・インフラ共同溝・居住スペース等建物の維持管理	
	通信インフラ管理	通信基地・設備等の運用管理	10名
資源・製造系	資源採掘・精製	月面での資源採掘、運搬、精製プラントの運用管理	90名~
	宇宙機器等工業製品製造	工場ライン・リサイクルプラントの運用管理	60名~
	日用品製造	工場ラインの運用管理	30名~

	産業	概要	人数(想定)
運輸系	スペースポート運用	スペースポートの運用、管制、検疫、持込/持出物検査	80名
	地球・月間運輸サービス	製造品・商品・郵便物の地球・月間運搬、宇宙機の維持管理	50人
	都市内モビリティサービス	シェアモビリティの運用管理	10名
	都市内物流サービス	製造品・商品・郵便物の都市内運搬、運搬用モビリティの管理	25名
生活サービス系	小売サービス	居住者・滞在者への販売、在庫の仕入・管理	
	病院・トレーニングジム	居住者・滞在者の健康管理、診察、治療、医療機器・マシンの維持管理	80名~
	行政サービス	コミュニティ運営、中央監視(消防、警察)	15名
その他	観光	ホテル運営、ツアーガイド・インストラクター、アクティビティ提供	80名~
	研究開発	実験施設の運営・実験代行	60名~

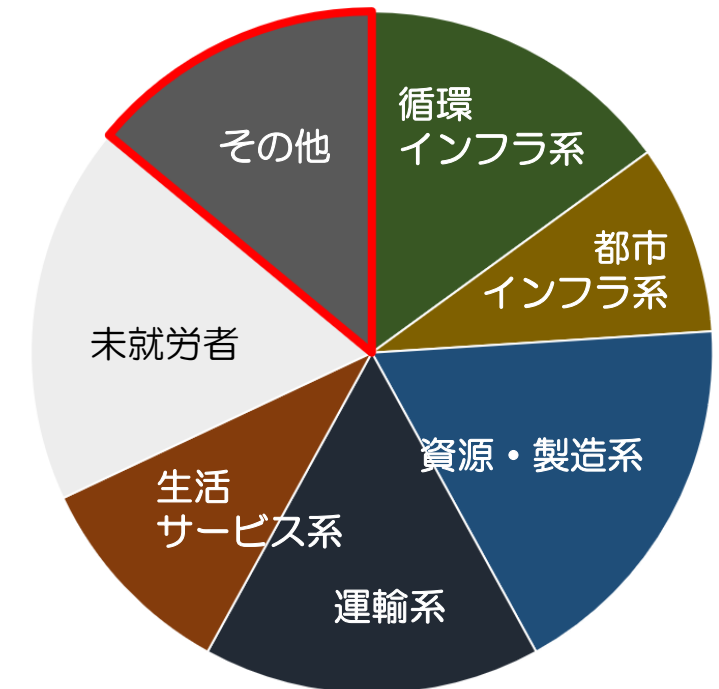
月面都市の機能・産業を維持するために必要な人数：820人~

持続的有人活動のためのインフラの機能・産業と必要人数の検討

- 大前提：技術革新による自動化・省人化を見込み、また想定される都市機能・産業像を具体化することで、検討をブラッシュアップしていく必要あり
- 人口1000人に対し就労者820人は、年齢構成としてややアンバランス（定常的社会を実現する場合）
（日本の年齢区分別人口割合：15歳～64歳：59.5%）
 - ① 就労者のみが住む都市とする？
 - ② 就労者とその家族が住めるよう、都市の規模を1000人よりも大きくする？
 - ③ // 都市機能・産業の省人化を行う？
 - ④ // 都市機能・産業を減らす？
- 月面都市の機能・産業は2つに分けられる
 - ① 月面居住者向けの機能・産業（680人）：循環・都市インフラ、資源・製造、運輸、生活サービス
 - ② 地球向けの機能・産業（140人）：その他（観光・研究開発）
 - ・ 月面都市の目的は②であるべき、①が②を支える
- 140人を680人が支えるのは非効率？（人口が小さい）
⇒②機能・産業拡張のための都市拡張を想定すべき

一方で・・・

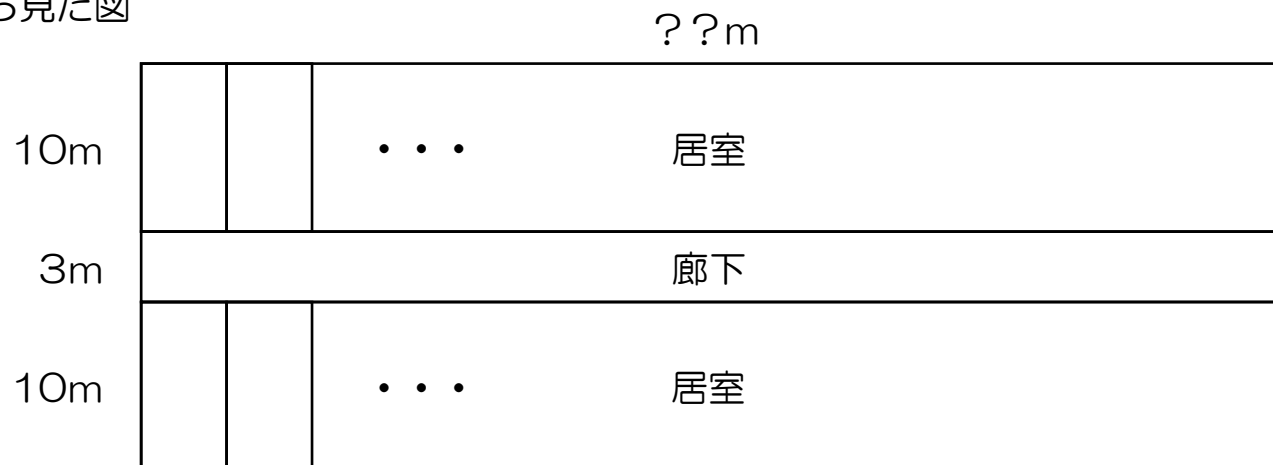
- ・ 子供・高齢者が定住できることの社会的実証のために少人数でも住んでいるのは重要
- ・ 高齢者がコミュニティの核になるなどあり得る（地域活動等） という議論もしている



居住システム

- 必要となる延べ床面積は？
 - 住生活基本計画「最低居住面積水準」を参考に推定した場合：23000m²
1人：25m²(400世帯), 2人：30m²(75世帯), 3人：40m²(150世帯)
 - 快適さを重視した必要面積：64000m²
1人：64m²
- ・・・今後分科会としてどの程度の生活水準を要求するか再議論予定
- 空間計画
 - 居住区は2階建て, 高さは3m程度？
 - 居室は基本的にレゴリスに埋められ、窓の有無・数・方角は重視されない → 中廊下型
 - 例えば. . .

上から見た図



× N棟あるイメージ？

居住システム

- 居住システムに必要な設備、備品
風呂、トイレ（トイレットペーパーは使えない、布か）、ベッド、収納、洗濯機
コンロはない。水道/洗い場あり。TV（月面都市の情報発信、宇宙天気（放射線、太陽風））ネット、映画村
- かなり快適な想定をすると・・・

単身寮

3F

居住部屋

2F

居住部屋

1F

共用（フードコート、ジム）
通路、レクスペース（公園のイメージ）、コンビニ

居住システムは
以下のようなイメージ



$$H = (3\text{m} + \text{床厚み}0.5\text{m}) \times 3\text{階} \\ = 10.5\text{ m}$$

外に出るとアーケード街



居住外の移動手段

- ・キャリカー（共用）
運搬用
- ・動く歩道



コンビニは食料を除く、生活消耗品・飲み物を想定。

住みたくなるような居住設備。しかし空間を作るには莫大な費用と維持費が・・・

エネルギー・液ガスコスト

■ 月面上でのインフラコスト試算に向けた原単位



□ 水資源コスト（月の資源）

- **200,000円/L**（PwC試算値からビジネスGより仮定）

※参考：地上では0.022円/L（東京都上水単価）

□ 電力コスト（月での発電を想定）

- **22,000円/kWh**（フロンティアビジネス研究会居住WG試算値）

※参考：地上では12円/kWh（TEPCO系統電源）

21.3円/kWh（再エネ電源－2020年）

□ 月面輸送コスト（地球から月への輸送）

- **1億円/kg**（フロンティアビジネス研究会居住WG試算値）

□ 水電解装置 原単位

- **5.0kWh/Nm³**（国内仕様、補器動力は含まない）

□ 月面での居住空間（有人一人当たりの必要容積）

- **40m³/人**（大林組－月面居住の考え方より）

※参考：最低居住面積 50m²×天井高 2.1m=105m³（MLTI）

月面居住に係るコスト評価

■例えば月面の水を使って、
空気と推進薬を作ったとすると・・・



月産 水資源 200千円/L

純水濾過
40%

濾過に係るコストは含まず



水電解原単位 5kWh/Nm3



電力コスト 22千円/kWh

酸素 O2

水1Lから
0.21m3精製

精製コスト
約1,000千円/Nm3

43億円/ton

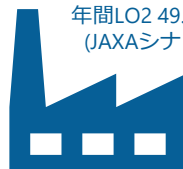
水素 H2

水1Lから
0.43m3精製

精製コスト
約600千円/Nm3

3.9億円/ton

年間LO2 49.3ton/年
(JAXAシナリオ)



液化酸素プラント
建設コスト (地上)
1,550百万円/t
(ガスメーカーへの聞き込み調査)

建設コスト (月面)
約2.1兆円 (49.3t/年)
地上の1,000倍と仮定
(根拠はなし)

年間LH2 8.3ton/年
(JAXAシナリオ)



液化水素プラント
建設コスト (地上)
1,400百万円/t
(エネルギー総合工学研究所より)

建設コスト (月面)
約325億円 (8.3t/年)
地上の1,000倍と仮定
(明確な根拠なし)

酸素充填量
42m3

窒素充填量
158m3

居住モジュール
5人滞在 = 200m3



初期充填コスト
O2 : 42百万円

N2 : 19,750百万円
約 200億円 (1億円/m3)

必要換回数
20m3/h・人=100CMH
換気用循環ファン仕様
73W,200Pa,12.5kg

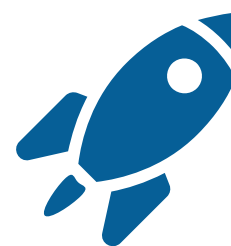


酸素液化原単位 (地上)
0.8kWh/Nm3
(NEDO 高効率酸素製造装置の開発より)



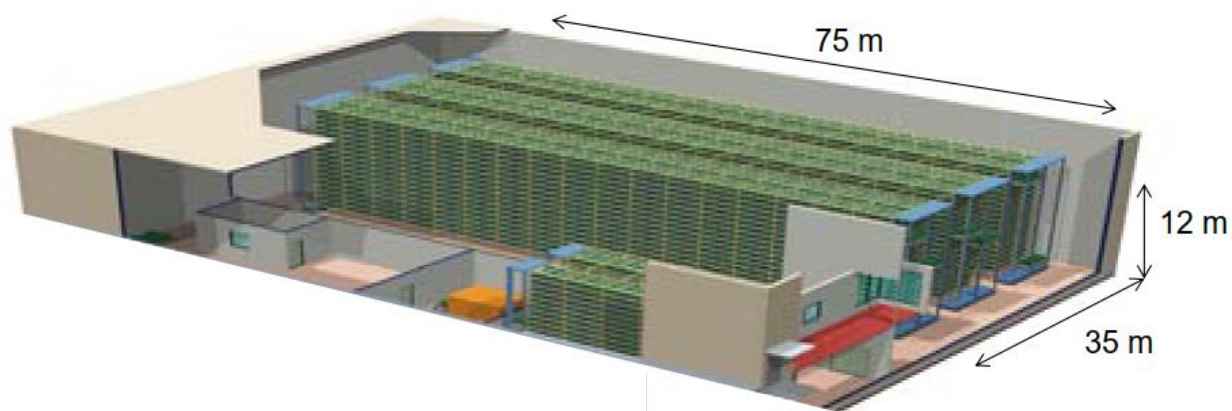
水素液化原単位 (地上)
1.2kWh/Nm3
(METI冷却用タービン等の要素技術より)

液化水薬コスト
約74億円/Nm3
(施設10年運用と仮定)



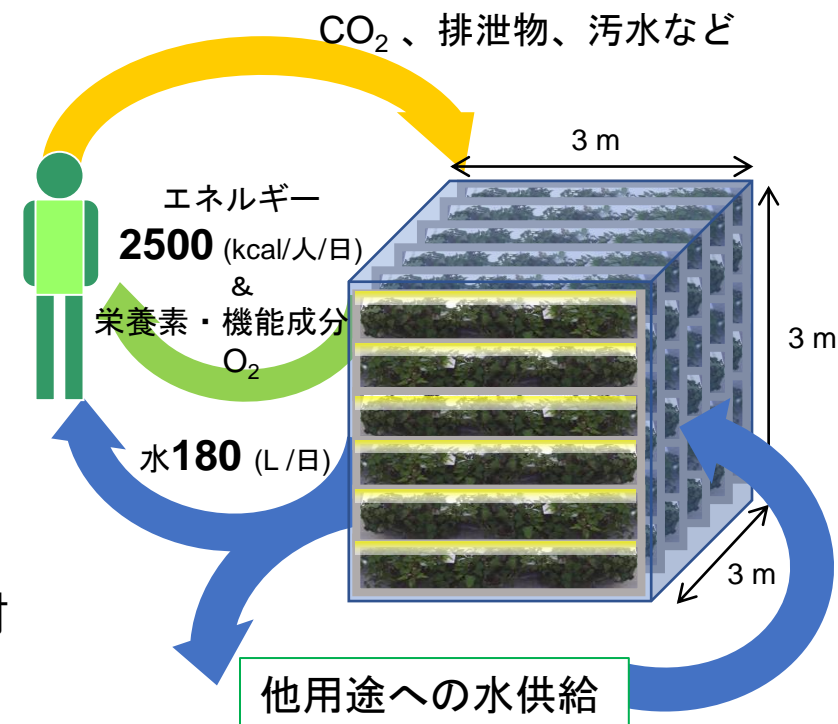
食料生産：宇宙農場

- 生存に必要な物質循環量の推算
 - 食料（乾物）618g/水3077g/酸素836g
 - 排泄物（乾物）109g/水3422g/二酸化炭素1000g
- 月面農場に最適な食物の選定
 - カロリーや繁殖の観点からサツマイモが適する
- 成人男性1人分のエネルギーを賄う農場設計
 - 3x3x3m=54m³の空間で可能。
- 1000人規模のムーンビレッジを賄う農場設計
 - 75x35x12mの空間で可能，地上モデルから電気使用量なども検討



宇宙植物工場（宇宙農場）の多益的機能

イモだけでなく葉や茎も食べられる栄養価の高いサツマイモを栽培すると、延べ54 m²の栽培面積で一人が生存可能



※リン・窒素など，植物工場で定常的に滞留する物質は初期条件として外から供給。

■課題：
植物光合成能力とヒトの食料消費速度のバランス
低重力下での自然対流の空気循環効果 などが課題

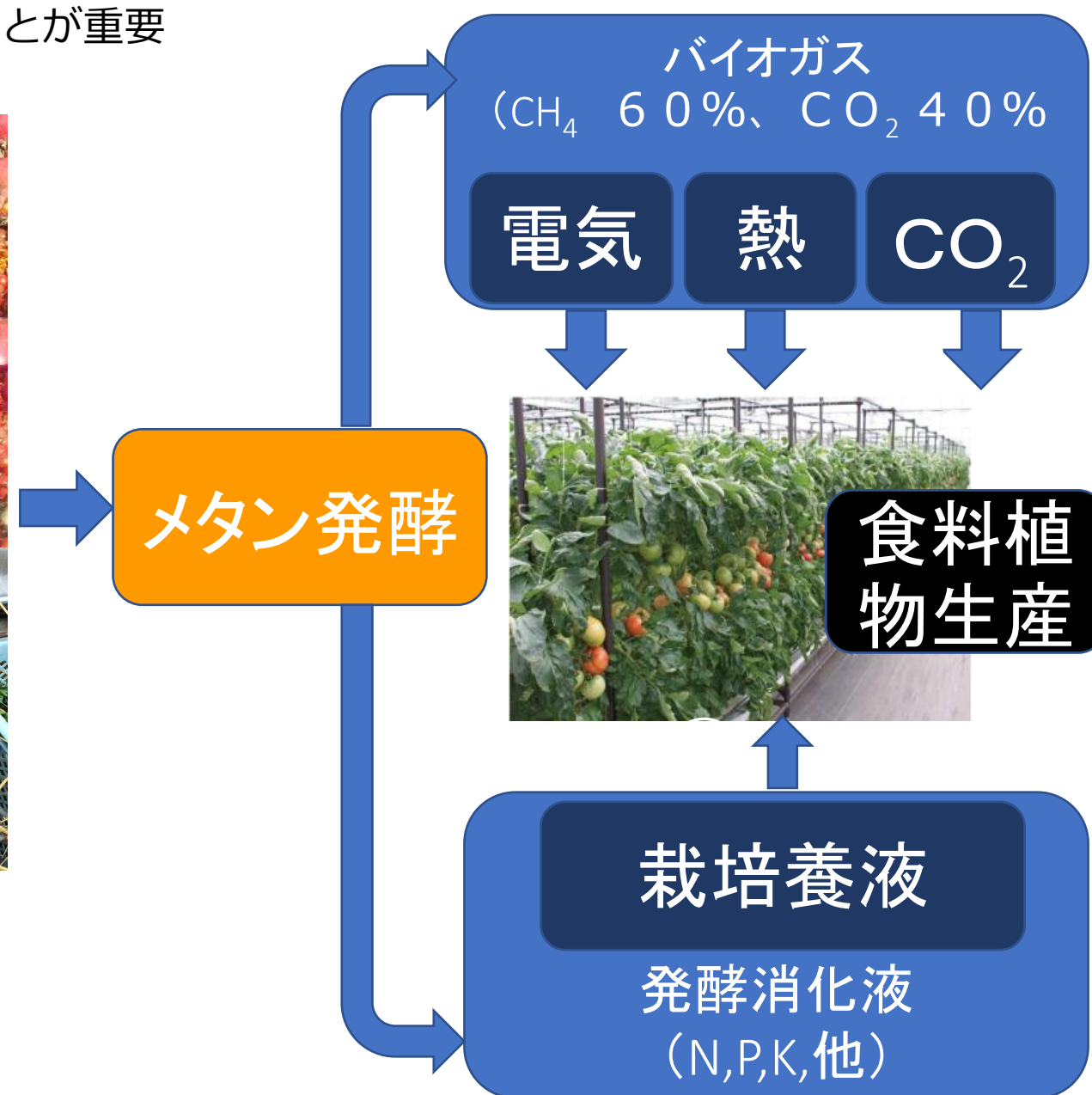
食料生産：宇宙農場

■排せつ物などを循環の中に取り込むことが重要

有機廃棄物処理 + 資源循環型食料生産



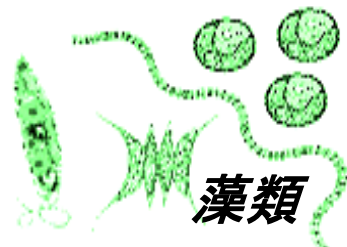
衛生的に処理する必要



食料生産：植物生産・魚養殖の複合，嗜好品への発展

物質循環のための

植物生産と魚養殖を複合したアクアカルチャー（大阪府立大学）



藻類

飼料
(植物・藻類)

消化できないセルロースを糸状菌など微生物由来のセルラーゼで糖化しエタノール発酵させることでアルコールを作ることも可能か？



ティラピア

排泄物
(肥料)



サツマイモ

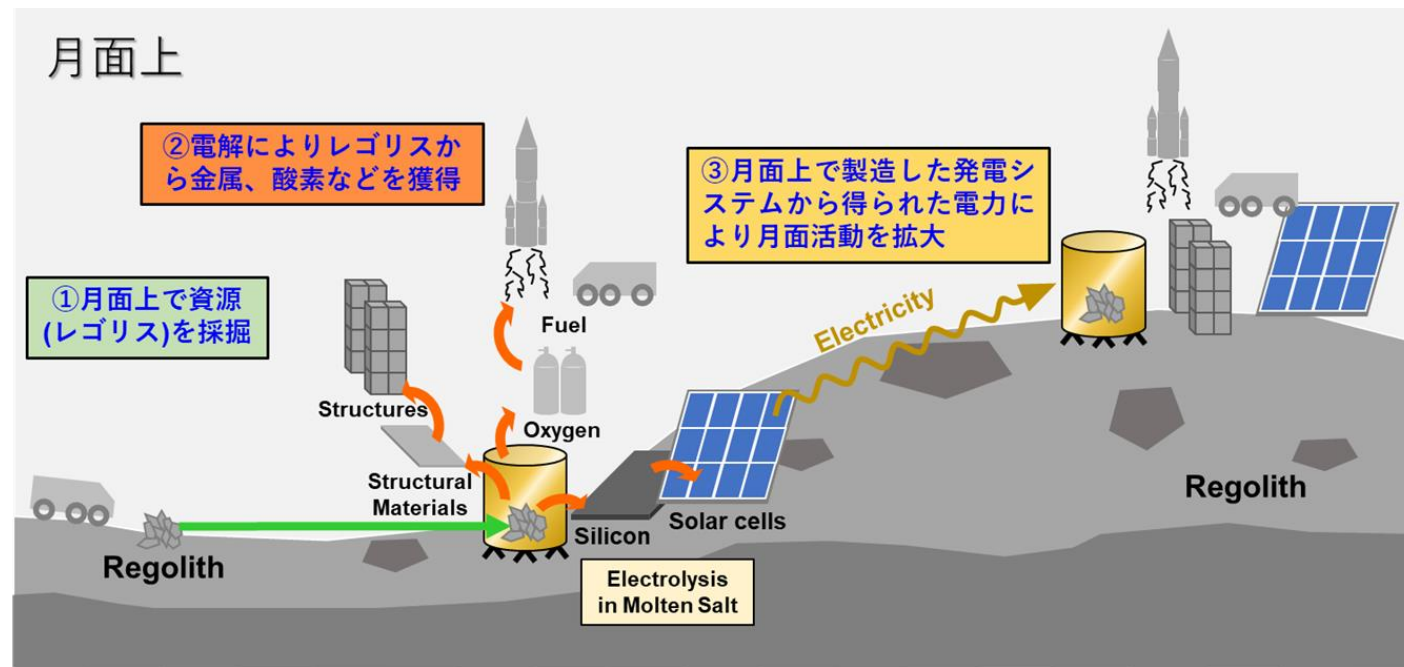
食料

レゴリスの有効活用

月レゴリス成分 1 tから得られる有用成分の一例 [1]

酸素	454 Kg
シリコン	208 Kg
マグネシウム	197 Kg
鉄	84.7 Kg
アルミニウム	32.5 Kg
カルシウム	16.5 Kg
クロム	4.17 Kg
マンガン	1.16Kg
チタン	1.86 Kg
ナトリウム	0.683 Kg
カリウム	0.0830 Kg

注) 常に上記の量ではない



- 任意の場所でその場にあるレゴリスを資源として用いて発電システム、月面基地の構造物や燃料などに必要な材料を作り出す（資源その場利用）。
- 電解によりレゴリスを分解することで、陰極上で太陽光パネル用のシリコン、構造物材料やその他各種デバイス用の鉄やチタン等の金属を製造し、陽極上で得られる酸素はロケット・ローバー等の燃料および有人月面活動の呼吸源として利用する。
- レゴリスを資源として製造した太陽電池モジュールアレイにより得られる電力を利用して月面上での活動範囲を拡大する。

[1] Stuart R. Taylor (1992). Solar system evolution. Cambridge Univ. Press. p. 307 pp

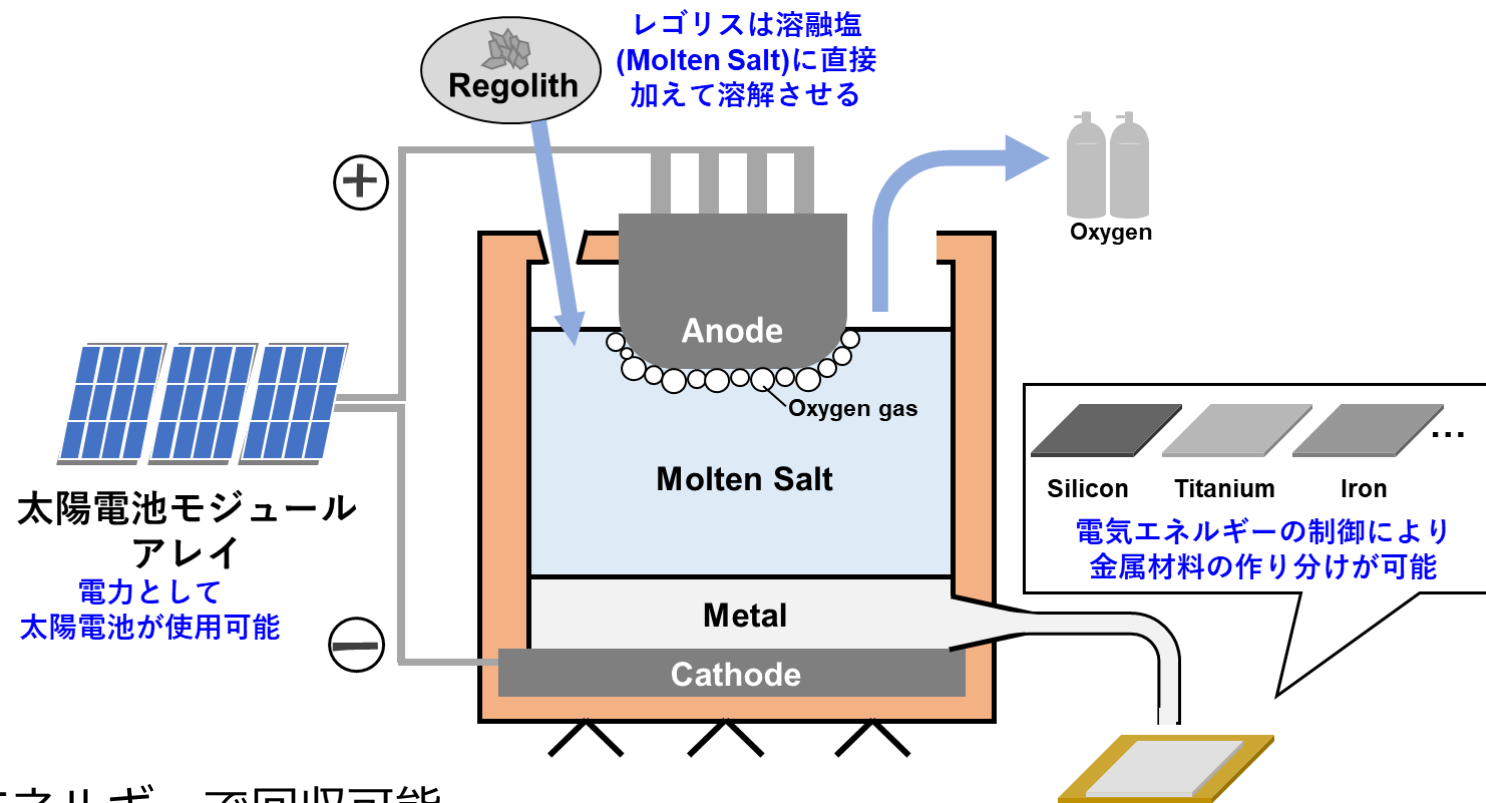
レゴリスの有効活用

月レゴリス成分からSi,鉄,アルミ回収および酸素回収に必要な電力試算の一例

- レゴリスから理論的に上述の量を書く元素を回収するために必要な総エネルギー
- 電気分解であるため、酸化物の理論分解電圧、電気炉エネルギー等も大雑把に考慮
- 溶融塩電解法で検討

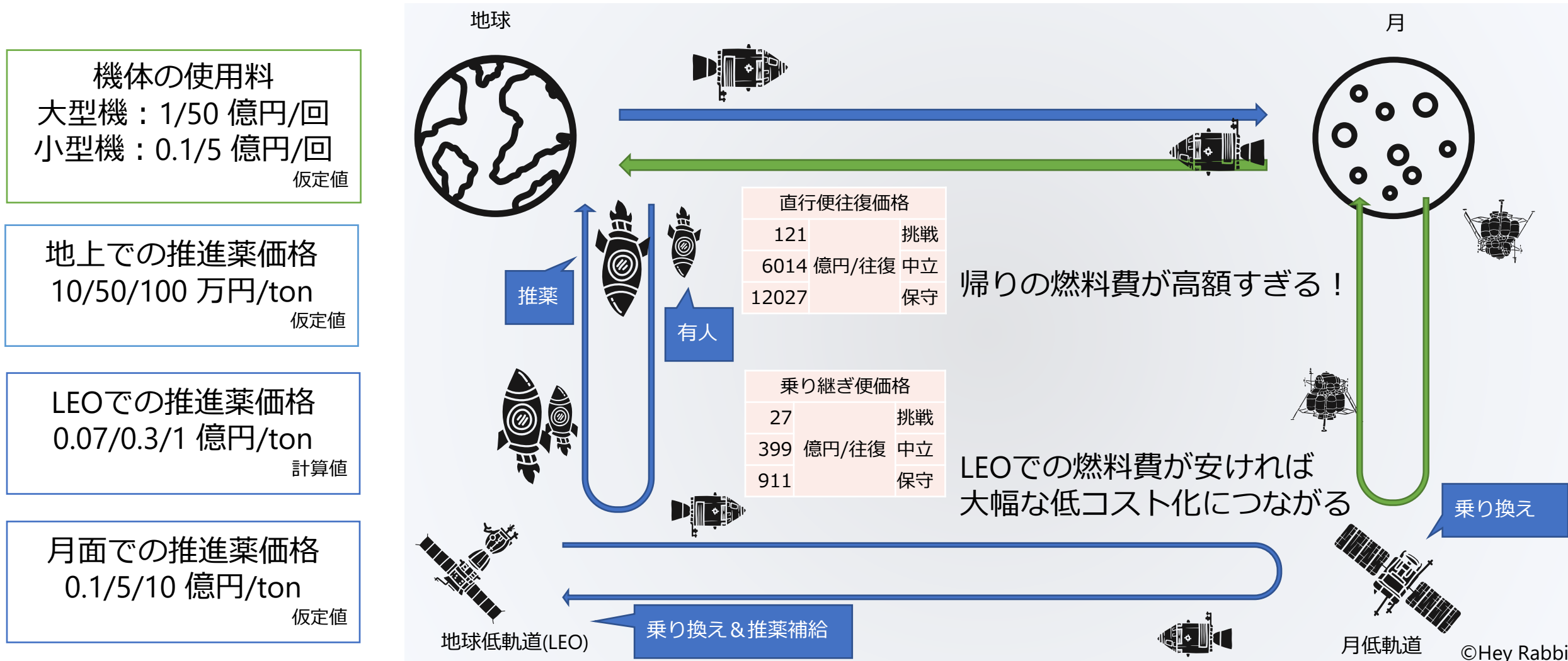
- 酸素 1 t 20,000 ~ 25,000 kW
- シリコン 1 t 7,000 ~ 9,000 kWh
- 鉄 1 t 4,000 ~ 6,000 kWh
- アルミニウム 1 t 8,000 ~ 10,000 kWh

理論分解のみ考慮すれば、上記の1/3程度のエネルギーで回収可能



月一地球間輸送

- 現時点ではどれだけの輸送量が必要になるか定量化できていない⇒輸送コストの感度を見てみた
- 地上燃料単価・月面燃料単価・機体運用費・地球軌道上での補給の有無をパラメーターに輸送コストを評価
 ※機体再使用による効果などは運用費にすべて含まれると仮定
 ※燃料搭載量は必要 ΔV に依存と仮定



月－地球間物流市場規模の試算①



【Step 1】現在の地球上 FMCG (Fast Moving Consumer-Goods; 日用品) 物流市場から宅配売上単価を算出

世界FMCG物流売上高 121兆5698億円 ÷ 世界有効取扱宅配个数 5707億68万個 ÷ 213円

- ✓ 宅配便1個辺りの平均売上単価を計算
- ✓ 世界FMCG物流売上高: 2021年Report Oceanより
- ✓ 世界有効取扱宅配个数: 日本国内の宅配取扱个数 (2020年国土交通省資料) と世界の物流インフラ状況から試算

【Step 2】月－地球間およびMoon Village内の物流状況を仮定

- 輸送需要: 1,000人 (人@月) ÷ 78億4,400万 (人@地球) = 0.000012%
- 輸送个数: 5707億68万 (個@地球) ÷ 78億4,400万 (人@地球) × 1,000 (人@月) = 73,000 (個@月)
- 輸送費用検討の基準:
 - 10t車両 1運航: 200,000円 (東京-鹿児島間, 東京-札幌間)
 - 10t車両積載个数: 800個を仮定 (※不明確情報)
- ロケット1運航: 30億円
- ロケットラジットスペース: 4.8m³ (10t車両積載量の約10%)
- 月面輸送ローバ: 5.5m³ (2t車両積載量の約50%, ルナクルーザー規模を想定)

月－地球間物流市場規模の試算②



【Step 3】 Moon Village内の輸送コスト試算 (主要モード: ローバ)

- ロケット輸送費横持ちのコストを考慮し、30億円÷20万円=15,000倍 (ロケット打ち上げ費と10tトラック輸送費の比較) のコストがかかると仮定

- 121兆5,698億 (円@地球) × 0.000012% (人口比率) = 1,549万8445 (円@月)
- 1,549万8,445 (円@月) × 2 (月面ローバコスト) = 3,099万6889 (円@月)
- 3,099万6,889 (円@月) × 15,000 (宇宙コスト) = **465億 (円@月)**

Moon Village内に配送拠点を複数設置しても、幹線輸送のコストが大きすぎるため、コストメリットは出せない

【Step 4】 月－地球間輸送コスト試算 (主要モード: ロケット)

- ロケット積載効率10tトラックの10%⇒通常陸送の10倍の輸送回数が必要になる。

- 73,000 (個/宇宙人口) ÷ (800 (個/トラック) × 10% (ロケット)) = 913 (回/打ち上げ)
- 913 (回/打ち上げ) × 30億 (円/打ち上げ) = **2兆7375億 (円)**

FMCG市場規模: Moon Village内と月－地球間合わせて **2兆7840億円**

✓ Moon Villageへの宅配1個あたり、**約3800万円**

宇宙輸送における労働集約型産業・物流現場の抜本的改革が必要になってくる。(新しい形の物流)

まとめ

- 都市を構成する人数や規模感から、エネルギー、食糧、レゴリス活用そして地球との輸送について検討を進めている
- 一方で通信や月面での移動手段などについてはあまり踏み込めていない
- 今一度我々がどんなムーンビレッジに住みたいか、月面で何をしたいかを考えながら検討を進めたい
- 今後検討の範囲を拡げ、具体的な都市像をイメージとして検討したい

