

ムーンビレッジ勉強会

2022/7/29 17:00-19:00

アーキテクチャ分科会における  
リファレンスモデル構築へ向けた議論の報告

アーキテクチャ分科会 一同

# 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

### ■ 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?

### ■ 地球との往来は？

年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 . . .)

### ■ 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)

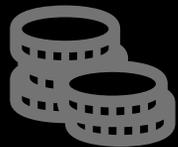
以上をもとに人文科学・人類学的側面 . . . . . 新しい文化, 新しい人類, 子孫, 教育 . . . . . などについて考える.

# 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？



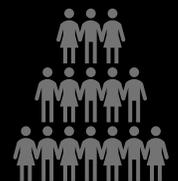
## ビジネス分科会：ビジネスの視点

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言う概念を超えて、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？

## 参加メンバー

- 小林弘明, 坂本勇樹 (宇宙研, 日本ロケット協会)
- 鷓山尚大, 福島渚, 田崎智之 (清水建設)
- 北宅善昭 (大阪公立大学)
- 岡本有生 (IHI)
- 齋藤晃央, 笹山容資 (I A)
- 森田健 (高砂熱学)
- 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)
- 桜井誠人 (JAXA)



# リファレンスモデル策定に向けた取り組み

## アーキテクチャ分科会 リファレンスモデル

### 目次

1. 月面アーキテクチャの検討.....	1
1.1. 検討概要.....	1
1.1.1. ムーンビレッジの役割.....	1
1.1.2. 観光都市であるムーンビレッジに行って人類が実現したいこと.....	2
1.1.3. 都市の成り立ち.....	2
1.1.4. 成熟期における都市の概要.....	2
1.2. 月面インフラの機能と産業.....	3
1.3. 居住空間.....	5
1.3.1. 居住者の暮らし.....	5
1.3.2. 居住施設.....	6
1.4. 持続的な有人活動を支える技術.....	7
1.4.1. 大気・推進薬製造.....	7
1.4.2. 食料生産.....	10
1.4.3. レゴリス活用.....	11
1.4.4. 地球-月輸送.....	13
1.5. 検討のまとめと今後の展望.....	14

## 1. 月面アーキテクチャの検討

### 1.1. 検討概要

#### 1.1.1. ムーンビレッジの役割

ムーンビレッジが持続的に発展するためには、人類が月面を開発する目的が必要と考える。人類にとって月面が果たす役割としては、「資源探査」や「観光」等が考えられる。例えば、観光都市「月面」の役割は、「観光客にこの場所ならではの体験をさせる」ということである。また、その役割を担うために必要な従業員に「安全かつ豊かな暮らし」を提供することも必要である。よって、観光都市「月面」はこの二つの役割を担える都市となる。

また、資源都市「月面」の役割は、①宇宙で燃料や物資（食料なども含め）が欲しい、宇宙機のメンテナンスがしたい という人に燃料やサービスを行うこと、②月面・小惑星の資源を採掘し、地球では入手しにくい資源を地球に運ぶ ことである。また、その役割を担うために必要な従業員に「安全で働きやすい暮らし」の提供や、一時滞在者に「安全な滞在」を提供することも必要である。よって、資源都市「月面」はこれらの役割を担える都市となる。本検討では、まずは観光に重点を置いた検討を行った。なお、下記検討では、項目ごとに異なる定量化が含まれる点に留意いただきたい。

#### 1.1.2. 観光都市であるムーンビレッジに行って人類が実現したいこと

分科会及び、勉強会のアンケートで得られたモチベーションを下記に示す。

- 地球外 という 秘境中の秘境に行ってみたい。
- 無重力、低重力という非現実的な環境を体験したい。
- 地球を外から見てみたい。
- 研究者として働きたい
- 人類の可能性を広げたい
- さらなる外惑星への足掛かりを作りたい
- 映画やアニメでしかなかった世界を体験してみたい

#### 1.1.3. 都市の成り立ち

ここでは、観光都市であるムーンビレッジがどのように発展するかを仮定する。観光都市「月面」はプロフェッショナルによる開発が進み、月面での従業者が10名程度になったころから一般人の宇宙旅行先として利用可能となる。開発当初は有人ローバのような施設、モジュールへの短期滞在が可能となる。この時、年100名程度の往来がある。

その後、モジュールが集まり、モジュール間が連携（与圧通路で繋がったりする）したキャンプ地のようになることで、月面でやってみることが多様化していく。旅行希望者も増加していき、定住者が観光施設の拠点となる月面ホテル建設や、その周辺にやってみようを実現するための施設づくりが蓄まるため、月面での従業者は100名程度まで増加する。建設段階では、観光客用のモジュールとは別に建設を行う作業員の滞在モジュールがあり、建設現場の観光ツアーも一時的に開催している。週一回以上の月面との定期運航が実現し、年1000名程度まで往来が増加する。

さらに、月面ホテルや観光施設を中心とした「観光都市」として成熟すると、1000人規模の人が定住して働くこととなり、月面観光の需要も年10000人程度まで増加する。都市が建設される場所は、水資源が採掘・利用できる極域となり、建設当初は有人ローバのような小規模のものが月面上に集まったものとなり、徐々に大型施設が建設される。様々な体験ができるよう複数の大型施設が繋がった都市となり、長期滞在している従業員を守るうえで、都市構造は地下まで延びて形成される。

#### 1.1.4. 成熟期における都市の概要

都市は大きく、観光施設と従業員の居住施設に分かれており、各施設間はエアロックのついた与圧通路で繋がりが、日々の生活の中では宇宙服を着て外に出ることはない。

観光施設では、観光客の滞在のためのホテル、地球や天体を眺めるための展望台、低重力環境を用いたアクティビティ、月面という秘境を探索するための探検ツアーを行えるような施設・設備がある。また、ホテル内では、月面水を太陽光で沸かした天然？温水等のプール、大浴場などもあり、遊ぶだけでなくゆったりとリフレッシュもできるようになっている（カジノもやれる）。更には、観光施設は都市の玄関口にもなるため、スペースポートと接続されており、玄関口周りにはお土産屋さんも並んでいる。

また、観光客が消費する食料は地球から持参する+都市内で製造されたものを組み合

# そもそもムーンビレッジ行って人類が実現したいことは？

- ・ フロントティアで働くことは魅力的
- ・ 地球を外から見てみたい
- ・ 地球外 という 秘境中の秘境に行ってみみたい
- ・ 無重力、低重力という非現実的な環境を体験したい
- ・ 研究者として働きたい
- ・ 人類の可能性を広げたい
- ・ さらなる外惑星への足掛かりを作りたい
- ・ 映画やアニメでしかなかった世界を体験してみたい
- ・ 行ってみみたい人の希望を叶える仕事がしたい
- ・ 地球が住めなくなった場合の優先居住権の獲得。 資源採掘等による富。

↓  
働きたい！

↓  
観光したい！

↓  
研究したい！

↓  
好奇心！

## 都市の役割 大きく二つのシナリオを検討

観光

資源ビジネス

それぞれに対して・・・

概要

役割

仕事

生活

を検討

- 観光都市としての「月面」の役割：
  - 観光客に「**この場所ならではの体験**」をさせる
  - 必要な従業員に「**安全かつ豊かな暮らし**」を提供



どんなアーキテクチャが必要か？が見えてくる？

## 10人規模の社会

- 有人ローバのような施設の短期滞在
- 月面でやってみたいことが多様化
- それに伴い旅行希望者も増加

## 100人規模の社会

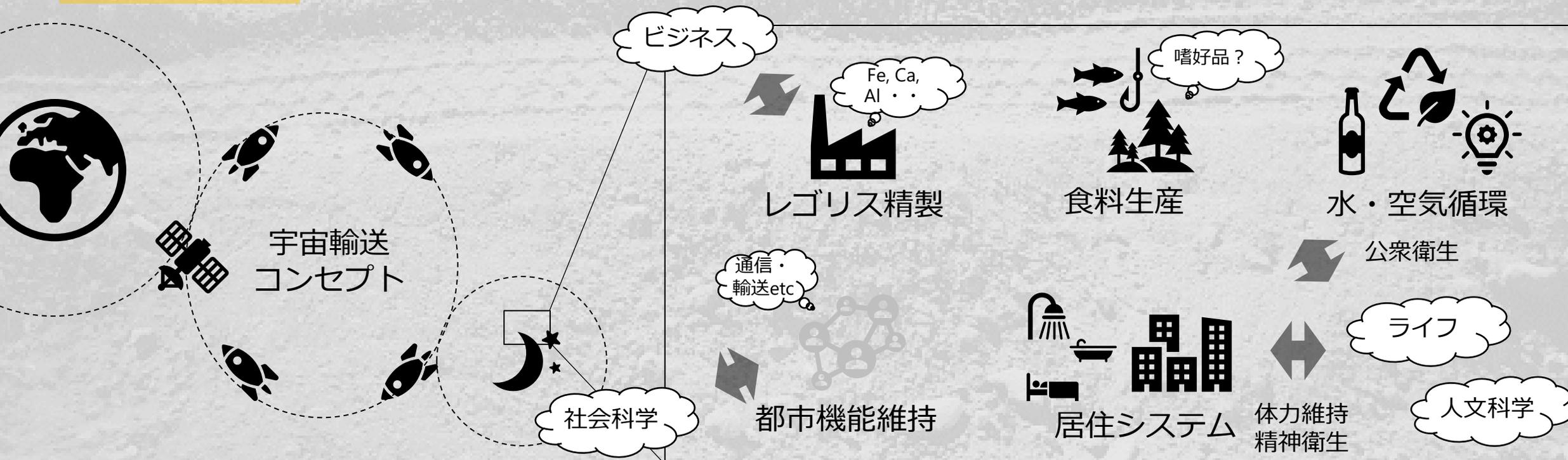
- 月面ホテル建設等が開始
- 観光客と滞在者のモジュールが分かれる
- 観光ツアーなども実施

## 1000人規模の社会

- 月面ホテルや観光施設を中心とした「観光都市」へ
- 複数の大型施設が繋がった都市
- 都市構造は地下まで延びる
- 月面間の需要が年10000人まで増加

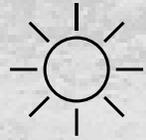
# アーキテクチャ分科会の検討概要

- **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．経路やISRUの優位性を検討



# ムーンビレッジの都市概要

## 【成熟期】 1,000人が定住し、10,000人が訪れる都市

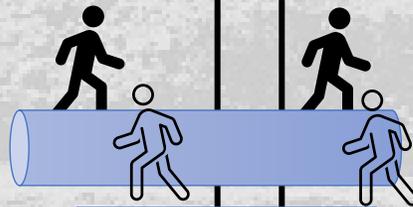
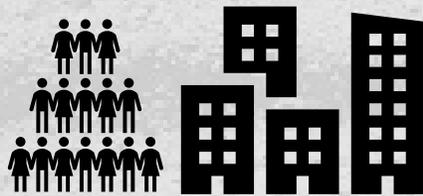


人工的に昼夜が作られた1日（地球と同じ24時間）間隔で生活



- ・ マンション形式住居
- ・ 食堂
- ・ ジム
- ・ 病院
- ・ 生活雑貨店
- ・ 緑化公園
- ・ スポーツ広場 など

### 居住施設



施設間移動  
= 与圧空間

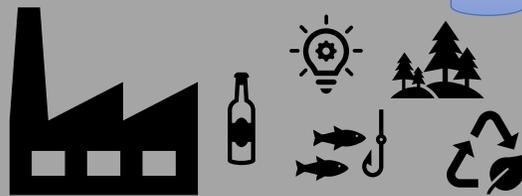
### 観光施設



- ・ ホテル
- ・ 展望台
- ・ アクティビティ
- ・ 探検ツアー
- ・ 月面水プール/大浴場
- ・ カジノ など

- ◆ 家具家電=備え付け
- ◆ 故障時は都市内で修理・交換
- ◆ **宇宙服ナシで生活**
- ◆ 趣味等のモノは入居時に一定量で持込、追加は一定量まで輸送費免除で後から地球に持ち込める。

### 地下空間

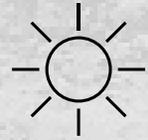


- ◆ 物質循環装置、農場プラント、
- ◆ **完全リサイクル都市として、自給自足**
- ◆ 居住区画、観光区画にそれぞれ設置（冗長性を持たせる）

- ◆ 観光施設は都市の玄関口にもなるため、**スペースポートと接続**されており、玄関口周りにはお土産屋さんも並んでいる。
- ◆ 料理は地球からの持ち込み食材 + 現地産食材の組み合わせでシェフが調理してくれる。

# ムーンビレッジの都市概要

## 【成熟期】 1,000人が定住し、10,000人が訪れる都市

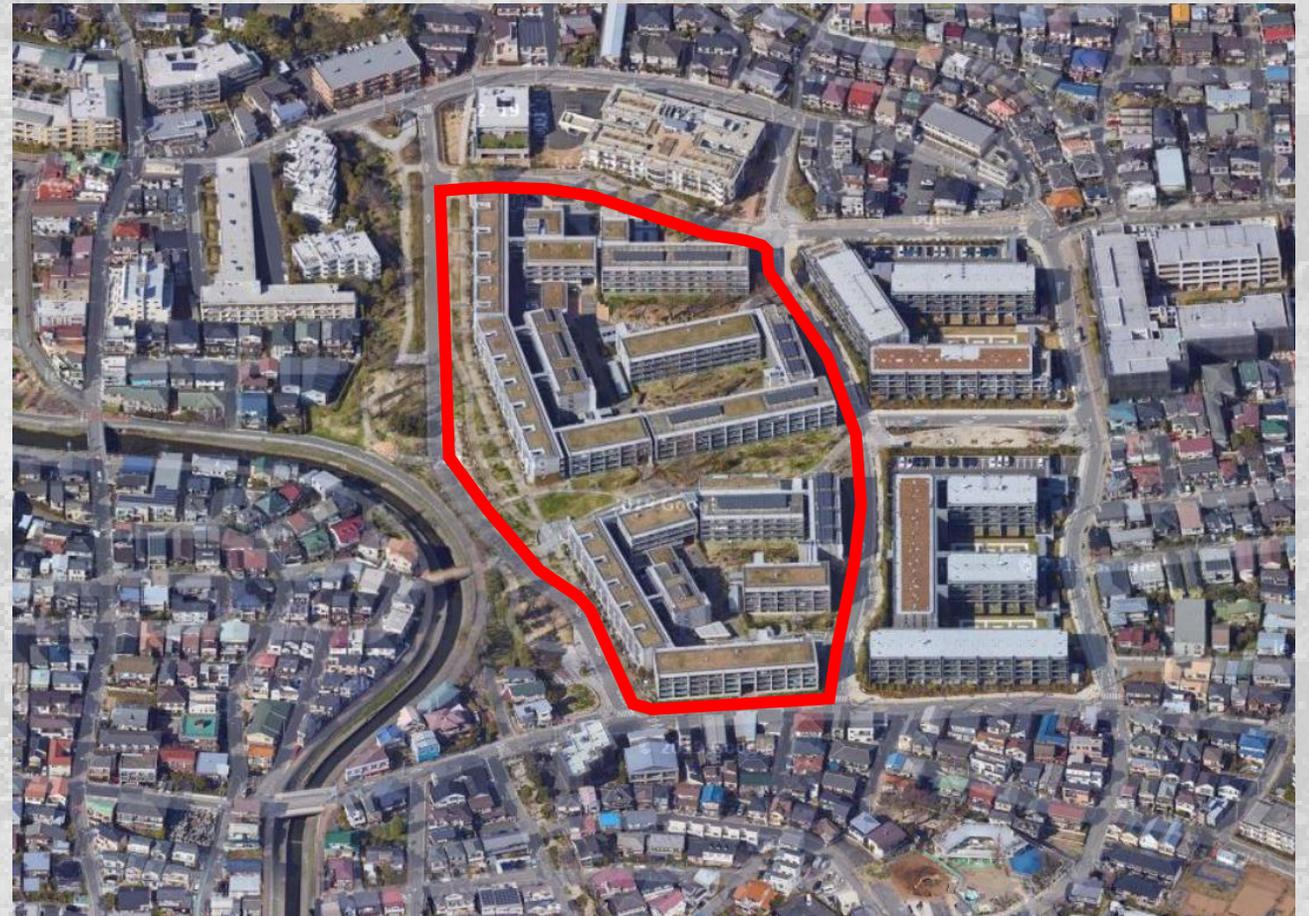


人工的に昼夜が作られた1日（地球と同じ24時間）間隔で生活



### 居住区のサイズ例

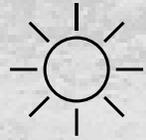
- 人口密度：DID（人口集中地区）の下限值と同じ40人/haと想定  
※ DIDは「都市的地域」を定めたもの。  
月面都市は低層建物がならぶ  
「低密度な都市的地域」と想定。
- 居住区面積： $1000/40=25\text{ha}$
- **500m四方、約400戸の団地程度**



(例：約440戸)

# ムーンビレッジの都市概要

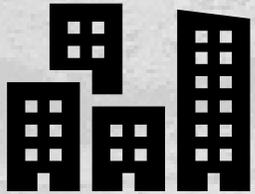
## 【成熟期】 1,000人が定住し、10,000人が訪れる都市



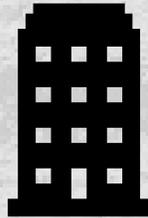
人工的に昼夜が作られた1日（地球と同じ24時間）間隔で生活



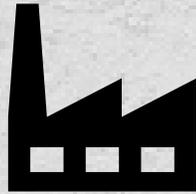
### 居住施設



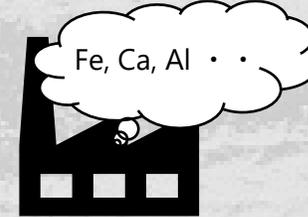
### 観光施設



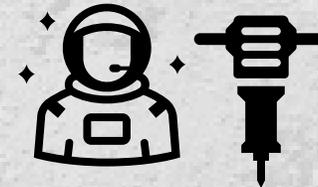
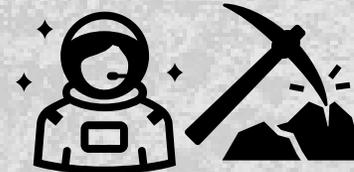
### 地下空間



### 都市外部（工場、現場等）



- 発電
- 資源採掘
- 精錬施設
- 建設現場 など



# 都市機能と構成人数

都市に必要な機能を設定し、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・一次試算

	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	80名~
	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	
	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~**

## 検討結果から見えてくる課題1

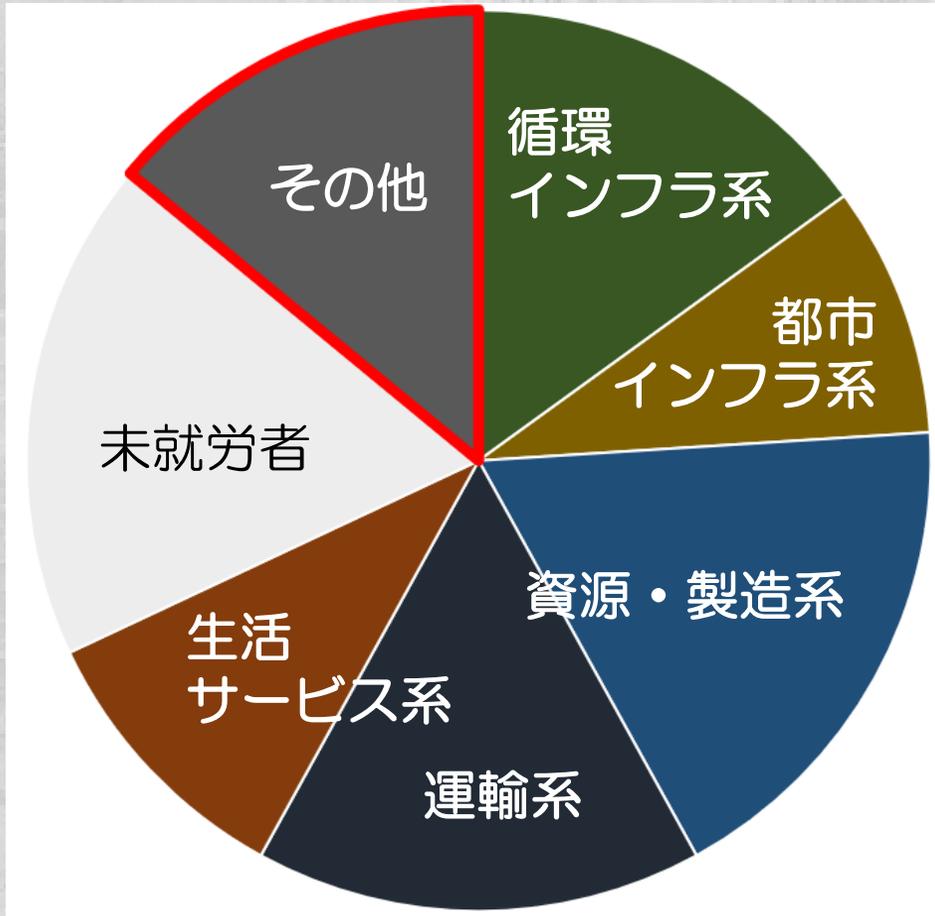
- 人口1000人に対し就労者820人は、年齢構成としてややアンバランス  
(日本の年齢区分別人口割合：15歳～64歳：59.5%)

- 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？

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・産業像をより具体化することで、  
検討をブラッシュアップしていく必要がある。

## 検討結果から見えてくる課題2

- ・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？

②機能・産業拡張のための都市拡張を想定すべき

# 居住システム

- 居住空間（リファレンス）

- 居住施設

- 月面ホテル

\* 居住施設と月面ホテルは機能の類似性があるため、同様のコンセプトとすれば開発費が抑えられる。

<建造物>：膜構造？梁構造？ → 技術次第！膜構造か？

<居住施設の放射線対策>：月レゴリスの覆土を想定

<都市の建設場所>：大規模な基礎工事を要するため平らな土地を想定

# 居住システム

- 居住者の暮らし

- 心身の健康管理が重要
- 1日8時間労働, 3交代制
- 1日最大2H程度のトレーニングが必要

👉 閉鎖環境下で責任の重い仕事に従事する居住者には精神的な安定のため「癒し」の空間が必要であろう。

<家族構成> 単身、夫婦を想定。

- 成長途上である子供が月面で長期滞在することは現状想定しない。  
(子供も暮らせるようライフサイエンス分科会の検討に期待！)

## • 居住施設

<月面都市に居住施設はいくつある??>

- 1000人一緒に住む?
- 分割して居住施設を冗長とする?

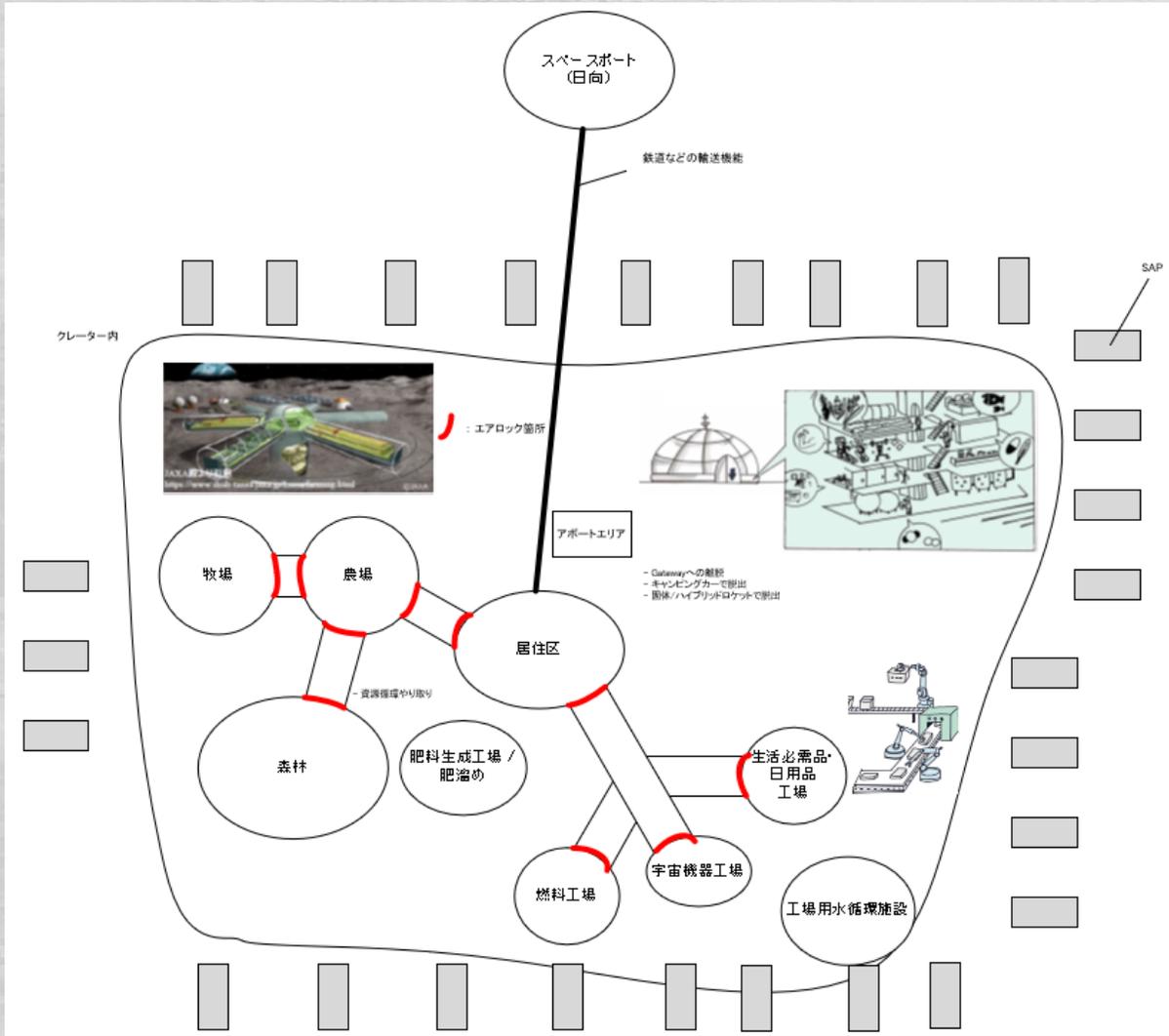
👉 1000人居住のためには建物1棟で十分であること、居住施設以外にも人間が生活できる施設は存在することから**居住施設は1つ**としてみる。

<居住施設に何がある??>

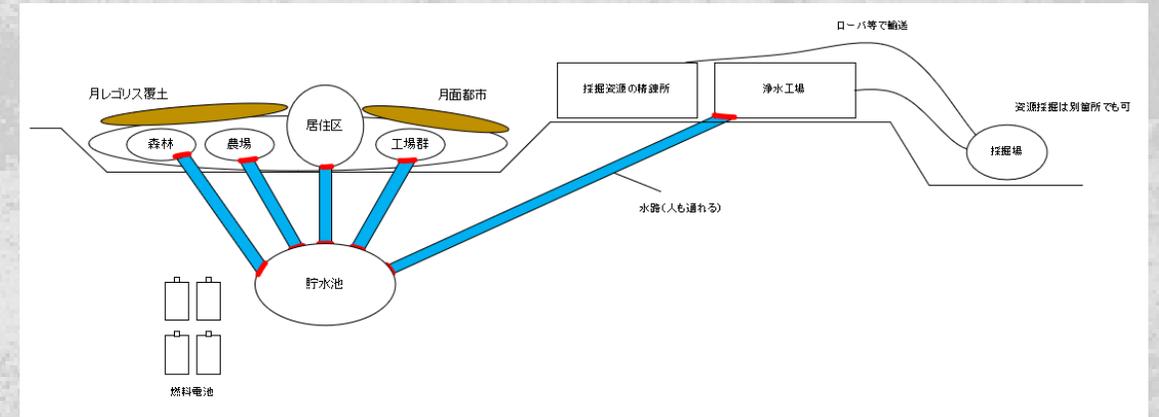
- 共有スペース：トレーニングルーム、レストラン・食堂
- 個人スペース：快適さを求めたい。広さは75m<sup>2</sup>程度?

👉 「癒し」空間は居住施設（建物）外にある。居住者の健康が何よりも大事。居住者が**快適に過ごせる空間**を追求していきたい。

# 月面都市外観



都市を上から見た絵



都市を横から見た絵

# エネルギー・空気・推進薬製造



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/Nm<sup>3</sup>



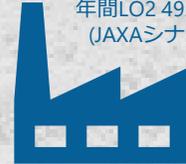
電力コスト 22千円/kWh

酸素 O<sub>2</sub>

水1Lから  
0.24m<sup>3</sup>-O<sub>2</sub>  
精製

精製コスト  
1,044千円/m<sup>3</sup>-O<sub>2</sub>

年間LO<sub>2</sub> 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/day  
(ガスメーカーへの聞き込み調査)

建設コスト (月面)  
約2,100億円 (49.3t/年)  
地上の1,000倍と仮定  
(根拠はなし)

水素 H<sub>2</sub>

水1Lから  
0.49m<sup>3</sup>-H<sub>2</sub>  
精製

精製コスト  
522千円/m<sup>3</sup>-H<sub>2</sub>

年間LH<sub>2</sub> 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/day  
(エネルギー総合工学研究所より)

建設コスト (月面)  
約323億円 (8.3t/年)  
地上の1,000倍と仮定  
(明確な根拠なし)



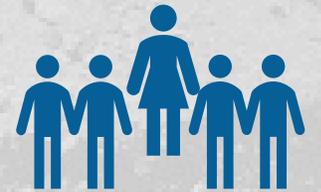
窒素充填量  
47,400m<sup>3</sup>-N<sub>2</sub>

窒素ガスコスト(地球から)  
125百万円/m<sup>3</sup>-N<sub>2</sub>  
(キャリア)

CO<sub>2</sub>排出量: 1m<sup>3</sup>-CO<sub>2</sub>/人・day  
許容CO<sub>2</sub>濃度: 7,000ppm  
⇒ 420m<sup>3</sup>-CO<sub>2</sub>  
10hに一度、41.7m<sup>3</sup>-O<sub>2</sub>給気

酸素充填量  
12,600m<sup>3</sup>-O<sub>2</sub>

居住モジュール  
1,000人滞在 = 60,000m<sup>3</sup>



初期充填コスト  
O<sub>2</sub>: 132億円  
N<sub>2</sub>: 5.93兆円

約 5.94兆円 (約1億円/m<sup>3</sup>)

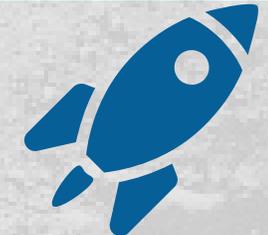
ランニングコスト  
約105百万円/day



酸素液化原単位 (地上)  
0.8kWh/Nm<sup>3</sup>  
(NEDO 高効率酸素製造装置の開発より)



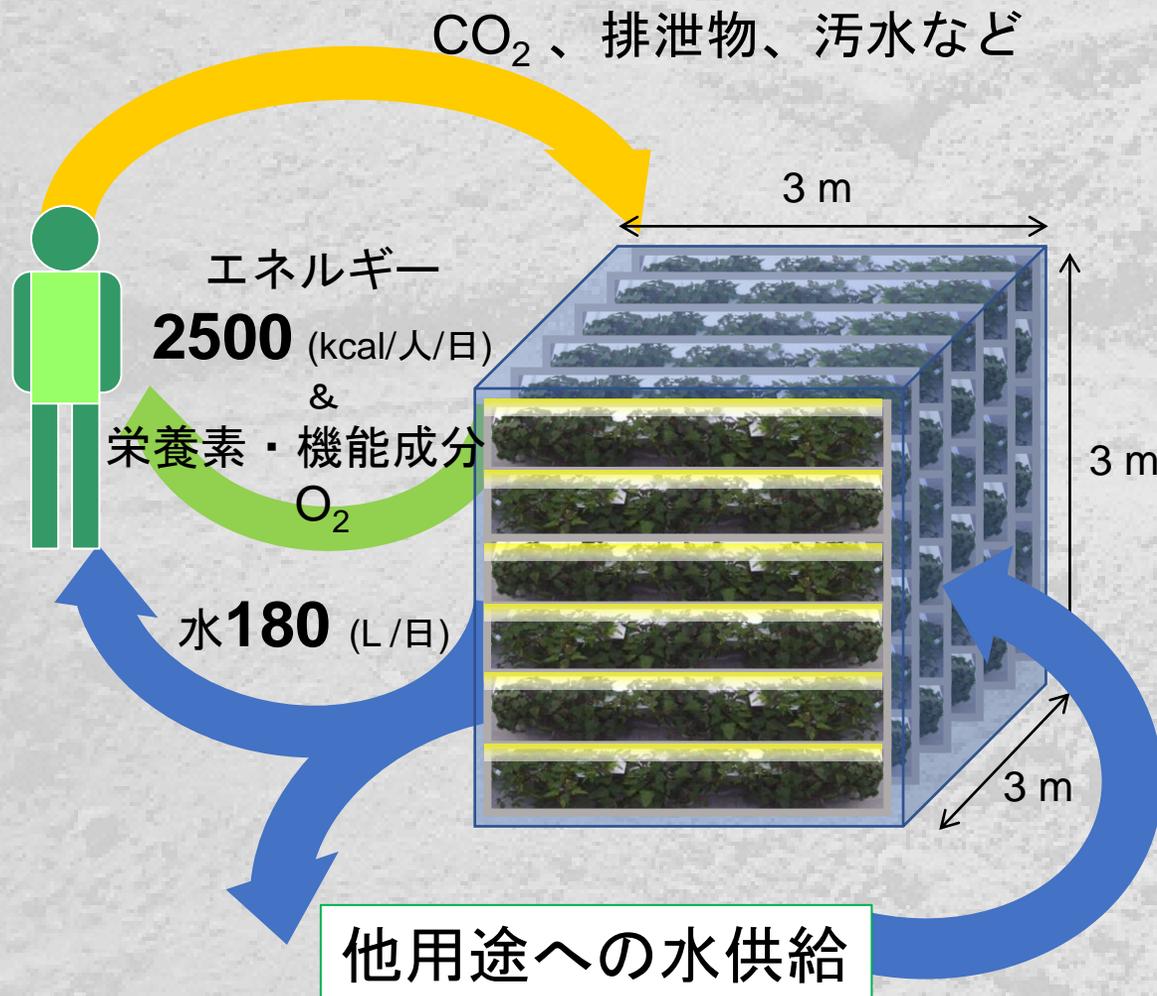
水素液化原単位 (地上)  
1.2kWh/Nm<sup>3</sup>  
(METI冷却用タービン等の要素技術より)



液化推進薬コスト  
推進薬量 36.8ton  
約753億円  
(施設10年運用と仮定)

# 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 m<sup>2</sup>の栽培面積で一人が生存可能



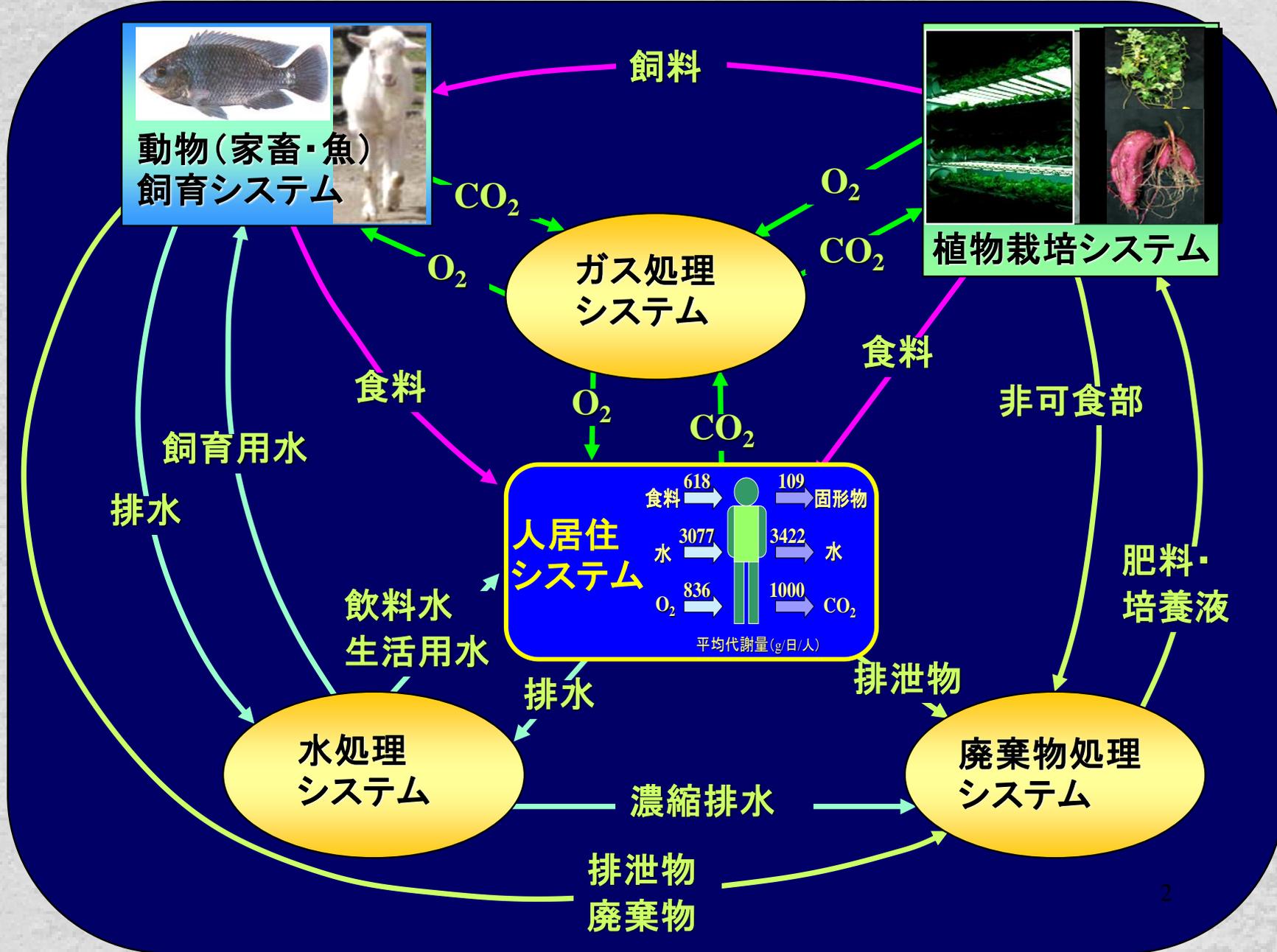
+

- ・生鮮野菜を食べる
- ・植物とふれあう  
(宇宙ガーデニング)
- ・明るい照明を浴びる  
(生体リズム調整)

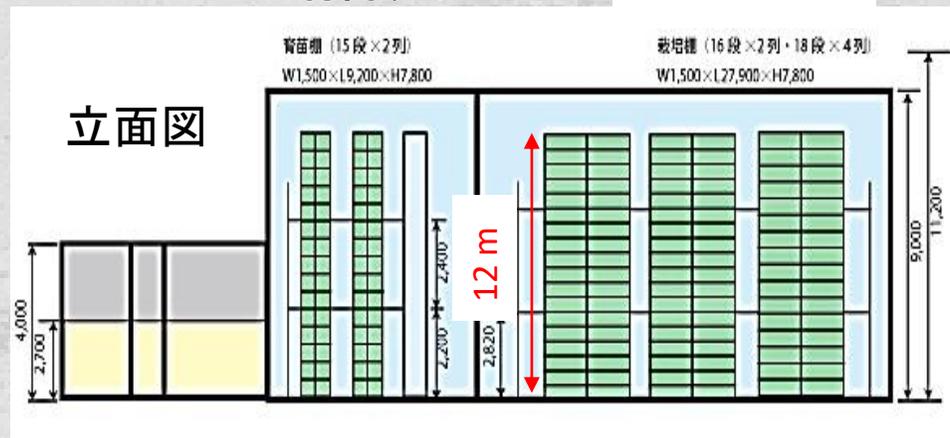
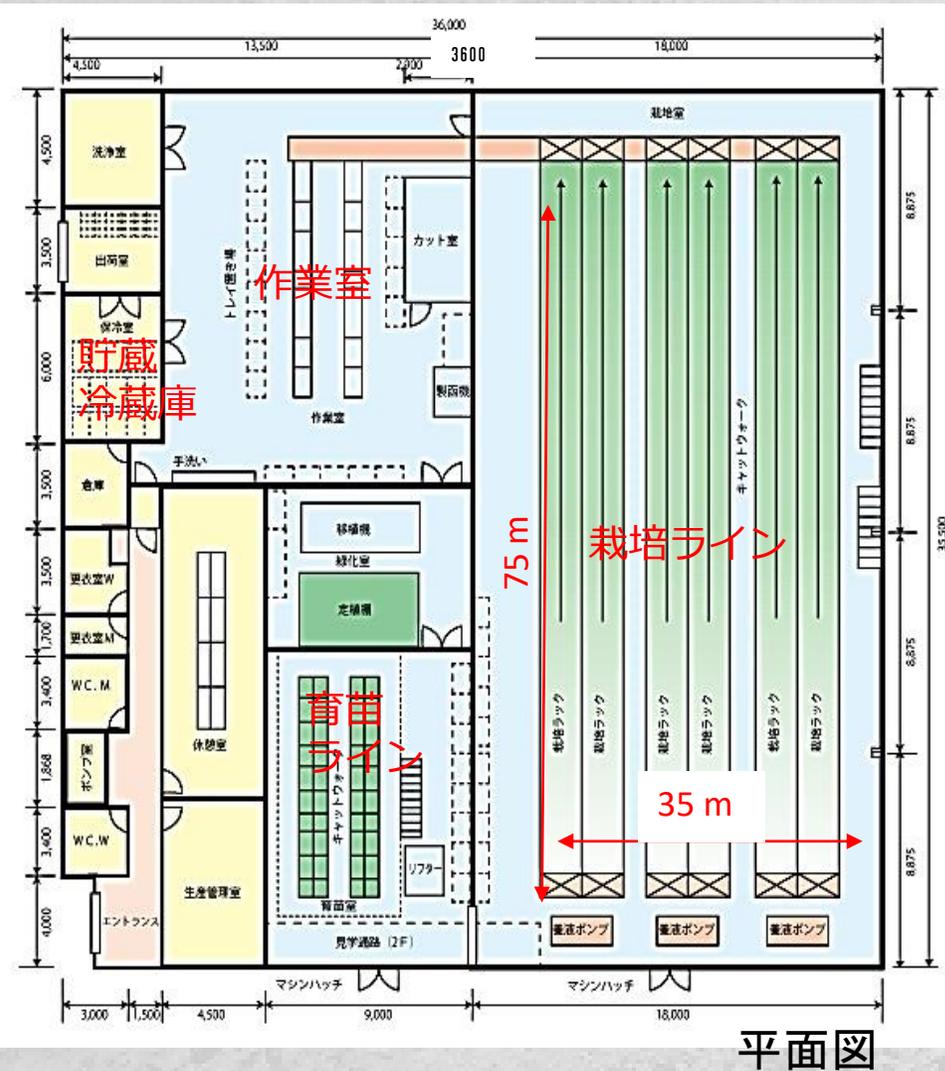


精神的ストレスを  
和らげる

# 資源循環型食料生産



# 大阪公立大学植物工場研究センターを基に1000人規模のサツマイモ生産植物工場の規模を算定すると

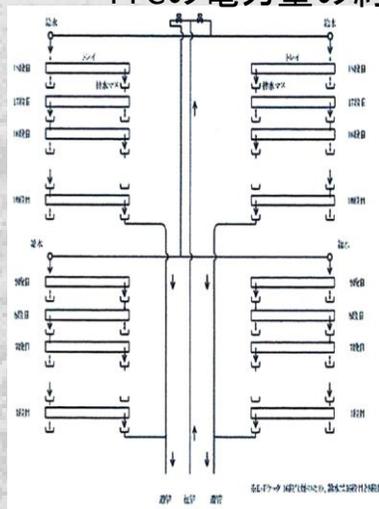


2020年度(4/1~3/31)年間使用電力量

電灯・ポンプ (kWh)	LED (kWh)	空調 (kWh)	合計 (kWh)
141240	2063328	1000656	3205224

## 電力量

大阪公立大PFCLetas栽培ラインの栽培ベッド総面積 (m<sup>2</sup>) = 5772  
 サツマイモの場合、54 (m<sup>2</sup>/人) ⇒ 成人男性1000人では、54000 m<sup>2</sup>  
 ⇒ PFCの栽培ベッド面積の約9.4倍が必要  
 ⇒ PFCの電力量の約9.4倍が必要 ⇒ = 3205224 x 9.4 = 約300万 (kWh/年)



## 滞留水量

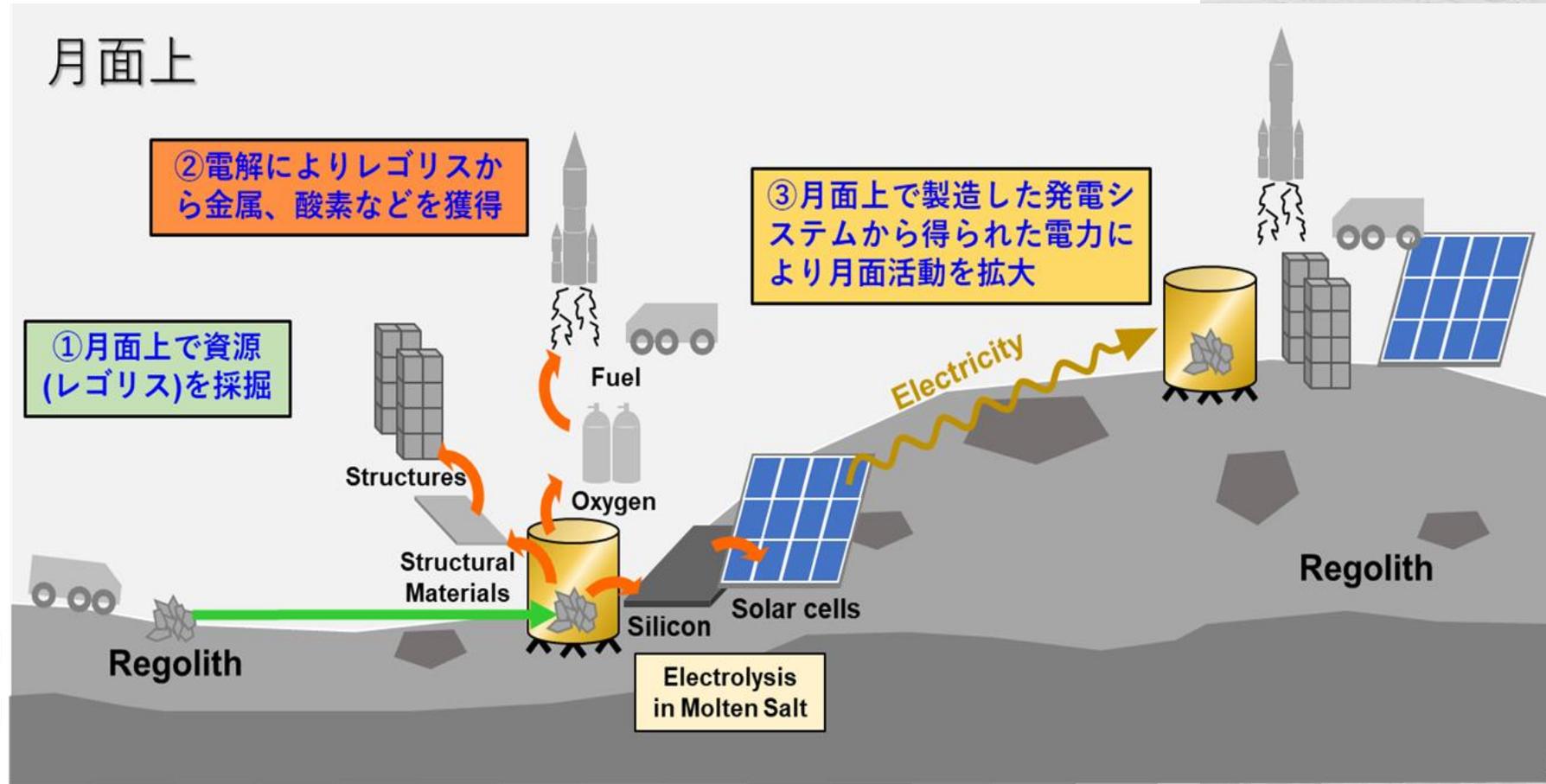
PFCLetas栽培ラインのポンプ(2.2 kW)による揚水量15 (m<sup>3</sup>/h)  
 サツマイモの場合、54 (m<sup>2</sup>/人) ⇒ 54000 m<sup>2</sup>/1000人  
 ⇒ PFCの栽培ベッド面積の約9.4倍が必要  
 ⇒ PFCのポンプ給水量の約9.4倍が必要  
 ⇒ = 15 x 9.4 = 141 (m<sup>3</sup>/h)

各栽培ベッドに20 mm深の水を滞留させると、  
 総滞留水量 = 0.02 (m) x 54000 (m<sup>2</sup>) = 約1000 (m<sup>3</sup>)

# レゴリス活用

## 月レゴリス成分 1 tから得られる主な有用成分の一例 [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	0.083 Kg

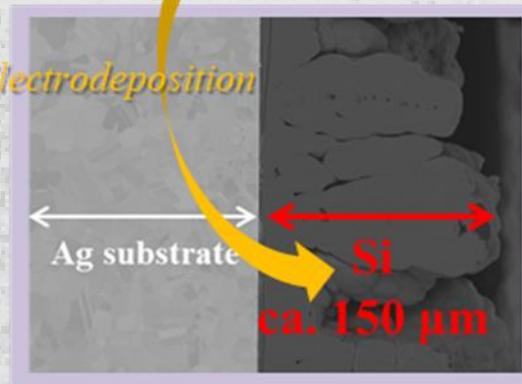
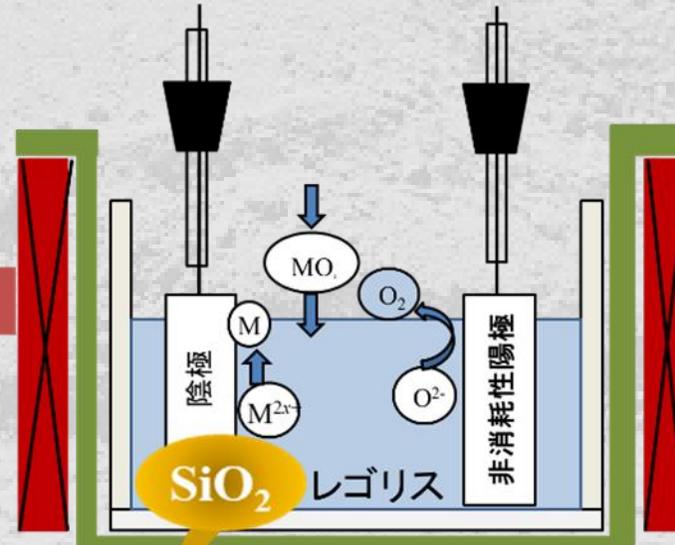


注) 常に上記の量ではない

# 電解による分離回収方法



珪酸 $\text{SiO}_2$ を用いた地上実験の例



シリコン析出の地上実験例

電解電位で選択回収が可能

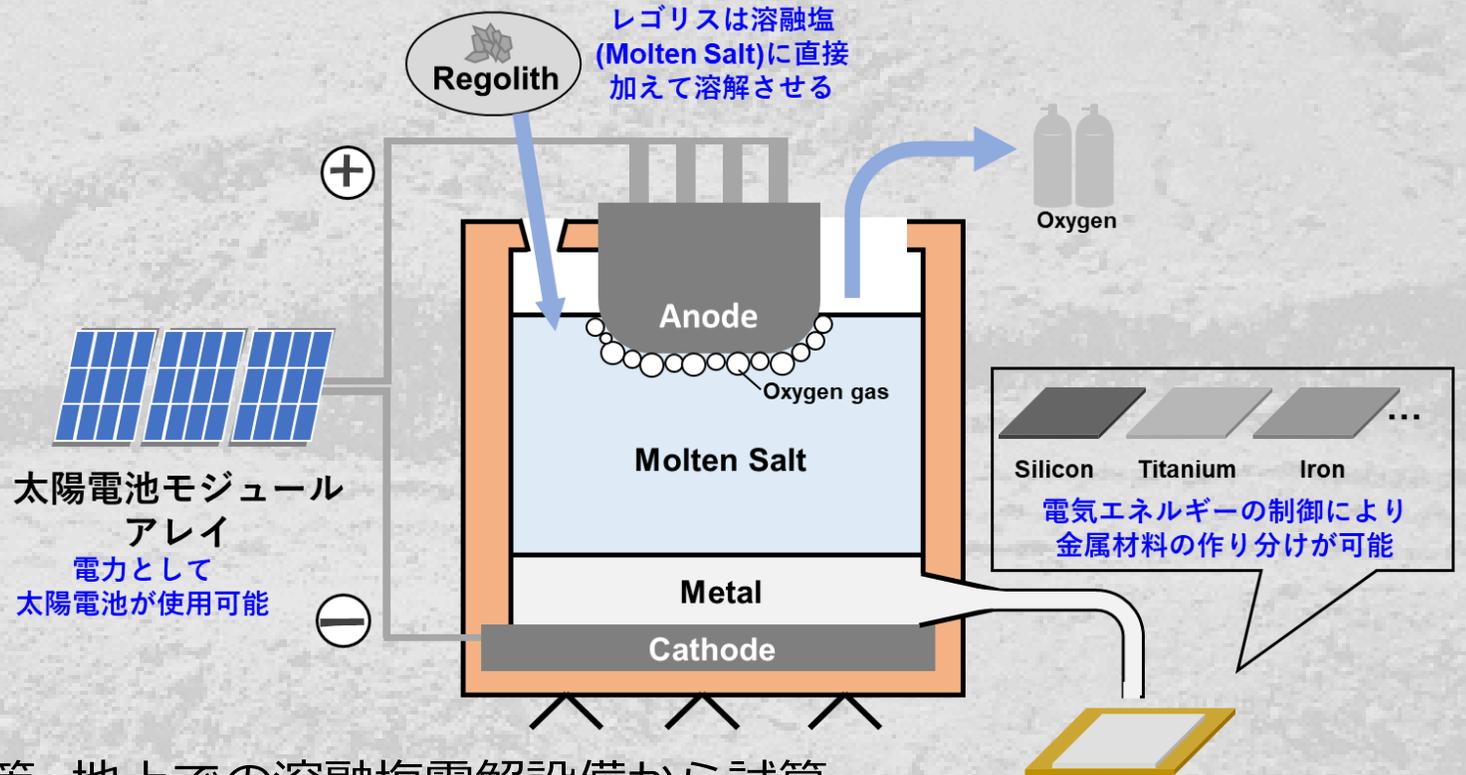
Oxide	-E (V) vs. oxygen evolution
$\text{SiO}_2$	<b><u>1.757</u></b>
$\text{Al}_2\text{O}_3$	2.173
$\text{FeO}$	0.987
$\text{CaO}$	2.592
$\text{Na}_2\text{O}$	1.117
$\text{MgO}$	2.379
$\text{BaO}$	2.202

各種酸化物の分解電位

# 電解に要するエネルギー試算

- レゴリスから理論的に元素を回収するために必要な総エネルギー

- 酸素 1 t 20,000 ~ 25,000 kWh
- 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

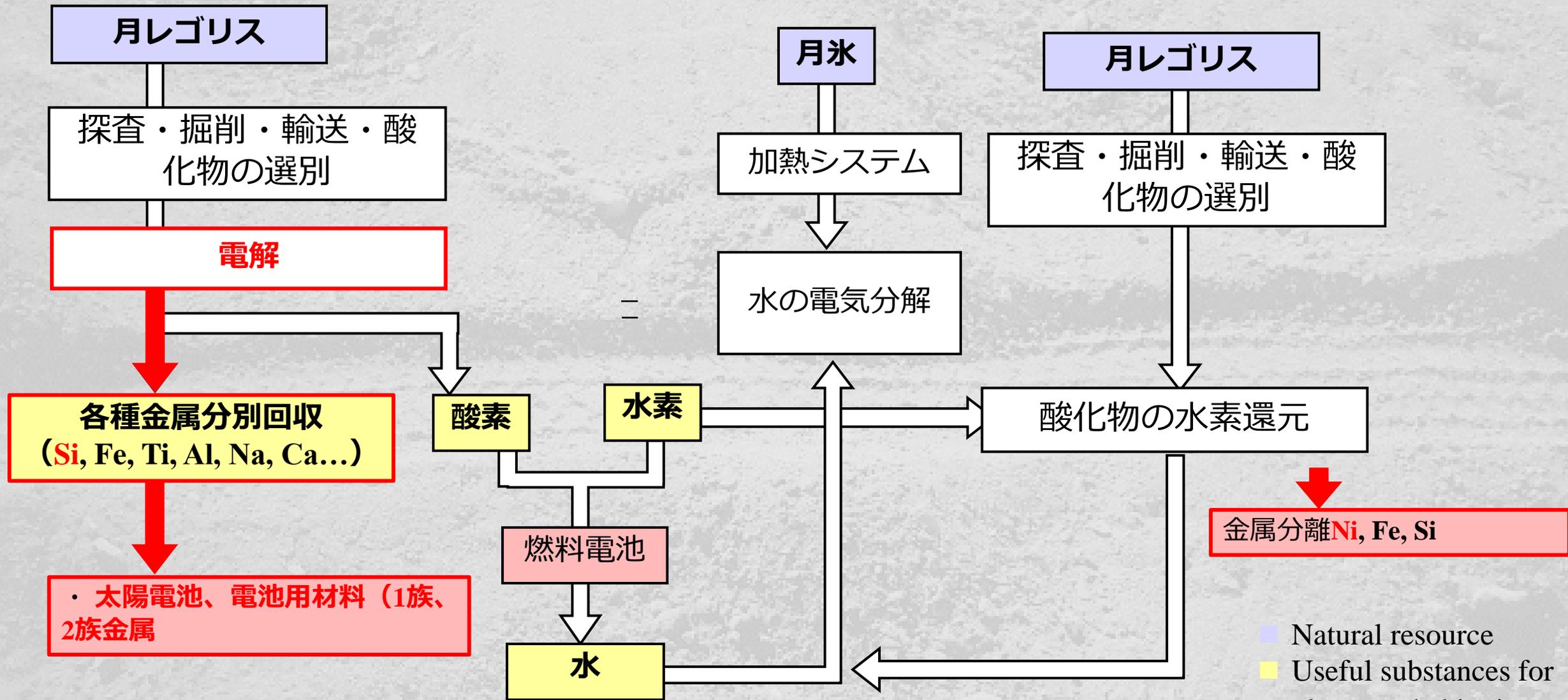


酸化物の理論分解電圧+電気炉エネルギー等+地上での熔融塩電解設備から試算  
理論分解のみ考慮すれば、上記の1/3程度のエネルギーで回収可能

更に水素還元と組み合わせると・・・

22000円/kWhとすると鉄1tonは1億円  
・・・1kgを10万円で運んでも1億円  
⇒その場資源の活用は必須！

# 資源その場利用の電解と水素還元を組み合わせたスキーム



酸化物を水素還元で還元できない酸化物を電解で還元

水素の利活用 ➡ 水の生産と電気エネルギー消費軽減に寄与が期待

- Natural resource
- Useful substances for planetary habitation
- Energy supply

# 地球一月間輸送

## 地球一月間輸送経済を考える上でのポイント

- ✓ 派生的需要 → 輸送サービスの詳細は月面における経済活動に大きく影響を受ける
- ✓ ロケット/軌道間輸送コストが物/人流サービスコストに対して大きい  
→ 民間企業だけでは市場自由競争が起こりにくい状態になると推測される。  
(市場競争で生じる埋没費用が大きい)

Moon Village勉強会でのアンケートでも1人当たりの輸送運賃は1000万円オーダーの希望が最多

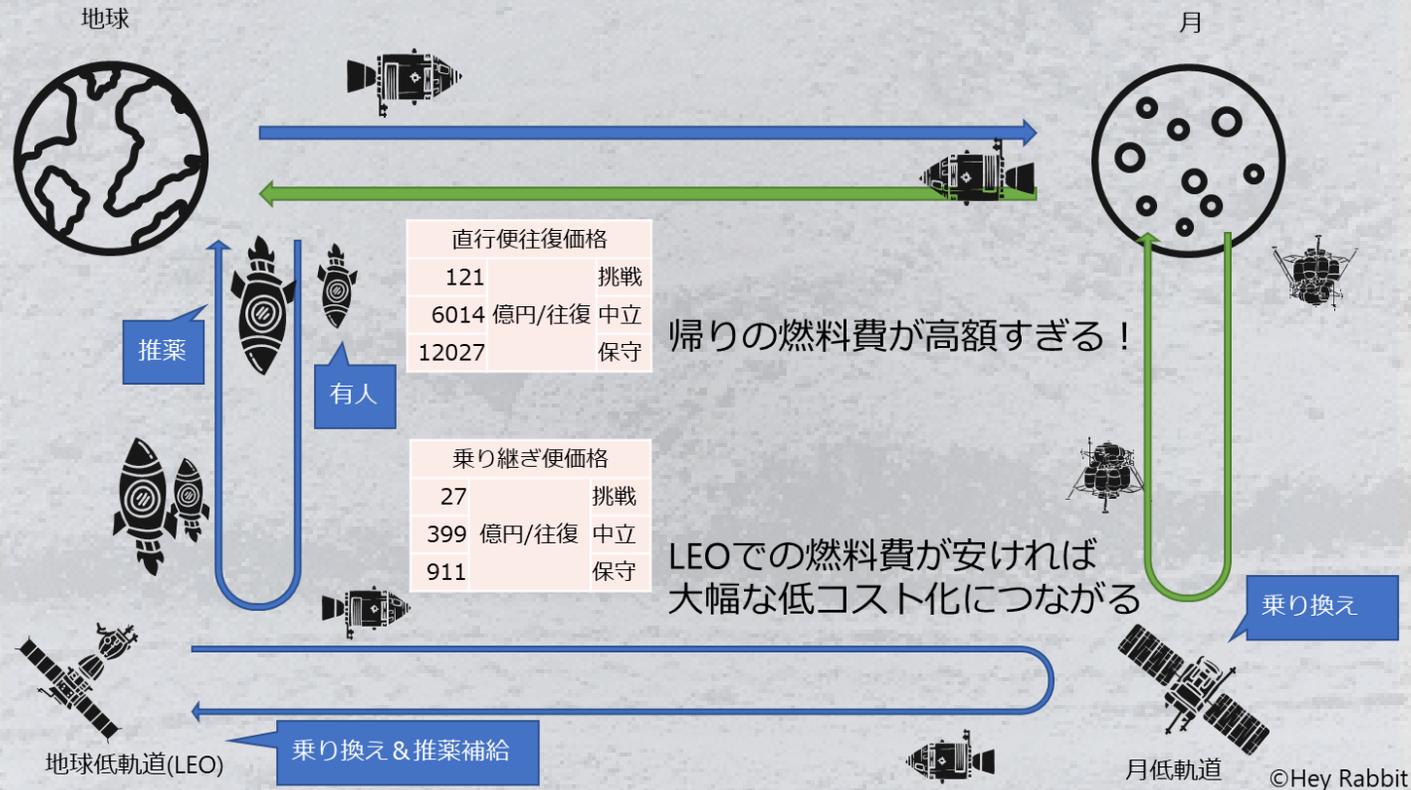
➡ この輸送希望額ですら、サービスコストに対して輸送コストが大きい

## アーキテクチャ検討の重要性: 市場への公的介入も含めた輸送開発戦略の礎

今回、右表をパラメータに輸送コストを評価した。  
(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 $\Delta V$ に依存とした)

項目		値
価格		
機体使用料	大型機 (荷物100ton/構造400ton)	1/50 億円/回
	小型機 (荷物5ton/構造20ton)	0.1/5 億円/回
地上での推進薬価格	10/50/100 万円/ton	
LEOでの推進薬価格	0.07/0.3/1 億円/ton	
月面での推進薬価格	0.1/5/10 億円/ton	
必要増速度 $\Delta V$		
地球~地球低軌道		10546m/s
地球低軌道~月低軌道		7980m/s
月低軌道~月		3360m/s
地球~月		13580m/s

# 地球一月間輸送



## 検討の結果

直行便: 5tonの輸送に最も楽観的な試算においても121億円 (25人乗りでも一人5億円程度)

燃料補給有: 楽観的な試算で27億円

※定常的な輸送機の運用及び輸送需要があると仮定した上での経路比較

輸送経路によって登場する輸送機の規模やコストが大きく変化することが分かった本検討を礎に、今後はサンクコスト (必要な輸送ロジスティクス全体の初期開発/整備費用) や月面輸送需要などの観点から、地球-月輸送に関する我が国の開発戦略提言などに繋がることを期待したい。

## まとめ

- **1000人の定住者，年10000人の観光客が月面に存在する社会**を想定して検討を進めた。
- ムーンビレッジの意義をより大きくするには，**省人化可能な都市構造を構築**する，もしくは**より大きな人口の必要性**が示された。
- ムーンビレッジを維持するために必要なコストは楽観的な仮定をおいてもなお，**非常に大きく現実的な解を見つけるのは困難**であることが示された。
- 一方で，移住のモチベーションとして快適さは重要であると考えており，**理想と現実の乖離を埋める分野を横断した問題解決方法の提案**など，既存の枠にとらわれない検討が重要であると考えている。