

宇宙開発の未来共創2023

民間主導の月経済圏の実現に向けて
フロンティアビジネス研究会公開シンポジウム

月面インフラWG発表資料

2023/6/22

月面インフラWG

1. 自己紹介
2. インフラ構成要素の洗い出し
3. インフラ構築のシナリオ、時系
4. 19~20世紀の電力インフラの例
5. 電力インフラの将来像
6. 通信インフラの将来像
7. 建築物の将来像
8. 未解決の論点
9. 最後に（検討を振り返って）

将来像検討グループのうちの1つとして、今後月面で必要となるインフラ(公共サービス)を検討

月面インフラWG

(リーダー：三菱電機 & 大林組)

月面で今後必要となるインフラ(公共サービス)を検討するWG

- ・ 月面における通信や電力の在り方の検討
- ・ 月面基地の運用管理システムの検討

月面生活 WG(その1)

(リーダー：蘆田暢人建築設計事務所)

今後月面上で想定される人々の暮らしを検討するWG

- ・ 月面での生活を軸にした検討。労働者はどのような暮らしをしているのか、宗教施設はあるのか、など
- ・ 内装設計、家具什器、インテリアなどの月面空間の具現化に向けた検討なども行い、成果はビジュアルに表現

地球-月経済圏・SDGs WG

(リーダー：MRI & 横河電機)

地球-月が一体となった経済圏がどのように発展し、地上の人々にどのような影響があるのか検討を行うWG

- ・ 月面経済圏を形成する産業の検討
- ・ 地球-月経済圏で地上の生活に還元する価値を検討
- ・ 宇宙開発とSDGsとの関係性、宇宙をSDGsの観点から捉え、地上での生活とひもづけられるようなサービスや施策を考案・実施

月面生活 WG(その2)

(リーダー：JAMSS & SSD)

月面上での人々の安全な暮らしを検討するWG

- ・ 放射線被ばく防護、居住区内でのQOL向上、廃棄物処理等の検討

◆参加企業(アイウエオ順、敬称略)

- 宇宙システム開発株式会社 (SSD)
- 株式会社大林組
- 株式会社きんでん
- KDDI株式会社
- 株式会社JSOL
- スカパーJSAT株式会社
- 西村あさひ法律事務所
- 三菱ケミカル株式会社
- 三菱電機株式会社
- 有人宇宙システム株式会社 (JAMSS)
- ヨシモトポール株式会社

◆WGリーダー自己紹介

- 氏名：平瀬 貴志
- 所属：三菱電機株式会社 宇宙システム事業部
宇宙営業第二部第一課
- 来歴：2016年度入社
2019年度に現所属に異動後
フロンティアビジネス研究会に参加

◆サブリーダー紹介

- 氏名：小田 観世
- 所属：株式会社 大林組
原子力本部企画管理部 新領域課

検討初期にはまずインフラの構成要素として想定されるものの洗い出しを実施した。

インフラの構成要素は以下のように月特有/宇宙特有、施設、無形のものの3つの観点でグルーピング

月特有/宇宙特有の観点

L N	インフラ
1	対デブリ防御
2	放射線防御
3	エネルギー
4	空気
5	レゴリス対応
6	越夜対策
7	脱出手段
8	故障検知、自動点検
9	宇宙状況監視
10	極域への対応
11	月GPS
12	熱環境(空調、外殻)

施設の観点

L N	インフラ
1	電力
2	通信手段
3	避難施設
4	研究施設
5	居住施設(飛行士向け)
6	居住施設(一般滞在者向)
7	ECLSS
8	電子基準点
9	食料生産・貯蔵・調理
10	宇宙港
11	病院
12	ジム
13	老人ホーム
14	エンタメ施設

無形のもの

L N	インフラ
1	地図・地形情報
2	緊急警報
3	インフラ稼働状況
4	健康状態、精神状態
5	緊急事態対応
6	資源の所有権・利用権
7	地形による影響
8	地質情報
9	環境情報
10	地産地消可能性
11	社会制度・資格
12	設計基準(宇宙用ベース)
13	設計基準(地上ベース)
14	お金・税金
15	共通的な文化

3

インフラ構築のシナリオ、時系列

各インフラの月面社会の規模に応じた必要性、発展シナリオを検討。その際には以下の整理を参照した。

- ① 国際宇宙探査協働グループ(ISECG)が公開している国際宇宙探査ロードマップでのフェーズ分類
- ② 2021年度までのFB研究会将来像WGによる各分野のSTEPの整理

社会の規模	国際宇宙探査シナリオ		将来像WG検討					
	フェーズ分類	想定されるH/W	資源・エネルギー	建設・居住	情報・通信インフラ	エンタメ・観光	食品・農水産業	輸送・交通
0人	フェーズ1 大型インフラなし	<ul style="list-style-type: none"> 有人宇宙船/有人着陸機 非与圧ローバー/宇宙服 小型着陸機 / 無人探査機 	探査 採掘・採取	適地選定	通信・測位網設計			
~10人	フェーズ2A 持続的な月面活動のフェーズへ移行	<ul style="list-style-type: none"> 小型与圧ローバー/作業ローバー 物資補給船/中型貨物着陸機 通信システム/電力システム ISRU試験工場 	運搬・保存	建材製造・輸送	通信・測位網整備			月地球間輸送
	フェーズ2B 長期居住実証とISRU構築に注力	<ul style="list-style-type: none"> 長期滞在モジュール 再使用型有人着陸機 原子力発電システム ISRU工場 	利用・消費	有人インフラ整備	通信・測位サービス提供			
100人	フェーズ3 持続的かつ活発な月面活動が行われる基盤を構築	<ul style="list-style-type: none"> 有人ホッパー ※フェーズ3の詳細検討はISECGの検討スコープ外	廃棄・再利用			通信・測位サービス活用	ニーズ把握	栽培・生産
1000人	フェーズ4(仮称) 経済圏の確立		高度化	環境改善	高度化	インフラ整備	加工	高度化・小型化
						サービス提供	消費	
					高度化	地球への還元/月面でのリサイクル		

前項を参照つつ、各フェーズでどれだけの段階のインフラが必要であるか検討

人数によらず実用的のものが必要なインフラと、社会の規模に応じて発展していくインフラに大別される。

月特有/宇宙特有の観点

L N	インフラ	居住者数		
		十人	百人	千人
1	対デブリ防御	○	◎	◎
2	放射線防御	○	◎	◎
3	エネルギー	○	◎	◎
4	空気	○	◎	◎
5	レゴリス対応	○	◎	◎
6	越夜対策	○	◎	◎
7	脱出手段	○	◎	◎
8	故障検知、自動点検	○	◎	◎
9	宇宙状況監視	○	◎	◎
10	極域への対応	○	◎	◎
11	月GPS	△	○	◎
12	熱環境(空調、外殻)	○	◎	◎

施設の観点

L N	インフラ	居住者数		
		十人	百人	千人
1	電力	○	◎	◎
2	通信手段	○	◎	◎
3	避難施設	○	◎	◎
4	研究施設	△	○	◎
5	居住施設(飛行士向け)	○	◎	◎
6	居住施設(一般滞在者向)	△	○	◎
7	ECLSS	○	◎	◎
8	電子基準点	△	○	◎
9	食料生産・貯蔵・調理	△	○	◎
10	宇宙港	-	△	○
11	病院	-	△	○
12	ジム	-	△	○
13	老人ホーム	-	△	○
14	エンタメ施設	-	△	○

無形のものゝの観点

L N	インフラ	居住者数		
		十人	百人	千人
1	地図・地形情報	○	◎	◎
2	緊急警報	○	◎	◎
3	インフラ稼働状況	○	◎	◎
4	健康状態、精神状態	○	◎	◎
5	緊急事態対応	○	◎	◎
6	資源の所有権・利用権	△	○	◎
7	地形による影響	△	○	◎
8	地質情報	△	○	◎
9	環境情報	△	○	◎
10	地産地消可能性	-	△	○
11	社会制度・資格	-	△	○
12	設計基準(宇宙用ベース)	○	◎	◎
13	設計基準(地上ベース)	△	○	◎
14	お金・税金	-	△	○
15	共通的文化	-	△	○

凡例：- インフラなし、△実証段階、○実用段階、◎高度化

19~20世紀の電力インフラ形成過程の分析の例を参照

作用する要素を6つのアクターに分類し、インフラ構築を科学技術と社会の相互作用の結果として捉える

参考文献：

- Hughes, T. P. (1983). Networks of power: Electrification in Western society, 1880-1930. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press. 邦訳, T・P・ヒューズ (1996) 『電力の歴史』 市場泰男訳. 平凡社.
 - 科学技術史として19世紀後半~20世紀前半の電力システムの成立過程を扱い、近代の巨大システムの発展パターンを分析

考え方：

- “アクター”の分類。物理的人工物、組織、科学的な要素、法的人工物、資源、人間
- 発明⇒開発⇒技術革新⇒移転⇒成長⇒競争⇒安定、のフェーズ分析
 - 開発のフェーズでは「システム」への統合が発生。(ex.エジソンの場合、競合するガス灯会社と対抗、電気事業法と折り合いをつけながら事業化)
 - 技術革新の段階では、製造、セールス、サービスが重要となる。(ex.安定したシステムの確立のため、発電機、電球の供給体制が求められる)
 - 後半の段階では一定の需要が必要。⇒小規模な発電所は消費地が狭く変動大⇒電力会社、電力システムの統合が発生
- システム全体の発展を妨げる、解消すべき「逆突出部」の概念
 - 高効率の電球の発明、電力負荷安定のための交流モータの発明、などが寄与

電力インフラは社会の発展とともに機器、関係する組織・人間が**多様化**
一方で規格が統一され、より**統合的なアーキテクチャ**となるものと想定

	短期：10~100人規模の社会	長期：千人規模の社会
物理的人工物 H/W	発電手段： 太陽電池 、原子力電池 送電手段：無線、 有線 蓄電手段： バッテリー 、燃料電池	発電手段：太陽電池、 原子力電池 送電手段： 無線 、有線 蓄電手段：バッテリー、 燃料電池
組織	宇宙機関 民間企業（New Space、Old Space）	民間企業 （地上同様、多種の企業）
科学的な要素	日照条件 放射線 熱	日照条件 放射線 熱
法的人工物 S/W	<u>規格（各国、各事業者ごと）</u> 例：電気設備技術基準 宇宙用品質規格（有人安全）	<u>統一的な規格</u> ビジネスモデル
資源	太陽光・日照条件の良い地形 水（水素）	太陽光・日照条件の良い地形 水（水素）
人間	宇宙機関の研究者（宇宙飛行士） 企業の技術者、研究者（何をどうすれば） 利用者 ※初期は無人施工のため人間は少ない可能性	企業の技術者、研究者（施工要領の改善） 事業の経営者 サービス要員（人が対応しやすい） 利用者

発電施設と電力消費
地(居住区)が近い

電力需要は地上ベースとISSベースで10倍の開き。月ではその中間となるものと想定

国際宇宙ステーション(ISS)での電力供給量と地上(関東)での電力供給量から、月面での電力需要の概算を推定。

- ◆ ISSと地上では10倍の開きあり。1000人の月面都市はその間の数値となると想定。無人化が進んでいる場合には1人当たりの電力消費量はISSに近い数値となることを想定。
- ◆ 仮に中間であるとする1人あたり5kW程度。1000人の社会では5,000kWを供給する電力インフラが必要。
- ◆ 現在NASAは大型太陽電池パネル（10kW級）や原子炉（40kW級）を検討。太陽電池パネルであれば500基、原子炉であれば125基設置が必要。

①宇宙ステーションベース

- 国際宇宙ステーション(ISS)の発電量は75~90kW、8つのソーラーアレイによる供給
- 居住人数は6人。一時的には9人
⇒電力需要は、1人あたり10kW

ISSの電力の大半は設備(実験機器含む)の維持に消費されていることや、マージンが設定されていることにも留意。

②地上ベース

- 2015年度の東京電力のデータでは、人口4,503万人に対し最大で4,957万kWの電力を供給。また、設備の最大供給能力は6684.5万kWとなる。
⇒電力供給は1人あたり約1kW~1.5kW
- 参照：
<https://www.tepco.co.jp/corporateinfo/illustrated/business/business-scale-area-j.html>

初期は月-地球の1対1に近い通信がメインだが、最終的には各自の端末を含めた多対他の通信に
通信形態に応じてプレイヤーは多様化しつつ、それらを統合する規格が重要

	短期：10~100人規模の社会	長期：千人規模の社会
物理的人工物 H/W	<p><u>周回衛星</u> <u>対地球の月面局（月面上の地上局）</u> 月面上の基地局 各人の端末</p>	<p>周回衛星 対地球の月面局（月面上の地上局） <u>月面上の基地局</u> <u>各人の端末</u></p>
組織	<p>宇宙機関 民間企業（New Space、Old Space）</p>	<p>民間企業 （地上同様、多種の企業）</p>
科学的な要素	<p>衛星軌道 不明な反射特性</p>	<p>衛星軌道 明確化された反射特性</p>
法的人工物 S/W	<p><u>各国、各事業者の通信規格</u> セキュリティ要求 ビジネスモデル</p>	<p><u>統一的な通信規格</u> セキュリティ要求 ビジネスモデル</p>
資源		
人間	<p><u>通信分野の技術者、研究者</u> 通信事業の経営者 利用者</p>	<p>通信分野の技術者、研究者 <u>通信事業の経営者</u> <u>利用者</u></p>

従来の宇宙の通信
(1対1)

特に基地局・端末につ
いての新規参入を想定

地上と同じ通信環境の維持のためには大規模なインフラが必要。月独自の通信利用の在り方にも期待。

- 現在の家庭用のインターネット回線速度は約100Mbps程度
 - 月面に共住する1000人が同時に上記の回線速度で地球と通信する場合（動画の視聴など）、100Gbpsの月-地球間の回線が確保されている必要がある。
 - JAXA国際宇宙探査シナリオでは月-地球間の通信回線に求められる容量として1Gbps（8Kの映像データ10ch分）との記載あり。
 - 月面の居住者が現在の地上と同じだけの通信量を消費する生活を実施する場合、単純にはJAXAが想定する回線を100セット用意する必要がある。
- ◆ なお、地上の通信量は過去20年間、年10%~20%の増加率で増加し続けている。
 - 2040年（17年後）における通信量は、小さく見積もると $1.1^{17}=5$ 倍、大きく見積もると $1.2^{17}=22$ 倍になると想定。
 - 通信に関して地上と同じ生活スタイルを維持する前提の場合、通信インフラはかなりの規模のものが要る
- ◆ 一方で、通信量の制約に適応する形での月ならではの生活スタイル・エンタメが考案されることにも期待
 - 地球から独立した月面内での配信サービスの誕生、ラジオの復権、等

初期は単一拠点かつ短期の滞在期間、長期には複数拠点化を想定
 当面は従来の宇宙基準(NASA安全基準)が適用されるが、将来的には新たな建築基準を想定

	短期：10~100人規模の社会	長期：千人規模の社会
物理的人工物 (H/W)	小規模、短期的な建造物 <u>一拠点</u>	大規模、長期的な建造物 <u>多数の拠点</u>
組織	宇宙機関 限られた民間企業	より多様な民間企業
科学的な要素	不明な点も多い 温度条件、放射線（宇宙天気）、隕石	ある程度解明された 温度条件、放射線（宇宙天気）、隕石
法的人工物 (S/W)	<u>有人安全（宇宙機の品質基準ベース）</u> <u>滞在制限</u> 保険	<u>建築基準（地上の法令ベース）</u> 防火性、危険物貯蔵 保険
資源	地球から輸送したもの	地球から輸送したもの +月で得られるもの（レゴリス等） <u>縦孔</u>
人間	宇宙機関の研究者（宇宙飛行士） 企業の技術者、研究者	研究者 企業の技術者、研究者 施設の運営者（経営者） 一般企業の従業員(エンタメ、観光)、旅行者

NASA安全審査は強力な規制

放射線防護の限界

要求事項	詳細
防火性	<ul style="list-style-type: none"> 日本の建築基準法は防火関係が厳しいが、木造建築が多いことに起因 <ul style="list-style-type: none"> ▶ 月面上の建造物の場合はまた異なると想定 材料からのアウトガスについては、現在の宇宙用基準ではアウトガス評価の基準あり 地球上の建築では屋外で露出するケーブルは耐火・防火の規定あり。月面でも電線・ケーブルの被覆に関する規定が必要。
危険物貯蔵	<ul style="list-style-type: none"> 将来的に着陸機は再使用・往還型となると想定。その場合、推薬を貯蔵する施設が必要となる。 貯蔵量と非常時の爆発力に応じた防護壁が必要。
放射線対策	<ul style="list-style-type: none"> 旧居住WGでは放射線の遮蔽は重要課題として識別。 レゴリスの層で埋めて放射線から守る場合、1.5m程度の厚みが必要。密度によっては更に厚みが必要。 <ul style="list-style-type: none"> ▶ 厚みをもった建造物は難易度が高く、縦孔が利用できることが望ましい。 ▶ 十分に防護できない場合には滞在期間の制限など、運用でのカバーを考えざるを得ない。 原子力発電を想定すると居住区のための処置が必要。居住区と発電区画は十分に離れている必要あり。
用途地域	<ul style="list-style-type: none"> 居住区とその他のエリアは区別し、安全のために分散配置させることを想定。 どこに何を設置してよいか（またはダメか）、用途地域が定義されることを想定。
居住空間	<ul style="list-style-type: none"> 人間が快適に暮らせる居住空間を確保することが必要。NASAの有人基準にも規定あり。 ISSの与圧部容積は916m³、6人居住の場合は150m³/人。⇔6畳一間は約20m³

- 電力供給手段としての原子力の可否
 - 太陽電池のみでの発電にはどこかで限界点があること想定。
 - 「夜間」の発電ができないことが課題。日照率の高いエリアは限られており争奪戦となる。
 - 居住区の安全性確保と合わせて検討要。
- 直流vs交流
 - 地上では20世紀初頭に論争。長距離送電でのロスが小さい交流に軍配
 - 月面での活動が活発化すると長距離送電の需要が増える
- 有線送電vs無線送電
 - 必要リソースと効率、送電距離からどこかに損益分岐点があると想定。
- 放射線対策
 - 前項のとおり、構造物に厚みが要求されてしまうことが課題。人工的に孔を掘ることや自然の縦孔を利用することを視野に入れる必要あり

- 本WG活動の中で、個別のインフラH/Wの検討だけでなく、インフラをとりまくS/Wも含めた検討を実施。
S/WとH/Wの相互作用の結果としてのインフラ、との視点を得た。
 - 検討深化のためにはインフラがどのように利用されるかの検討が必要。月面生活WG等の活動との横通しが重要。
- 月面・月近傍空間での経済圏が成立するためには多様なプレイヤーの参画が必要。多様なプレイヤーが参画できるためにはインフラのS/W面の整理も必要。
- 地上の生活スタイルをそのまま月に持っていくことは、インフラH/Wの観点では難易度が高い。
 - 月ならではの生活スタイルの確立も期待される。生活スタイルの確立は経済圏の確立、更には“文化”の成立につながる。