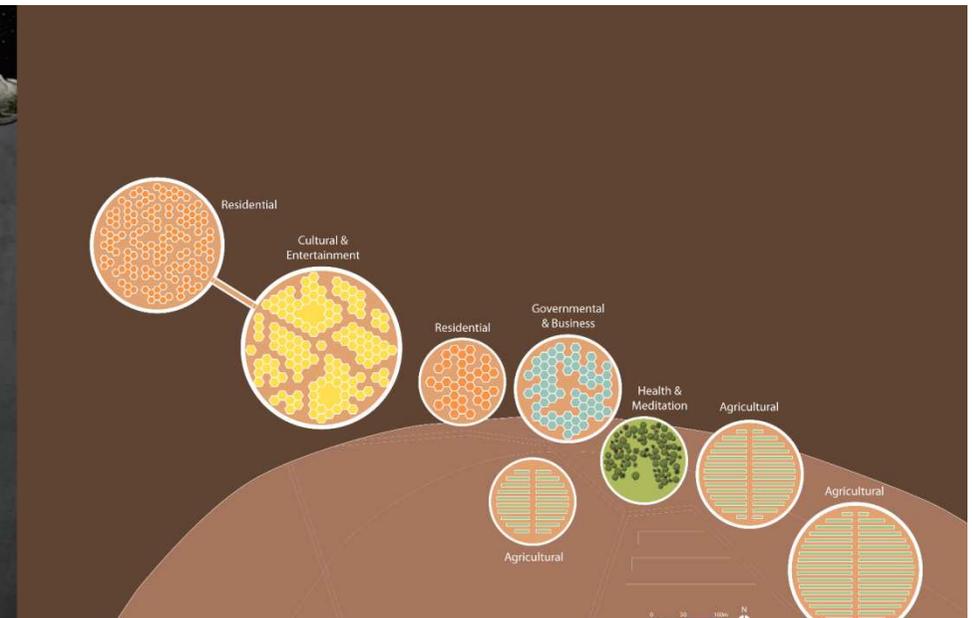
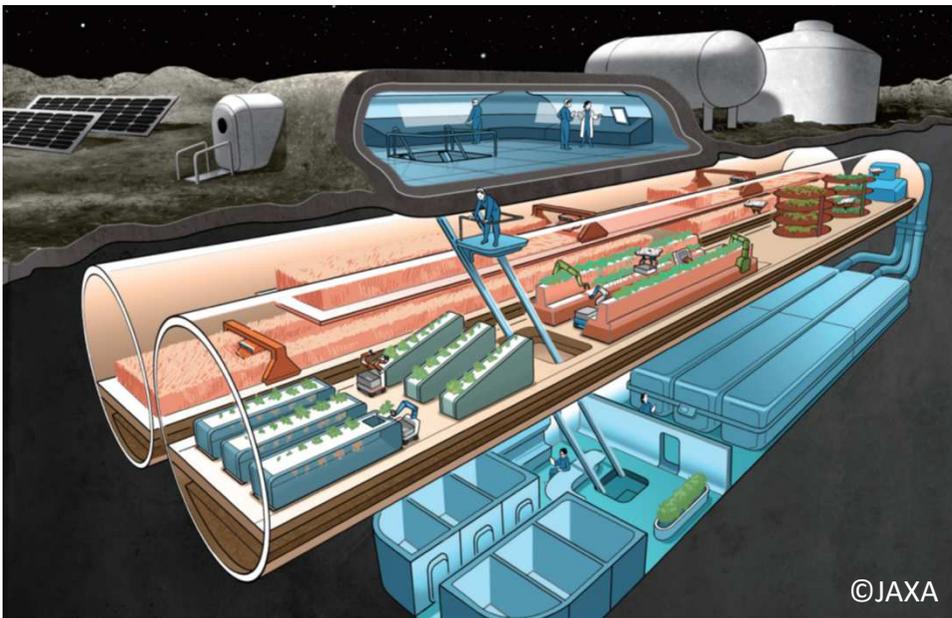


「宇宙に暮らす」をデザインする

宮嶋宏行 国際医療福祉大学

Bioastronautics Lab.



内容

- 自己紹介と研究分野
- ハンドブック、リファレンスマッション
- 「宇宙に暮らす」をデザインする方法
- デザイン例
 - 月面農場（6人, 10年～）
 - 月マリウスヒル縦孔拠点（100人, 30年～）
 - 火星コロニー（1000人, 40年～）
 - 火星都市国家（100万人, 400年～）

自己紹介と研究分野 「宇宙惑星居住」



1992年～1996年 閉鎖生態系モデル化

1997年～2008年 閉鎖型生態系実験施設運用

2009年 宇宙居住設計(CU)、宇宙ロジスティクス(MIT)

- 有人月面着陸船の設計（コロラド大学ボルダー校のDavid Klaus教授）
 - 国際環境システム会議の宇宙教育セッション（2009年）
- カナダの無人島で宇宙ロジスティクスの研究（MITのde Weck教授）
 - 日本航空宇宙学会第40期年会講演会（2009年）パネルディスカッション「宇宙探査の将来展望」
「研究費をたくさん使わなくても、砂漠で探検ごっこをやるような方法もある（JAXA/ISAS稲谷教授）」

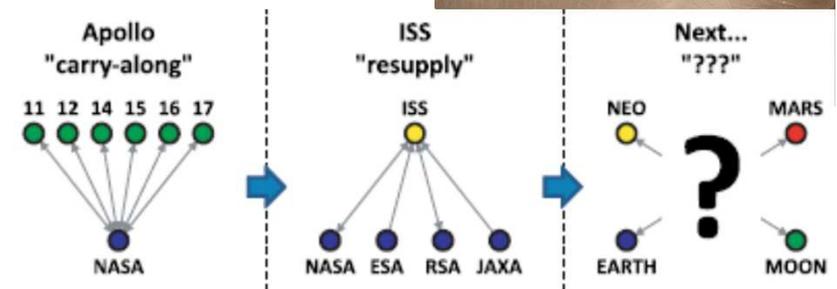


Fig. 1 Space logistics paradigms.

T. Ishimatsu, Journal of Spacecraft and Rockets, 2016

2013年 コロラド大学ボルダー校宇宙航空生物学グループ滞在 2014年 火星砂漠研究基地居住実験参加 Mars Society I, Team Nippon

Space Habitat Design シラバス

- 有人宇宙飛行と現在のプログラムの紹介、有人ミッションの目的
- 宇宙環境 - 軌道、惑星、NEO
- 人間の生理学
- システムエンジニアリングと設計フェーズ、機能配分
- 宇宙機のエレメントの定義とサイジング
- 環境制御・生命維持システムと実現技術
- リスクマネジメント
- サブシステムのインテグレーションとインターフェイスの定義
- 設計評価/製造/運用

2つのテーマで2014年3月1日から3月15日までの2週間居住実験

- 火星居住のための日本食の研究 (片山)
- 惑星表面探査におけるロジスティクス (宮嶋)



審査委員

- NASA
- 航空宇宙産業
- 大学教員、元宇宙飛行士 (大学所属)

宇宙惑星居住デザインのグループワークテーマ

- 地球-月間の長期滞在型拠点 (RASC-AL 2014)
- マーズフライバイミッション (IM国際学生設計コンテスト)



- Klaus, D., Academic Principles of Human Space Habitat Design, SAE 2009-01-2547, 2009.
- 宮嶋宏行, 第39回国際環境システム会議 (ICES2009) 報告 一 有人宇宙システム開発と大学教育・研究 一, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 58, No. 673, pp. 56-58, 2010.
- de Weck, O. L. and Simchi-Levi, D., Haughton-Mars Project Expedition 2005, NASA, Technical report TP-2006-214196, 2006.

2014年 Inspiration Mars国際設計コンペ参加, 優勝

2016年 Gemini Mars国際設計コンペ参加, 準優勝

2017年~2019年 JAXA宇宙探査

イノベーションハブ月面農場WG

2019年 Mars Colony Prize

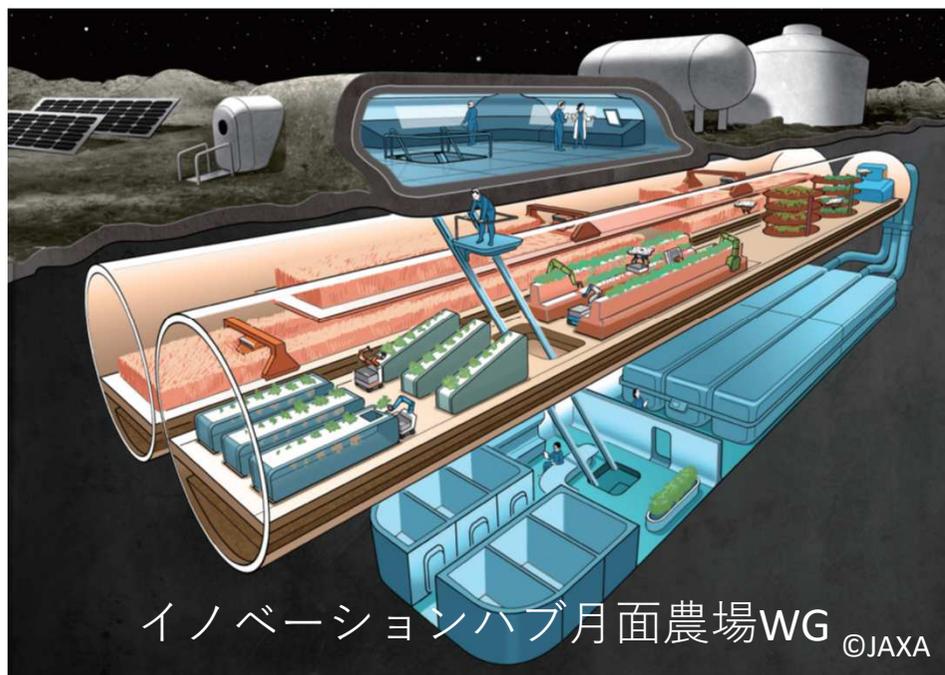
-Design the First Human Settlement on Mars

セミファイナリスト (Mars Colonies出版)

2020年 日本航空宇宙学会Space Vision2050増補版

「人間が定住する月面拠点の建設」

2020年 Mars State City Design Competition



Mission Overview

Crew	2
Duration	501 days
Mass	33 metric tons
Volume (pressurized)	70 m ³ (~ space shuttle cabin)
Cost	\$ 4.4 Billion

TMI
Jan. 4, 2018
 $\Delta V = 4.86 \text{ km/s}$

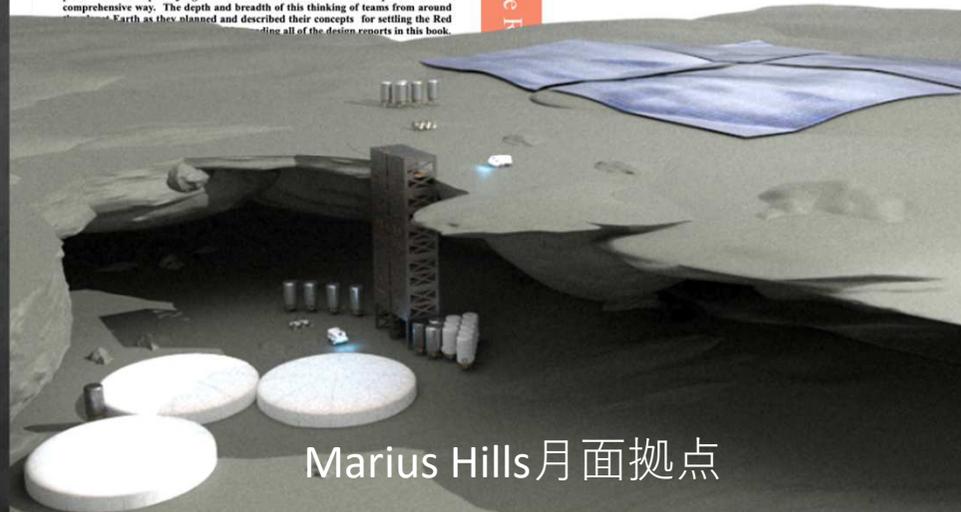
ERV Dragon 4.2 mT 10 m³
MTH MPLM 12.4 mT 49 m³
SM ATV 15.2 mT 7 m³



In Fall 2018, The Mars Society offered a prize for the best design and description of a 1000 person colony on Mars. The twenty page plans had to account for the colony location and design, the economic success of the colony, the socio/cultural environment, the governance processes, and the aesthetics of living on Mars. One hundred teams from around the world responded with their proposals. This book presents 22 of the plans judged to be the best to address all these requirements in a comprehensive way. The depth and breadth of this thinking of teams from around the world as they planned and described their concepts for settling the Red Planet are all of the design reports in this book.

MARS COLONIES: Plans for Settling the Red Planet

MARS COLONIES
Plans for Settling the Red Planet



Marius Hills月面拠点

ハンドブック, リファレンスミッション

- Handbook

- NASA Space Flight Human-System Standard, NASA-STD-3001, 2014. (初版1987年)宇宙ステーション
 - Volume 1, Revision A: Crew Health
 - Volume 2: Human Factors, **Habitability**, and Environmental Health, NASA-STD-3001, 2014.
- NASA HDIH (Human Integration Design Handbook), NASA/SP-2010-3407/REV1, 2014.
- Advanced Life Support Baseline Values and Assumptions Document, NASA, TP-2015-218570/REV1, 2018. 生命維持システムベースライン
- Advanced Life Support Research and Technology Development Metric - Fiscal Year 2005, NASA/CR-2006-213694, 2006. 生命維持システムコスト評価

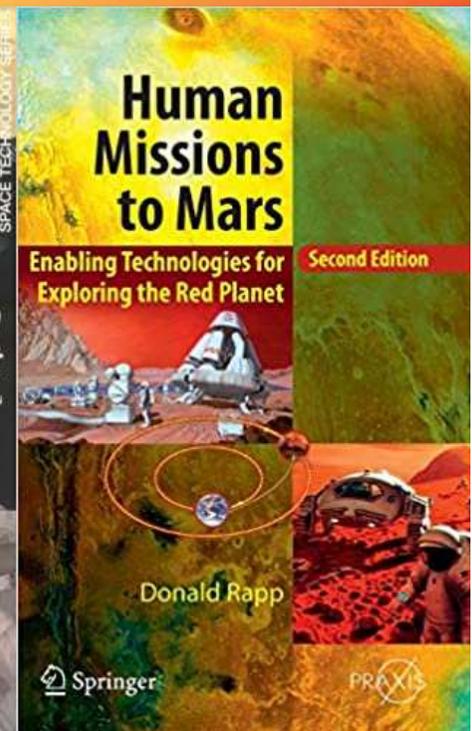
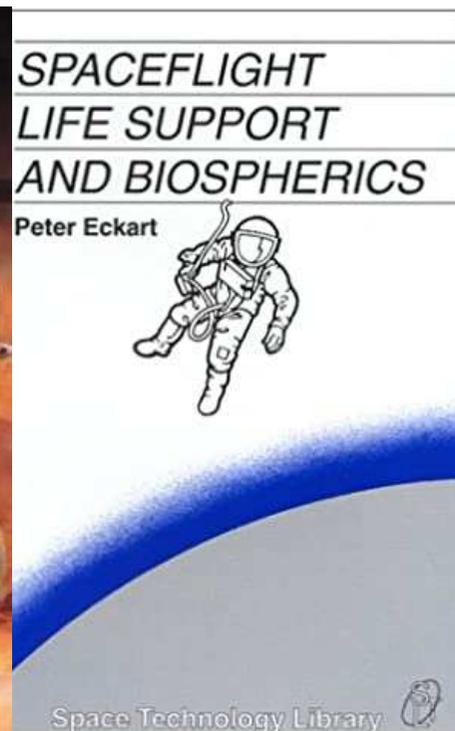
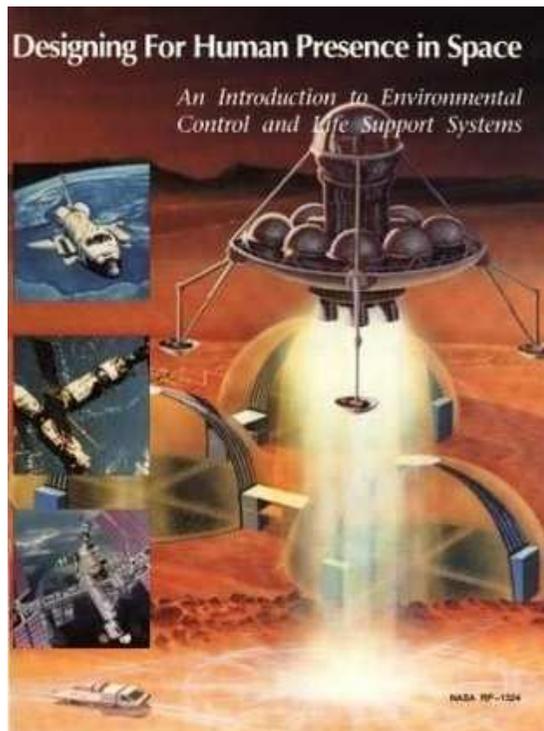
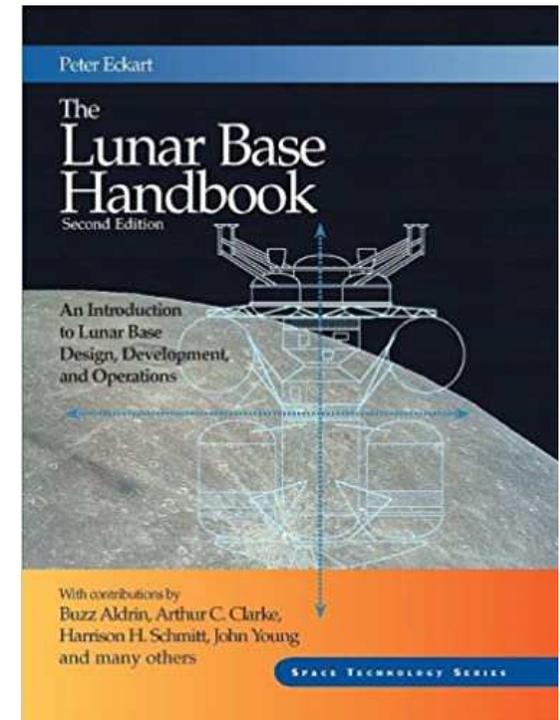
- 火星

- Human Exploration of Mars: The Reference Mission of the NASA Mars Exploration Study Team, NASA Special Publication 6107, 1997. **DRM3**
 - Reference Mission Version 3.0 Addendum to the Human Exploration of Mars: The Reference Mission of the NASA Mars Exploration Study Team, NASA/SP—6107—ADD, 1998
- Human Exploration of Mars Design Reference Architecture 5.0, , NASA 2009-06 DRA5.0, 2009 **DRA5**
 - Human Exploration of Mars Design Reference Architecture 5.0 Addendum, NASA 2009-06 DRA5.0 Addendum, 2009
 - Human Exploration of Mars Design Reference Architecture 5.0 Addendum #2, NASA/SP—2009-566-ADD2, 2014.

- 月

- NASA's Exploration Systems Architecture Study, NASA-TM-2005-214062, 2005. コンステレーション計画
- NASA's Lunar Exploration Program Overview, 2020. アルテミス計画

- Designing For Human Presence in Space, NASA-RP1324, 1994.
 - Appendix I, Update - Historical ECLSS for U.S. and U.S.S.R./Russian Space Habitats, NASA/TM-2005-214007, 2005. 宇宙滞在, 生命維持, ECLSS米口比較
- Spaceflight Life Support and Biospherics, 1996. 生命維持, 生物圏
- Human Space Flight: Mission Analysis and Design, 1999. 有人宇宙飛行ミッション分析と設計
- The Lunar Base Handbook: An Introduction to Lunar Base Design, Development, and Operations, 1999. 月基地ハンドブック
- Human Missions to Mars- Enabling Technologies for Exploring the Red Planet, 2007. 有人火星探査まとめ



宇宙に暮らす 1970年代2つのスタディ

10-week program in engineering systems design at Stanford University and NASA Ames Research Center

「人々がどのように宇宙で大規模に永久に生命を維持できるか？」 10,000人居住, 63ha農場

教授19人（工学・物理学・社会科学・建築家）、ボランティア3人、学生6人、技術ディレクター、副ディレクター2人

Richard D. Johnson, and Charles Holbow, Space Settlements: A Design Study, NASA-SP-413, 1977.

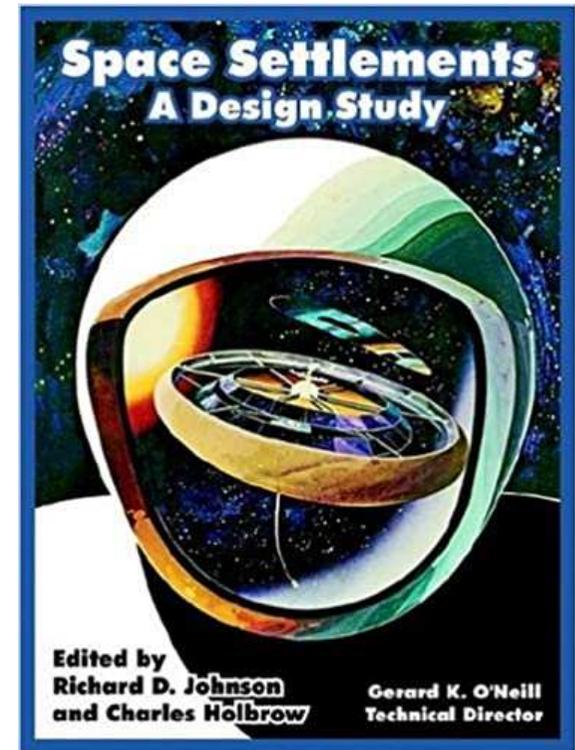
1977 Summer Study at NASA Ames Research Center

地球外資源を用いた宇宙居住と産業化

100人, 10,000人, 1,000,000人 → 10,000~100,000人
シニア研究者40人、学生10人、5グループ：

I. ECLSS、II. 宇宙居住・宇宙製造業、III. 宇宙製造業の資源に利用可能な小惑星の発見と解析、IV. マスドライバー（軌道間, 月, 小惑星）、V. 地球外資源利用化学プロセス

O'Neill, G. K., et al., Space Resources and space Settlements, NASA SP-428, 1979.



閉鎖居住実験施設

		'80	'90	'00	'10
				 LMLSTP (4) BIO-Plex 1995-1997 1999-2003	 ハワイ大学 HI-SEAS (6) 2013-
米国	 生物物理研究所		NASA 民間 NPO火星協会	Biosphere 2 (8) 1991-1995	MDRS (6) 2003-
ロシア	BIOS3 (3) 1972-1984			ロシア医学生物学研究所 Mras500 (6) 2007-	NASA SIRIUS 2017-
欧州				MELISSA 1994-2009-	ESA DRL  EDEN ISS 2015-2019
日本		環境科学技術研究所		CEEF (2) 1994-2007	
中国		北京航空航天大学			LP1 (4) 2014-



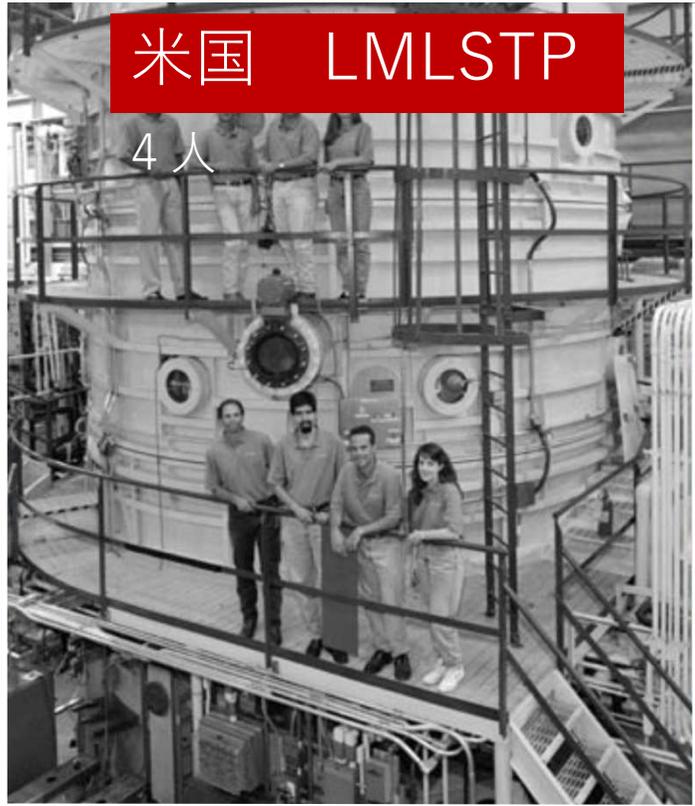
米国バイオスフィア 2

8人



米国 LMLSTP

4人



ロシア BIOS3

3人



熱帯雨林



地下のインフラ



海洋



IES閉鎖型生態系実験施設(CEEF)



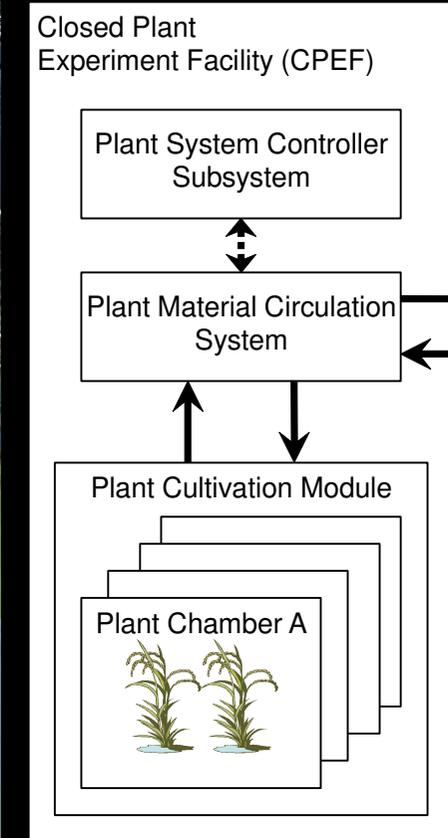
物質循環システム



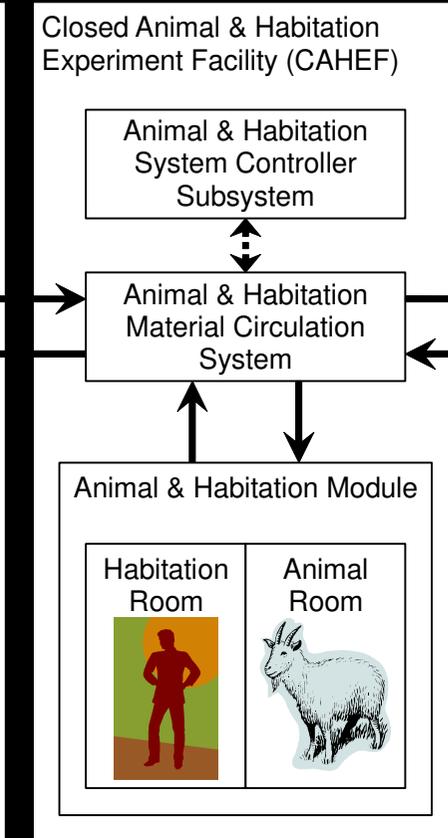
コントロールパネル



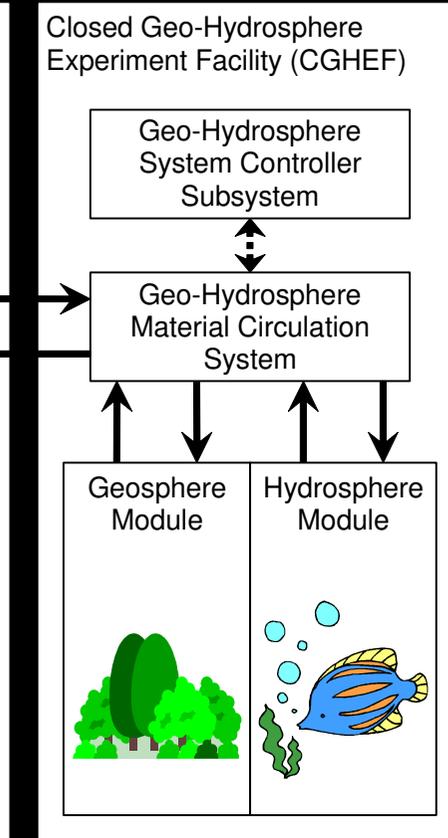
制御室



約30種の植物栽培



2人 ヤギ2頭



大豆栽培



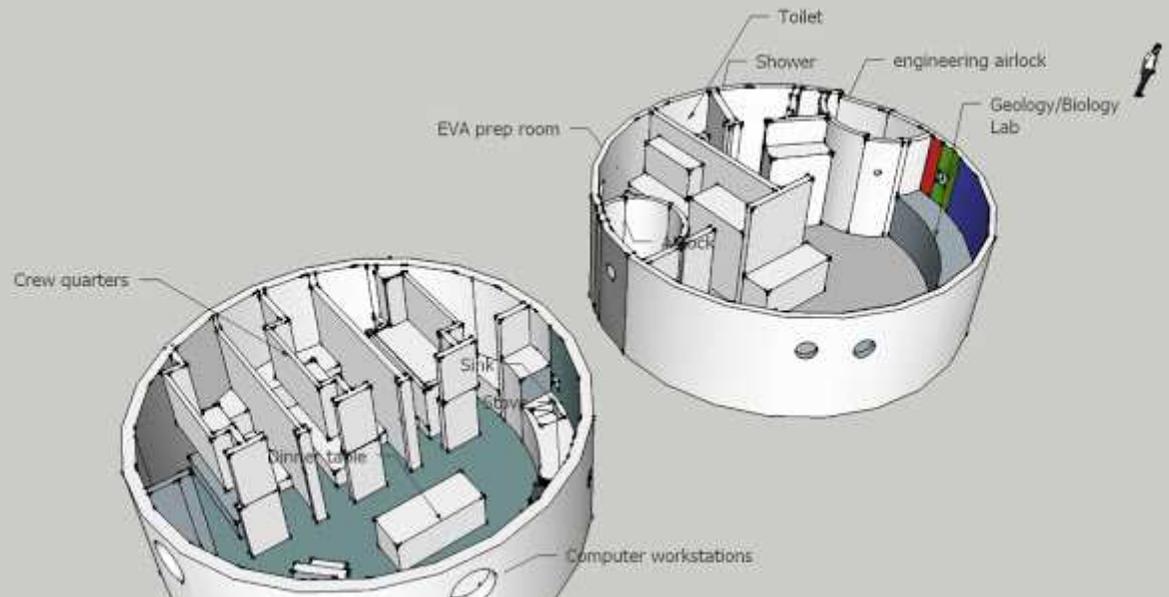
居室



ヤギ飼育ゲージ

火星協会米国ユタ州 火星砂漠研究基地MDRS

火星協会チームI (Crew 132) 2013年-2014年 2週間
南カリフォルニア大学, NASA ARC (企業), ミズリー工科大学, ノースカロライナ州立大学, コロンビア大学バーナードカレッジ, アイオワ大学
Team Nippon (Crew137) 2014年 2週間
名古屋女子大、名古屋大、宇宙システム開発



宇宙に暮らす

- ミッションデザイン 3つの視点
- 生命維持(ECLSS)とは？ 資源再生・現地資源利用
- 検討分野
- 機能配分
- 設計プロセス
- 宇宙惑星居住の検討事例 月と火星

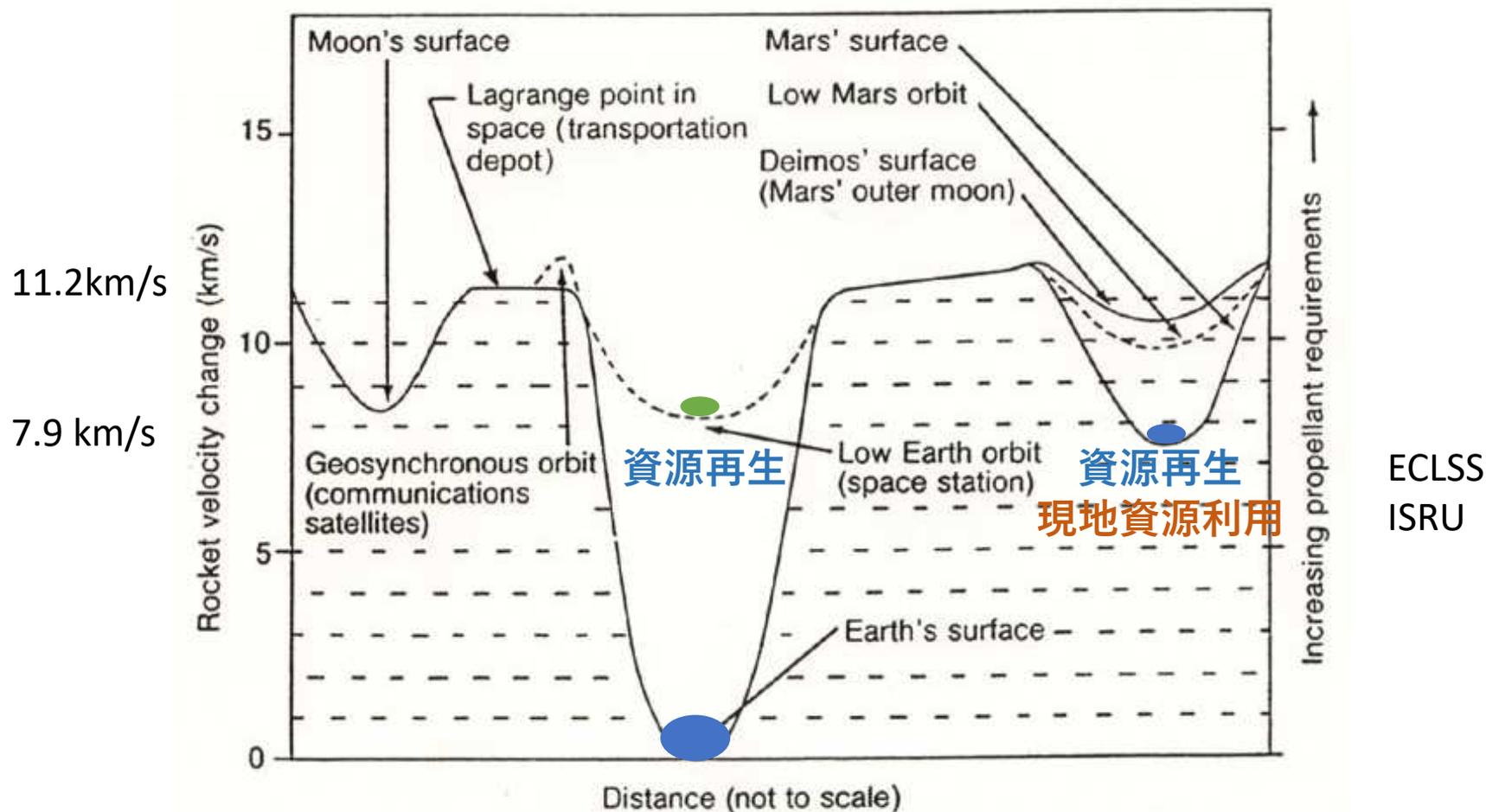
ミッションデザイン 3つの視点 場所(ΔV)・期間・人数

重力の井戸

月

地球

火星



M.J.L. Turner: Principles, Practice and New Developments, Springer (2009).

環境制御・生命維持システム ECLSS (Environmental Control and Life Support System)

摂取	kg/day	排出	kg/day
酸素	0.816	二酸化炭素	1.04
食料	1.51	尿 (固形)	0.059
		便 (固形)	0.032
飲用水	2.50	汗 (固形)	0.018
		尿 (液体)	1.2
		便 (液体)	0.10
		呼気・汗 (液体)	2.277
衛生水	0.40	衛生排水	0.40
トイレ用水	0.30	トイレ排水	0.30
		その他	0.10
合計	5.526	合計	5.526

廃棄物 (紙、テープ、衛生用品、衣類・タオル) : 1kg/day

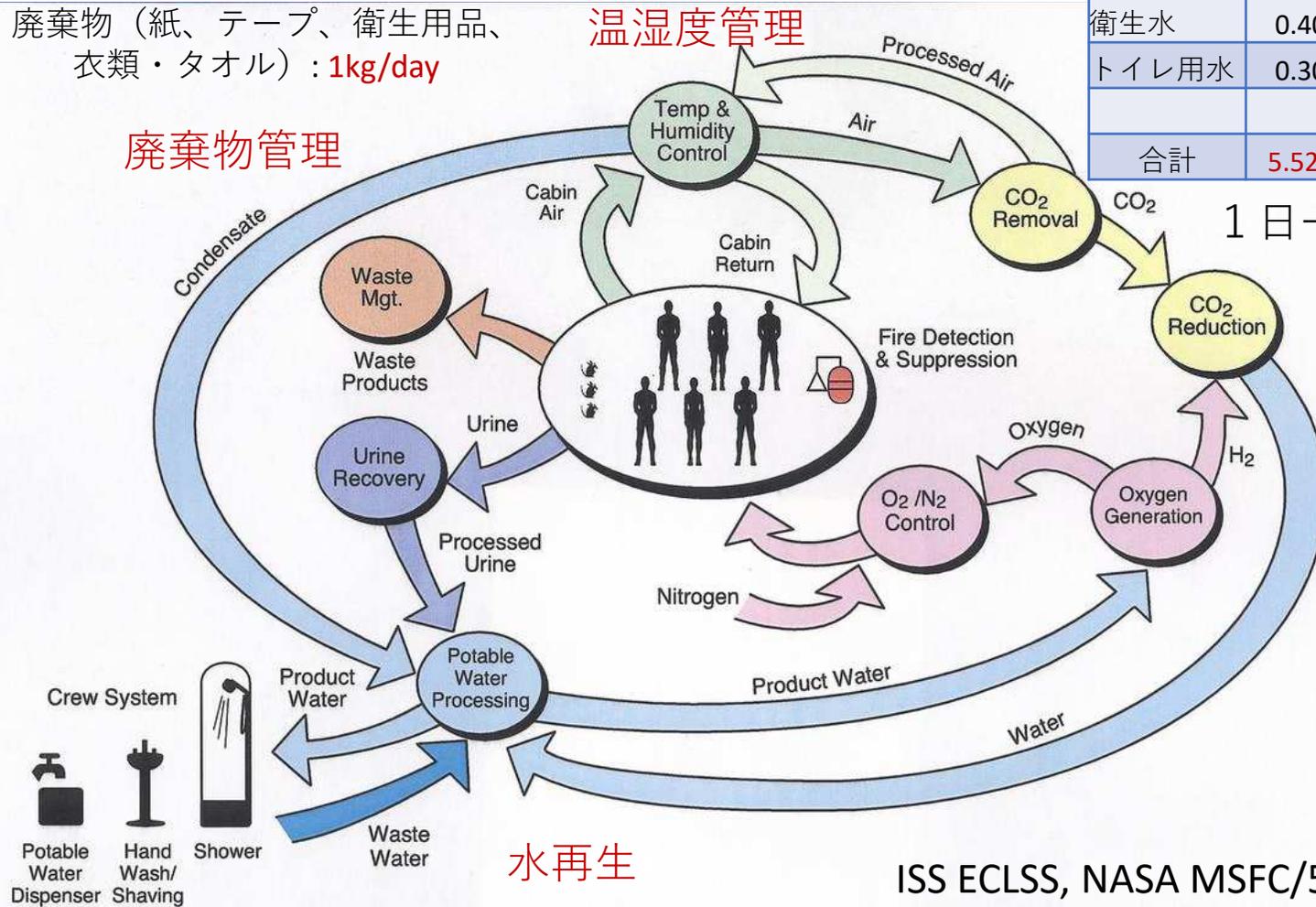
温湿度管理

廃棄物管理

1日一人当たりの物質

空気再生

水再生



検討分野

- A. 惑星間輸送、移住計画、惑星間のインフラ
- B. 都市建設地、都市計画、交通網、建築（構造）、居住施設（内装を含む）、エネルギー、通信
- C. 食料生産、生命維持、資源利用、資源再生、自動化（ロボット）、人の構成（年齢、性別、職業）
- D. 地方政府、公共政策（教育・科学技術政策を含む）、学校、病院（公衆衛生を含む）
- E. 商業、産業、宇宙観光
- F. 文化・芸術・食

1		Mission Authority	4		Biomass Production	7		Habitat Structure	10		Communication
	1	Vision		1	Farming		1	Protection		1	Communication Relay Satellite
	2	Mission		1	Hydroponics		1	Pressure		2	GPS Constellation
	3	Goals		2	Aeroponics		2	Meteoroid	11	Interplanetary Transportation	
	4	Objectives		3	Aquaponics		3	Thermal Protection		1	Interplanetary Spacecraft
	5	Constraints		4	Soil Culture		4	Radiation		1	Cruise Space Ship
	6	Stakeholders/ Authority		5	Seeds Storage		8	ISRU		2	Heavy Cargo Ship
2		Driving Factors		2	Protein Resource		1	Resource Identification		2	Propulsion System
	1	Social Factors		1	Artificial Meat		1	Water (soil, Glacier)		1	SEP
	1	Government (Political System, Law)		2	Fish (Aquaponics)		2	Mineral (Al, Silicon,		2	Chemical
	2	Economy (Business Plan)		3	Insects		3	Potential Processable Material (Alloy		3	Ascend/Land System
	3	Finance		3	Food Management		2	Resource Extraction		1	Crew/Cargo Lander from/TO Mars Orbit
	4	Occupation		1	Environment Monitoring		1	Resource Assessment		2	Exploration Hopper
	5	Religion		2	Waste Water Circulation		2	Resource Acquisition	12	Mobility Systems	
	6	Culture		3	Air Circulation		3	Resource Benefication		1	EVA Mobility
	7	Population Composition (Age, Gender)		4	Water Quality Management		4	Site Management		1	MMSEV (Exploration, Large Bus type)
	8	Population Growth Rate (Immigration rate, Birth rate)		5	Microbe Control		3	Material Handling & Transportation		2	EVA Suit
	2	Mission Factors		6	Harvesting Robot		1	Fixed Site Transportation		2	Surface Mobility
	1	Mission Duration		7	Food Storage		2	Mobile Material Transportation		1	Multi Purpose Chariot
	2	Concept of Operations		4	Food Processing		3	Payload Material Transportation		2	Athelete
	3	Location		5	Resource Reutilization		4	Resource Processing	13	Robotics & Artificial Intelligence	
	4	Mars Climate/ Environment		1	Food Waste Decomposition		1	Mission Consumables (Life Support, Propellant, Energy		1	Support Robots
	5	Civilian Selection		2	Human Body Decomposition		2	Feedstock Production for ISRU Manufacturing		1	Advanced Robonaut
3		Urban Design	5		Thermal Control		3	Feedstock Production for Surface Construction		2	Artificial Intelligence
	1	Infrastructure		1	Heat Source		4	Common Critical Components		1	Traffic Control
	1	Government Facility (Parliament, Courthouse, Police)		2	Heat Insulation		5	Manufacturing with ISRU	14	Sustainability & Supportability	
	2	Research Institute		3	Heat Rejection		1	Additive Manufacturing Technologies		1	Logistics Systems
	3	School		4	Maintenance		2	Subtracting Manufacturing Technologies		1	Production system
	4	Residence	6		Environmental Control & Life Support		3	Formative Manufacturing Technologies		2	Recycle system
	5	Religion (Church, Mosque, Temple, Shrine,		1	Environmental Monitoring		4	Locally Integrated Energy Systems		3	Storage
	6	Hospital/Pharmacy		1	Atm. Pressure Control		5	Locally Integrated Systems & Components		2	Maintenance System
	7	Recreation/ Fitness		2	Temperature Control		6	Manufacturing Support Systems		1	Defect Detector
	8	Food Production Facility		3	Humidity Control		6	Surface Construction		2	Spar Parts Production
	9	Bio Reactor Facility		2	Atmosphere Management		1	Site Planning		3	Repair System
	10	Consumables Production Facility		1	Oxygen Production		2	Surface & Subsurface Preparation		1	Repair Parts Production
	11	Shopping Mall		2	CO2 Removal		3	Structural/ Habitat Fabrication			
	12	Warehouse		3	Microbial Control		4	Radiation & Micro Meteoroid Debris Shielding			
	13	Airlock		4	Volatile Organic Gases Removal		5	Structure & Site Maintenance			
	2	Environment		5	Air Distribution		6	Landing & Launch Site			
	1	Pond/River/Reservoir		3	Water Management		7	ISRU Product and Consumable Storage and Distribution			
	2	Garden Place		1	Processed Water Supply		1	Surface Cryogenic Fluid & Propellant Storage & Distribu			
	3	Park		2	Recycle Water		2	Chemical Reagent Storage & Distribution			
	4	Artificial Landscape		3	Water Storage		3	Gas Storage & Distribution			
	5	Road		4	Water Quality Management		4	Water & Earth Storable Fluid Storage & Distribution			
	3	Utility		4	Bioregenerative		5	Utility Connections & Interfaces			
	1	Water Supply & Sewage		1	Food Production		6	Hazard Detection			
	2	Electricity Distribution		2	Water Purification		7	Suppression			
	3	Air Circulation		3	Oxygen Regeneration		9	Power			
	4	Lighting		5	Sound Management		1	Power Generation			
	4	Transportation		1	Control Artificial Sound (Time, Seasons)		2	Power Storage			
	1	Personal Vehicle		6	Artificial Weather		3	Power Distribution			
	2	Public Vehicle		1	Scheduled Rain		4	Maintenance			
	3	Emergency Vehicle		2	Wind Control						

設計プロセス



地球からの
輸送量最小

トータル質量

居住区 (m_h), 食料生産区 (m_g), 生命維持 (m_{LSS}), ISRU (m_{ISRU}), 電力システム (m_p), 保守・維持 (m_m), 建設機械 (m_c)

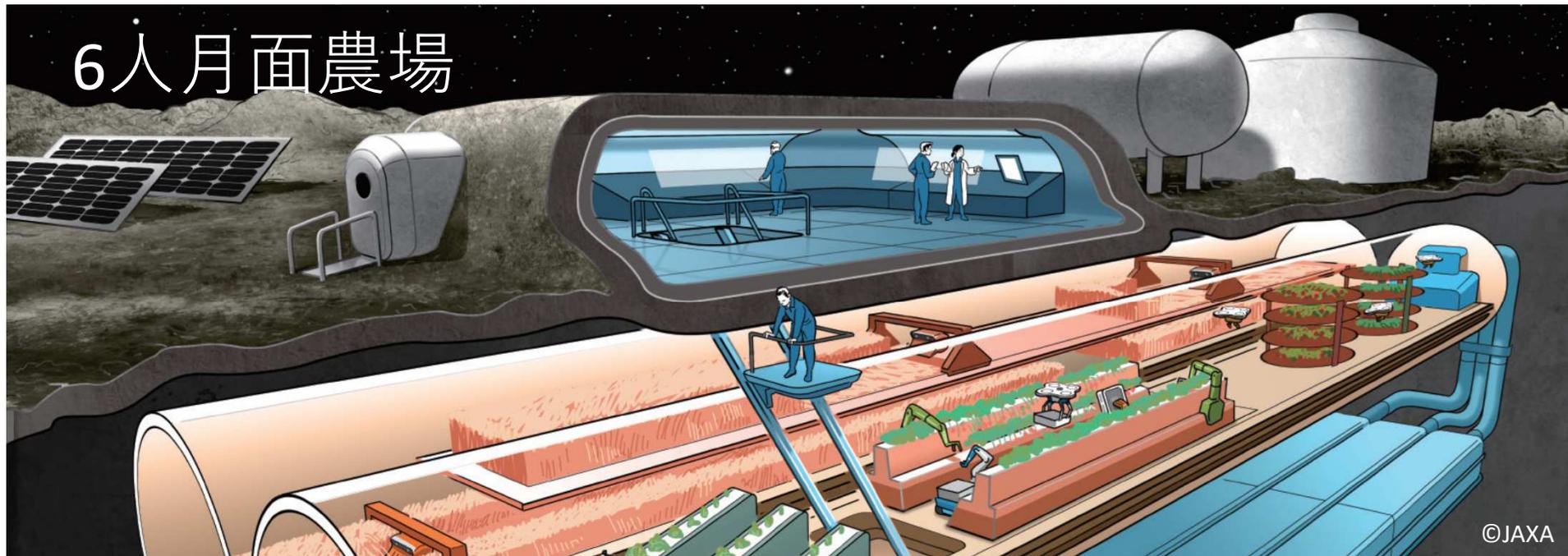
$$m_{mc}(t) = \sum (m_h(t) + m_g(t) + m_{LSS}(t) + m_{ISRU}(t) + m_p(t) + m_m(t) + m_c(t) + m_{se}(t) + m_{sm}(t) + m_{re}(t) + m_{rm}(t))$$

構造 (地球 m_{se} , 火星 m_{sm}) 資源 (地球 m_{re} , 火星 m_{rm})

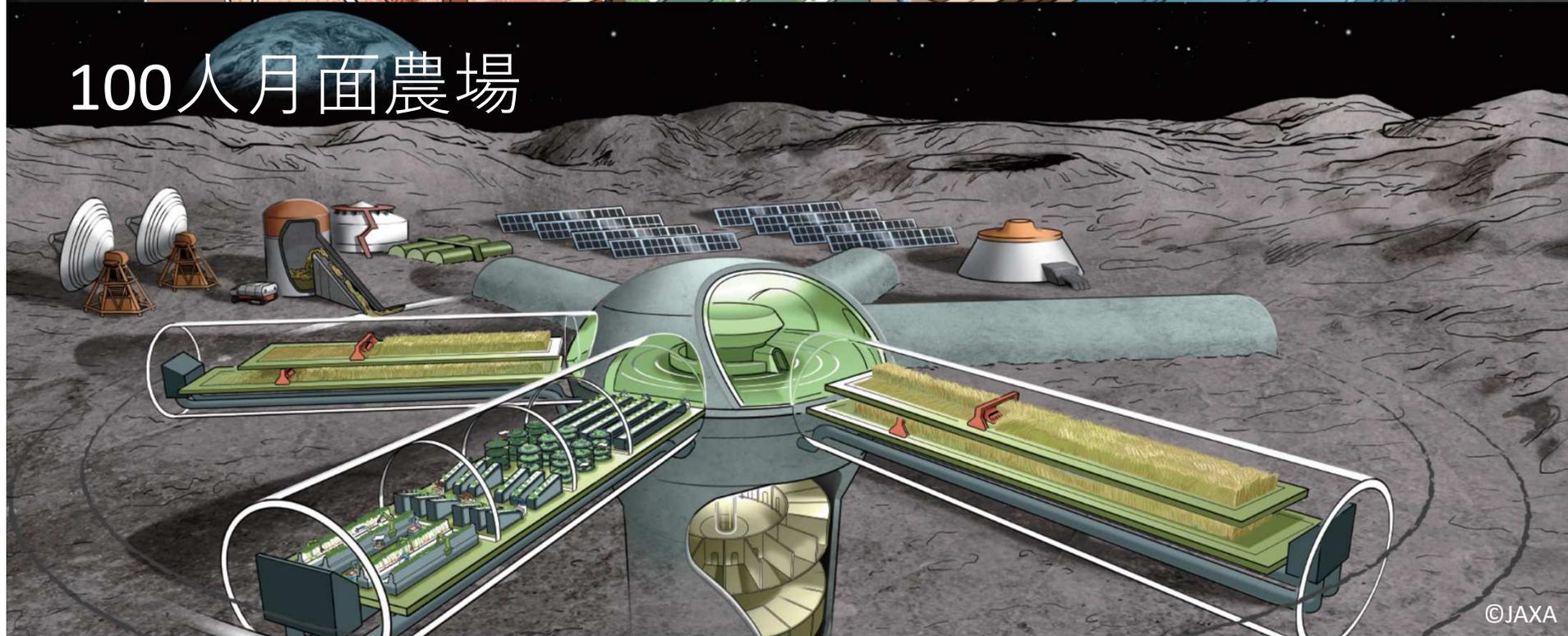
設計例

	月面農場	マリウスヒル 月縦孔拠点	マーズコロ ニー	火星都市国家
発表先、発表年	JAXAイノベーションハブ, 2019	JSASS宇宙ビジョン2050, 2020	Mars Colony Design Contest, 2019	Mars City State Design Contest, 2020
居住人数	6人	100人	1000人	100万人
面積	-	-	0.2km ²	1,417km ²
体積	1,820m ³	17,232m ³	-	-
構造物	レゴリス被覆 モジュール	溶岩洞内にモ ジュール	半地下膜型 ドーム	3Dプリンター レゴリス建築
食料生産	作物8種類	作物8種類、養 殖	作物8種類	作物30種類、 養殖、培養
エネルギー	太陽光、原子 力	太陽光	原子力	原子力、太陽 光

6人月面農場



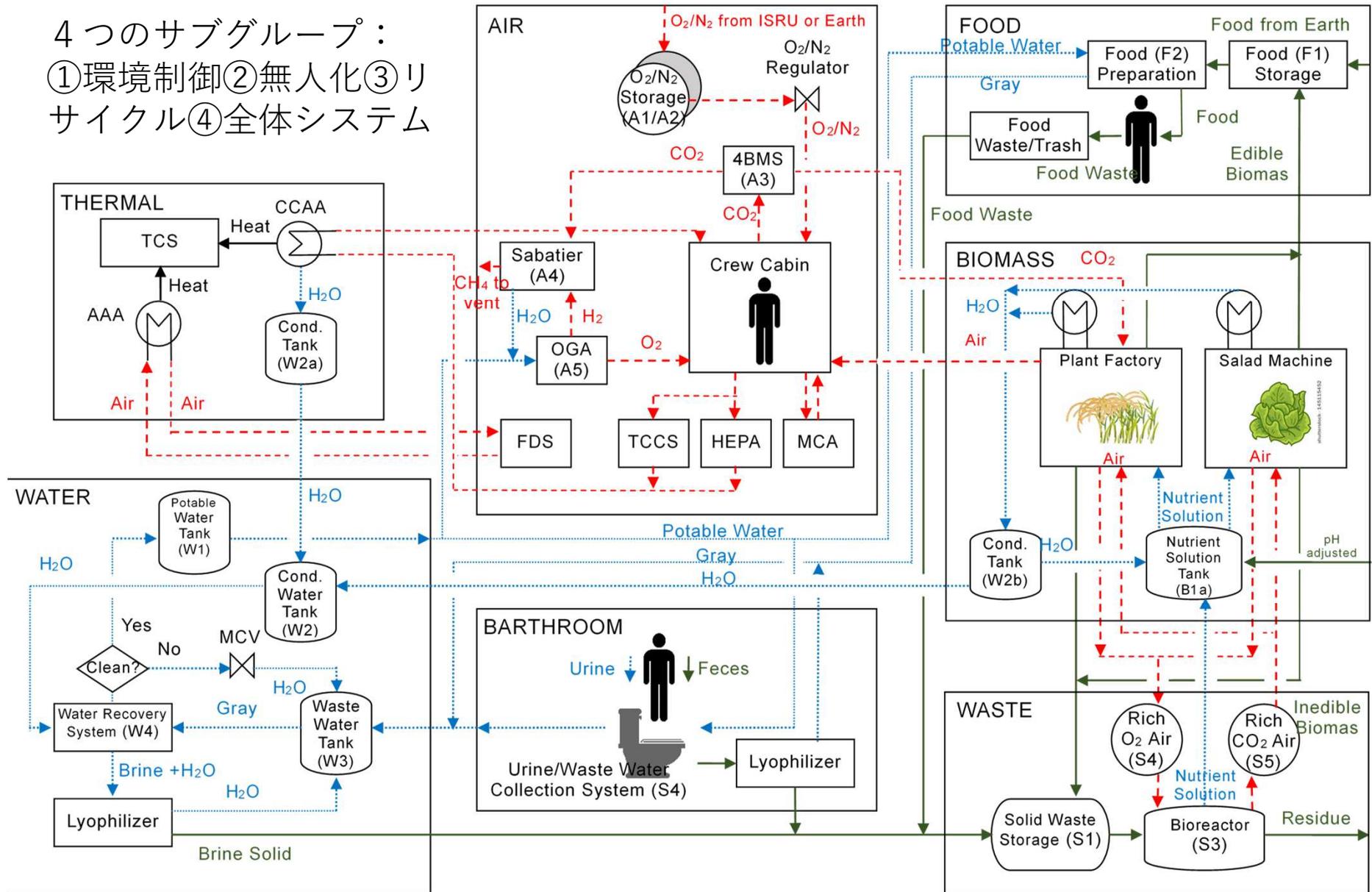
100人月面農場



月面農場ECLSS

稲, じゃがいも, さつまいも, 大豆, レタス,
トマト, きゅうり, いちご

4つのサブグループ：
①環境制御②無人化③リサイクル④全体システム



コスト計算

Equivalent System Mass (ESM)

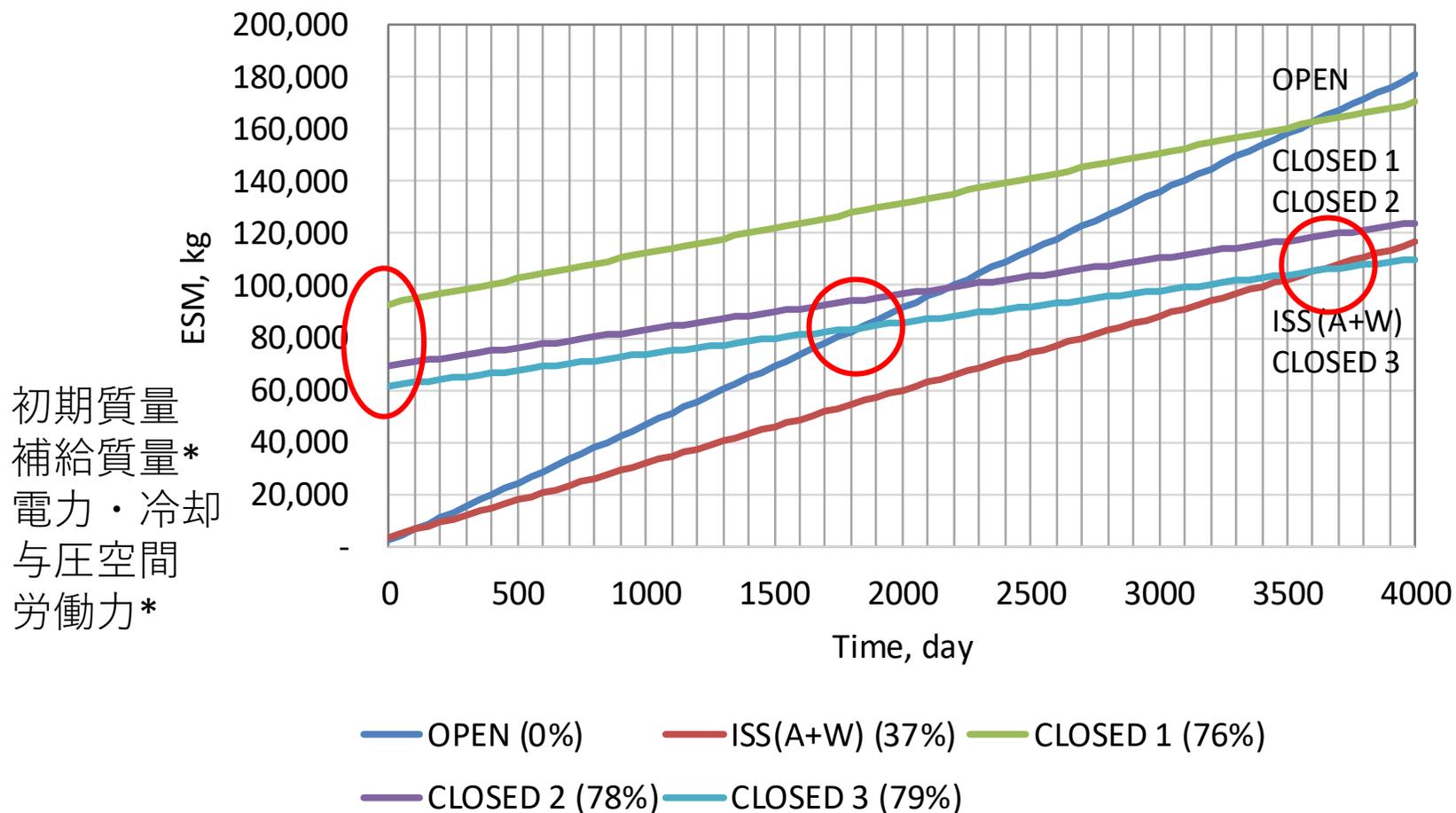
$$ESM = \sum_{i=1}^n \left[(M_{I_i} \cdot SF_{I_i}) + (V_{I_i} \cdot V_{eq_i}) + (P_i \cdot P_{eq_i}) + (C_i \cdot C_{eq_i}) + (CT_i \cdot D \cdot CT_{eq_i}) + (M_{TD_i} \cdot D \cdot SF_{TD_i}) \right]$$

サブシステム*i*の

- M_{I_i} : 初期質量[kg]
- SF_{I_i} : 初期質量貯蔵係数[kg/kg]
- V_{I_i} : 初期**体積**[m³]
- V_{eq_i} : 与圧**体積**質量等価係数[kg/m³]
- P_i : 必要**電力**[kWe]
- P_{eq_i} : **電力**質量等価係数[kg/kWe]
- C_i : **冷却**要求[kWth]
- C_{eq_i} : **冷却**質量等価係数[kg/kWth]
- CT_i : **労働時間**要求[CM-h/y]
- D : ミッション期間[y]
- CT_{eq_i} : **労働時間**質量等価係数[kg/CM-h]
- M_{TD_i} : 時間依存質量[kg/y]

	等価係数(月面)
体積 V_{eq_i}	9.16 kg/m ³
電力 P_{eq_i}	原子炉 76 kg/kWe 太陽光発電+燃料電池 749 kg/kWe
冷却 C_{eq_i}	102 kg/kWth
時間 CT_{eq_i}	変数(69.7 h/wk)

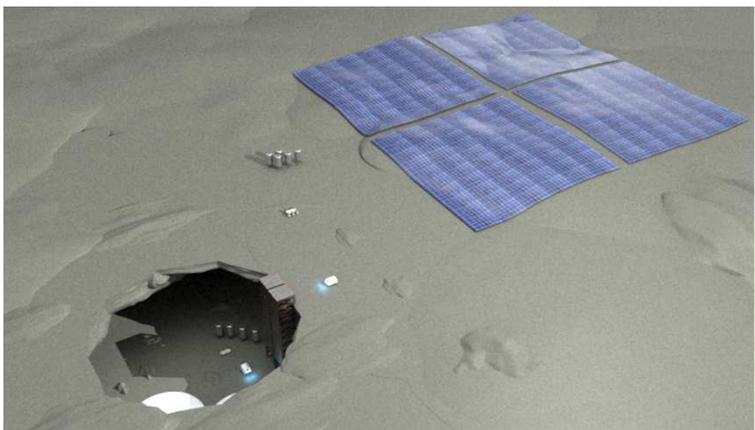
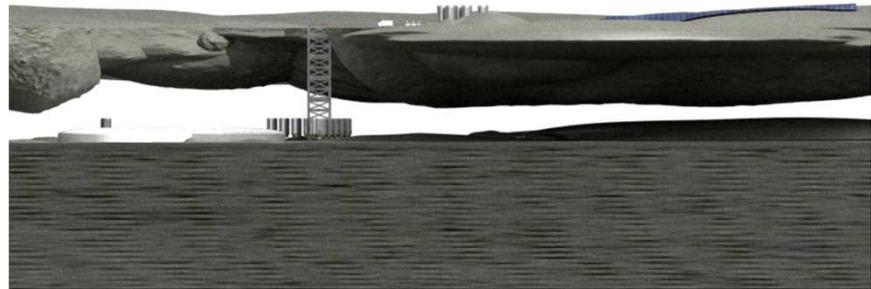
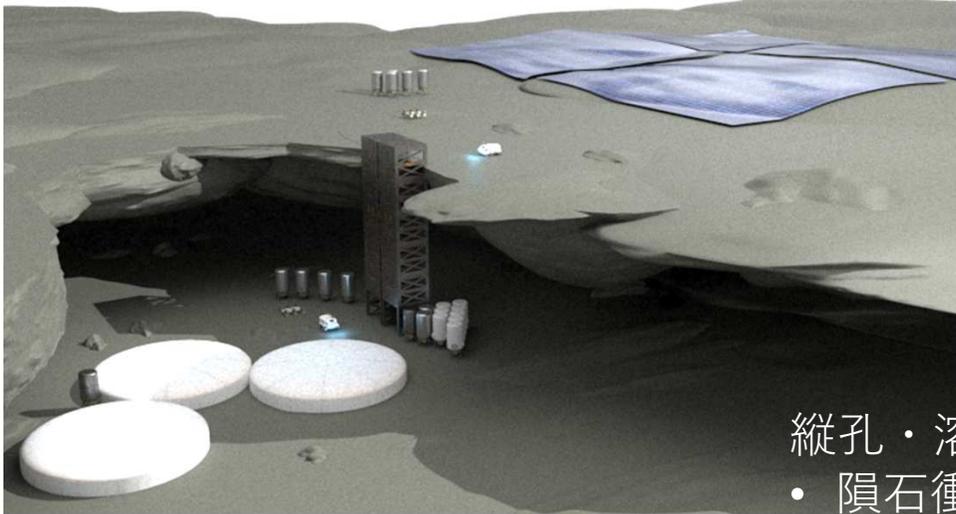
6人月面農場ESM比較



CLOSED 3 < OPEN 1850日

CLOSED 3 < ISS(A+W) 3650日 月面農場がコスト面で有利になるのは10年後

Marius Hills溶岩洞へ居住するための資源・エネルギー再生システムの検討



縦孔・溶岩洞に建設するメリット

- 隕石衝突影響 小
- 放射線・紫外線 小
- 温度変化 小

YOU ARE HERE!



地球上の放射線環境（年間約2.1 mSv日本平均）に比べて200倍も過酷な月（年間約420 mSv月表面）において、月の縦孔地形を利用することで宇宙放射線による被ばく量を月表面の10%以下（年間約19～24 mSv縦孔底面）まで低減可能（国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構）
<https://www.qst.go.jp/site/press/44251.html>,

<https://ytumbk.com/2019/09/18/ay-yuzeyindeki-dev-magaralar/>

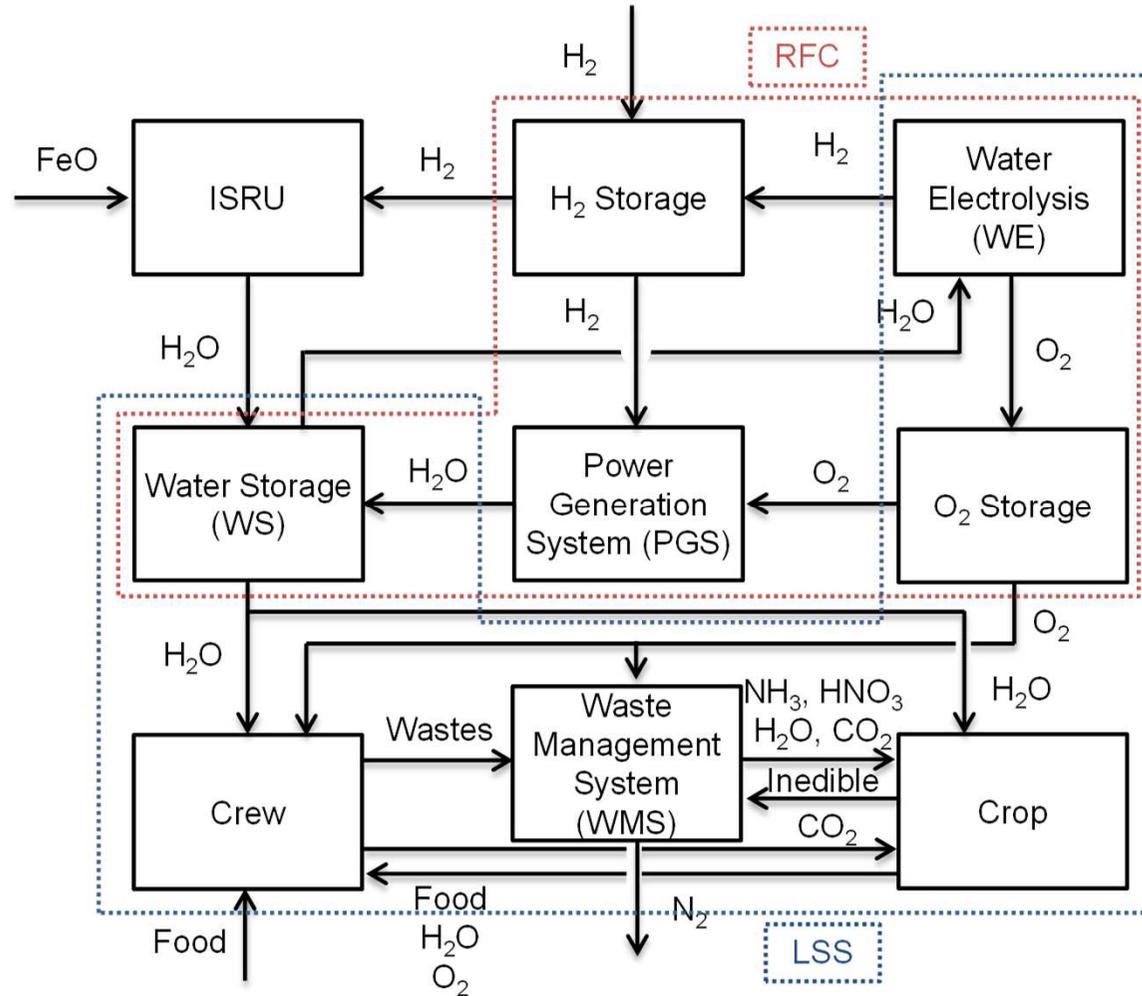
食料生産

月面農場WG案 + Space Vision 2050改訂版：居住人数：2020(3人),
2030年(10人), 2040年(50人), 2050年(100人)

Case No.	食料自給率	摂取エネルギー, kcal	水再生率 10kgに対して	酸素再生率 0.835kgに対して	必要電力, kW	作物と食料 g/day
1	4%	106	40%	10%	1	作物1:きゅうり (4.83), トマト (12.42), レタス (7.4), いちご (3.09)
2	14%	370	140%	20%	3	作物1+ 作物2:じゃがいも (15.57), さつまいも (51.98)
3	38%	1,017	390%	70%	10	作物1, 2+ 作物3:ダイズ (131.88)
4	92%	2,439	1060%	160%	23	作物1, 2, 3+ 作物4:稲 (335.24)
5	100%	2,650	—	—	26 60	作物1, 2, 3, 4+ 魚 or 牛肉

食料(g)当たりの飼料 (g) : milk (1.1), chicken (2.8), eggs (4.5), poke (7.3), beef (20), fish (1.4)
Smil, V., Enriching the earth, The MIT Press, Cambridge, 2001.

ISRU, 生命維持システム, 水素エネルギー供給システムの構成図



シナリオ 2 月面 vs. 縦孔

2020年から30年で建設

- 月面に建設した場合、レゴリス質量**1,805mT**の土木工事が加わり基地全体の質量は、

- 太陽光発電 **1,318mT+1,805mT**
越夜用の蓄電設備が大きい
- 原子力発電 **345mT+1,805mT**

前提条件	数値	単位
面積	4,668	m ²
容積	17,232	m ³

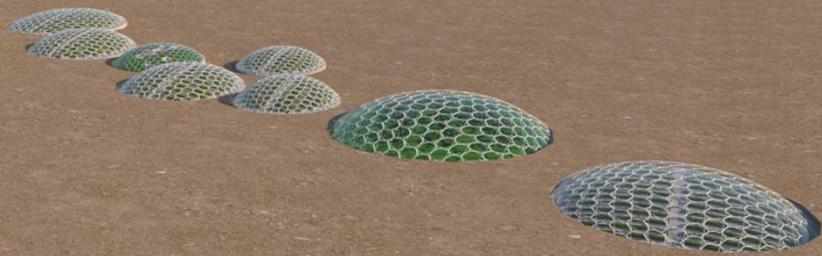
- 溶岩洞に建設した場合、**1,505mT(=1,805mT-300mT)**を削減できる。**300mT**（昇降システム）は縦孔に建築した場合の質量増加量。

Marius Hill Hole (MHH)		太陽光			原子力		
		構造質量	設備質量	補給質量	構造質量	設備質量	補給質量
		mT	mT	mT	mT	mT	mT
月面	月資源	1,805		872	1,805		600
	地球から	2,175	1,318	258	2,175	345	217
溶岩洞	月資源			872			600
	地球から	405	1,318	258	405	345	217

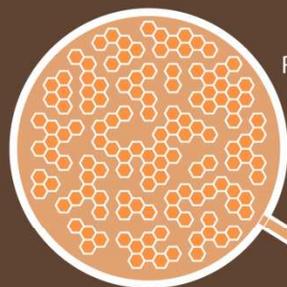
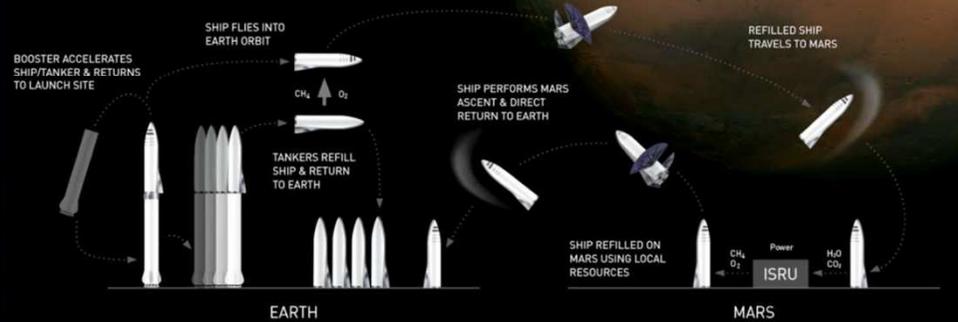
完成後10年（2050年-2060年）の比較

26,918	19,427
23,343	15,852

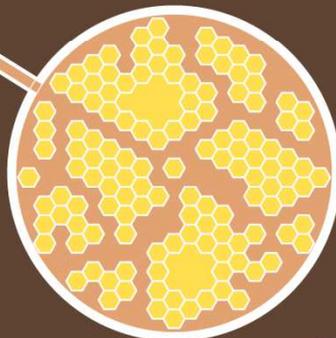
マーズコロニー1000人
35年で10兆円



MARS TRANSPORTATION ARCHITECTURE



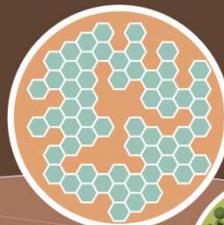
Residential



Cultural & Entertainment



Residential



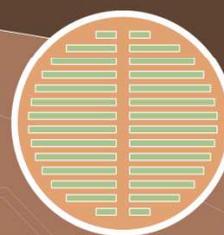
Governmental & Business



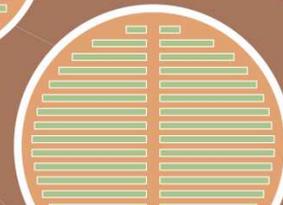
Agricultural



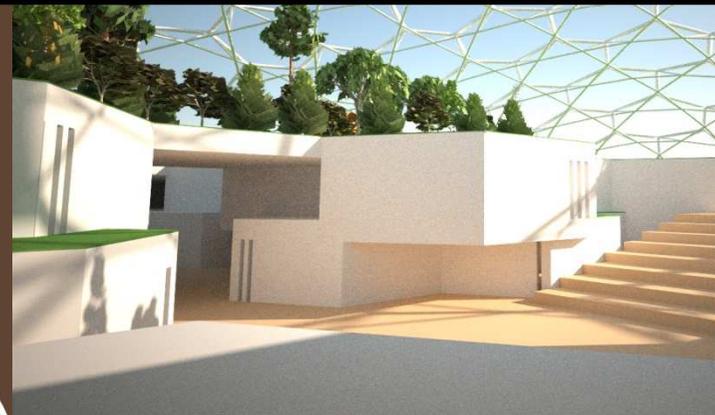
Health & Meditation



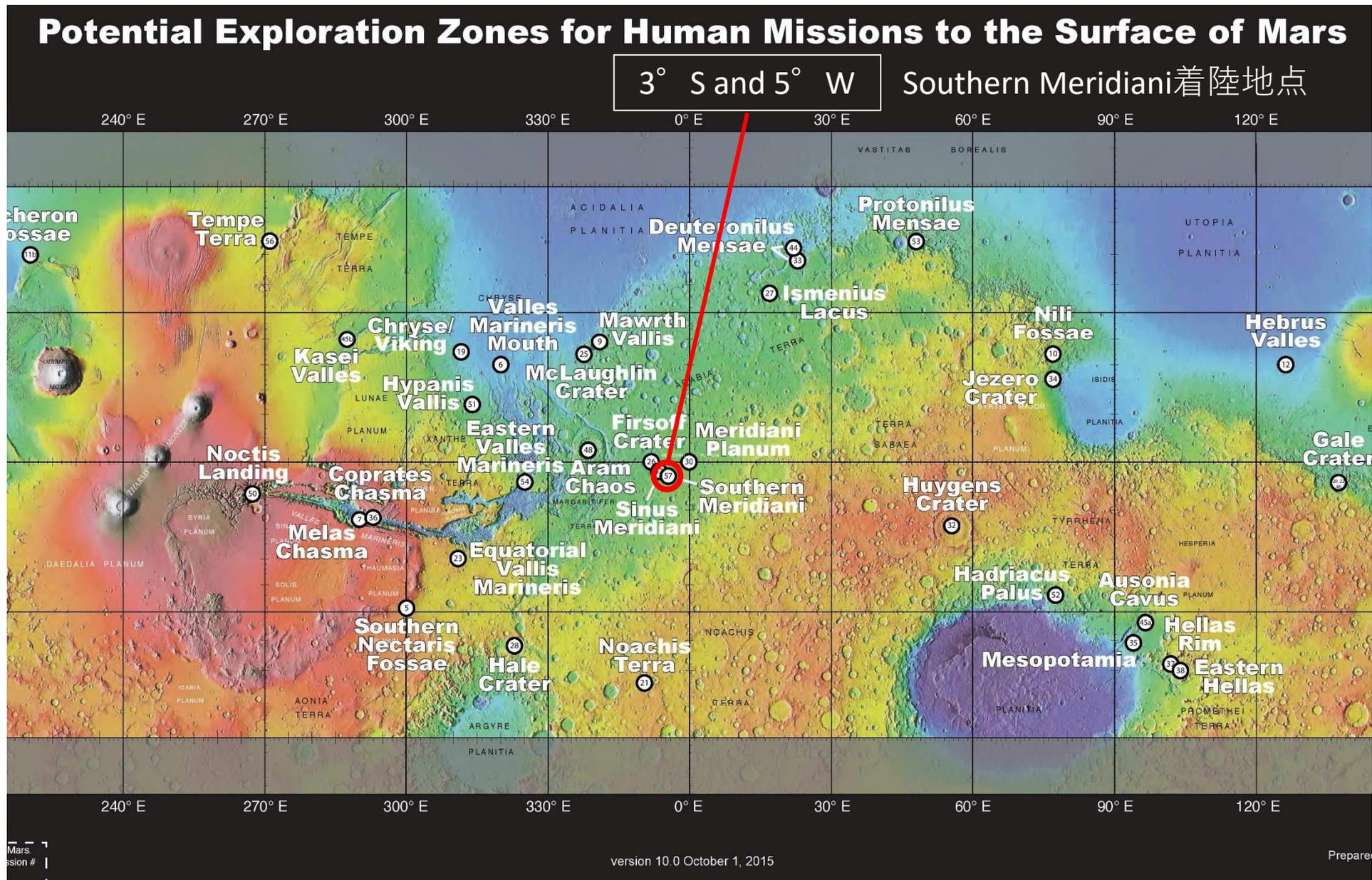
Agricultural



Agricultural



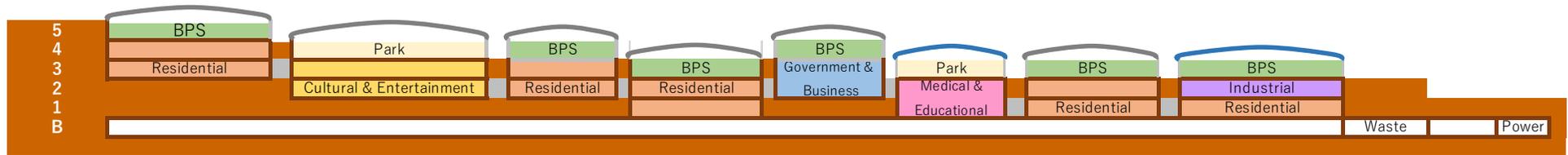
総質量 11,570 mT
地球からの質量 2,390 mT (BFR50回の飛行)
電力50 MW



3つの選定基準：低緯度、低高度、水資源

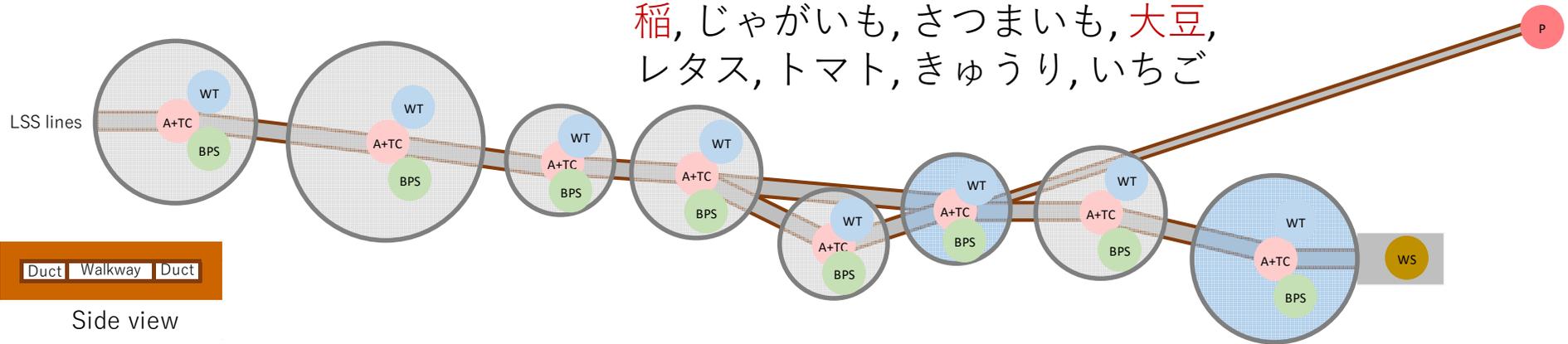
日射量、離陸、着陸、放射線防御は低緯度有利、水資源のみ中緯度以上に分布

食料生産 (4.0), 熱制御 (5.0), ECLSS (6.0)



Front view

稲, じゃがいも, さつまいも, 大豆,
レタス, トマト, きゅうり, いちご



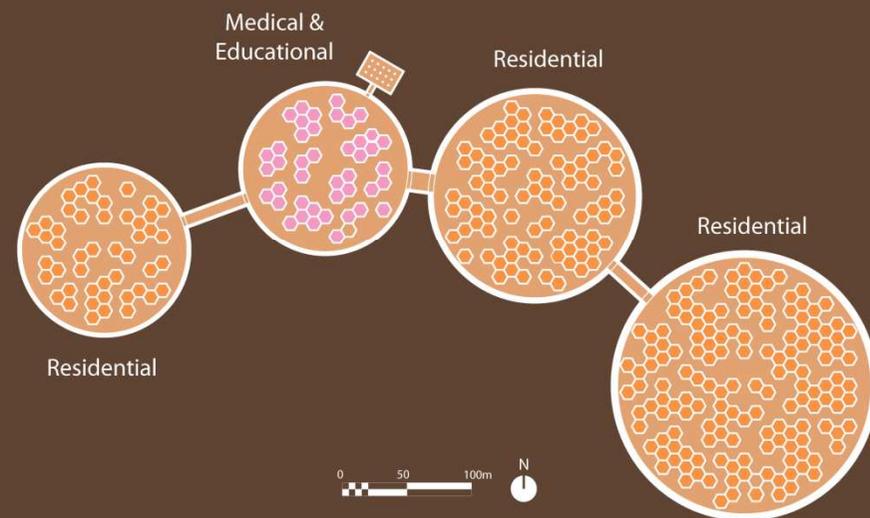
Side view

Top view

	Dome	Dome	Dome	Dome	Dome	Dome	Dome	Dome	Dome	Waste
Dome No.	7	4	3	2	8	1	5	6		
Radius, m	100	120	65	80	65	65	80	100		
Population, person	140	200	100	100	100	100	120	140		
BPS, mT	7.5	10.7	5.4	5.4	5.4	5.4	6.4	7.5		
LED, mT	62.7	89.6	44.8	44.8	44.8	44.8	53.7	62.7		
Air, mT	15.2	21.8	10.9	10.9	10.9	10.9	13.1	15.2		
Thermal, mT	9.1	13.0	6.5	6.5	6.5	6.5	7.8	9.1		
Water, mT	3.3	4.7	2.4	2.4	2.4	2.4	2.8	3.3		
Waste, mT										57.9
Water for person, m ³	14.0	20.0	10.0	10.0	10.0	10.0	12.0	14.0		
Water for roof, m ³						660.0		346.0		

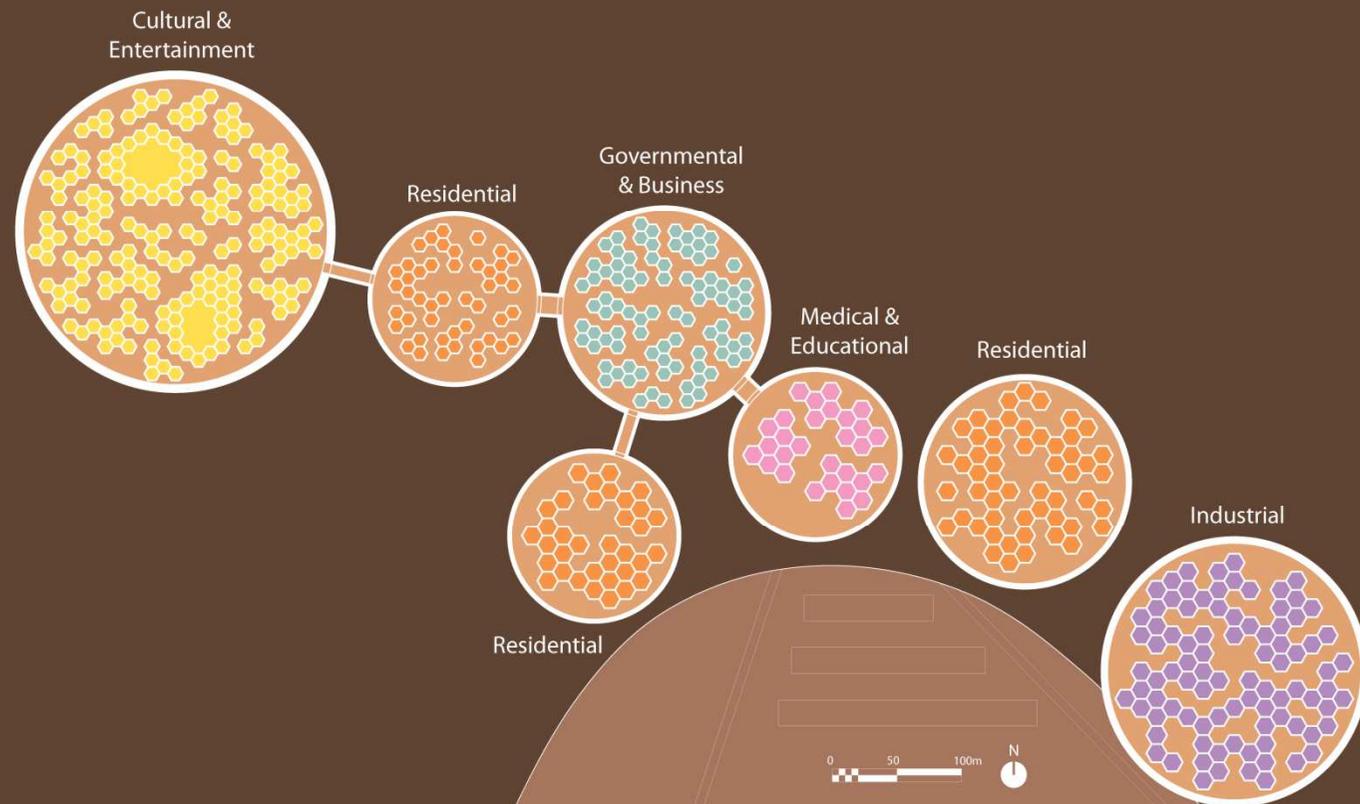
15 Anderson, M. S., Ewert, M. K., Keener, J. F., and Wagner, S. A., Advanced Life Support Baseline Values and Assumptions Document, NASA, TP-2015-218570, 2015.

1 階



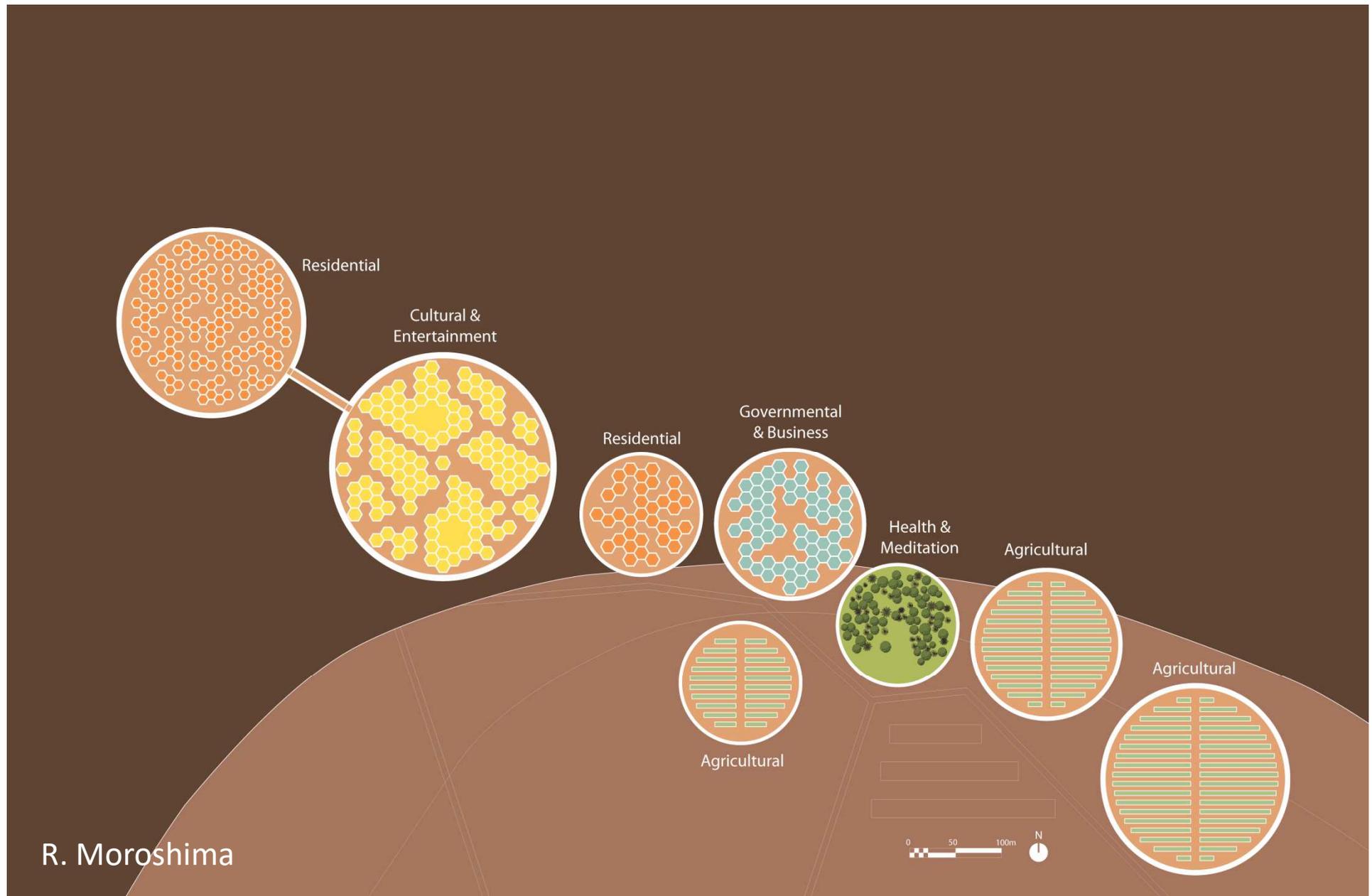
R. Moroshima

2階

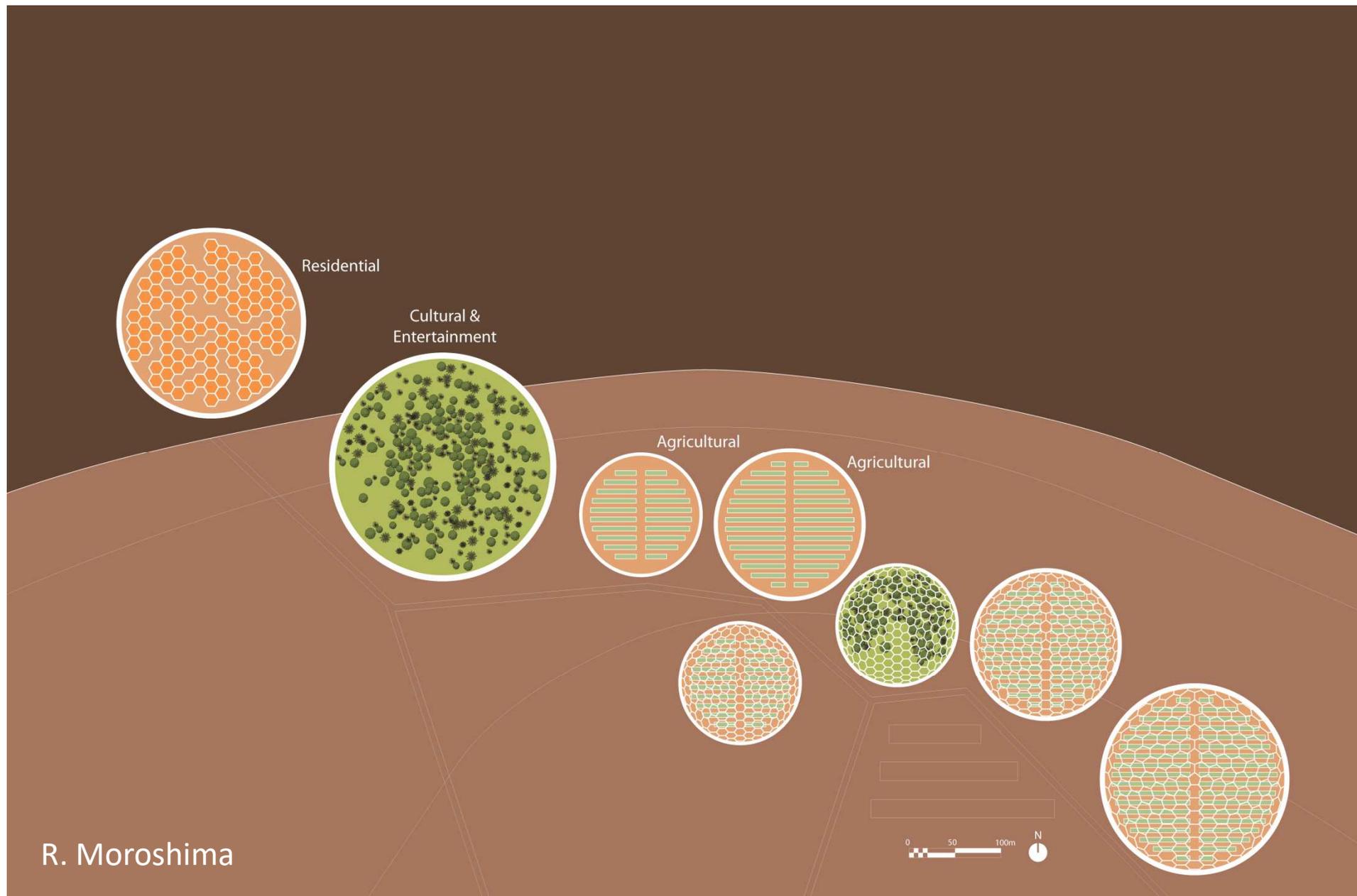


R. Moroshima

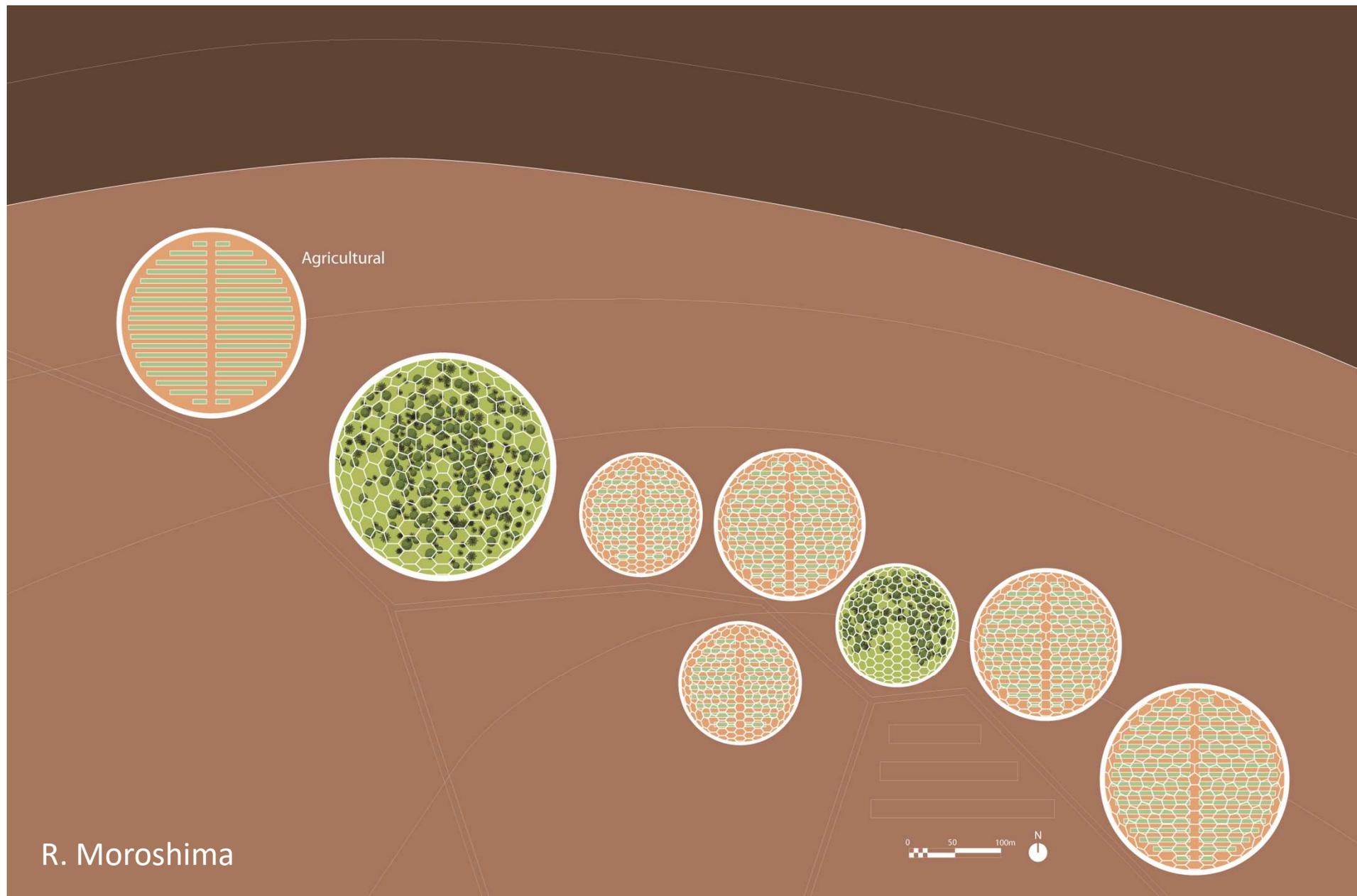
3 階



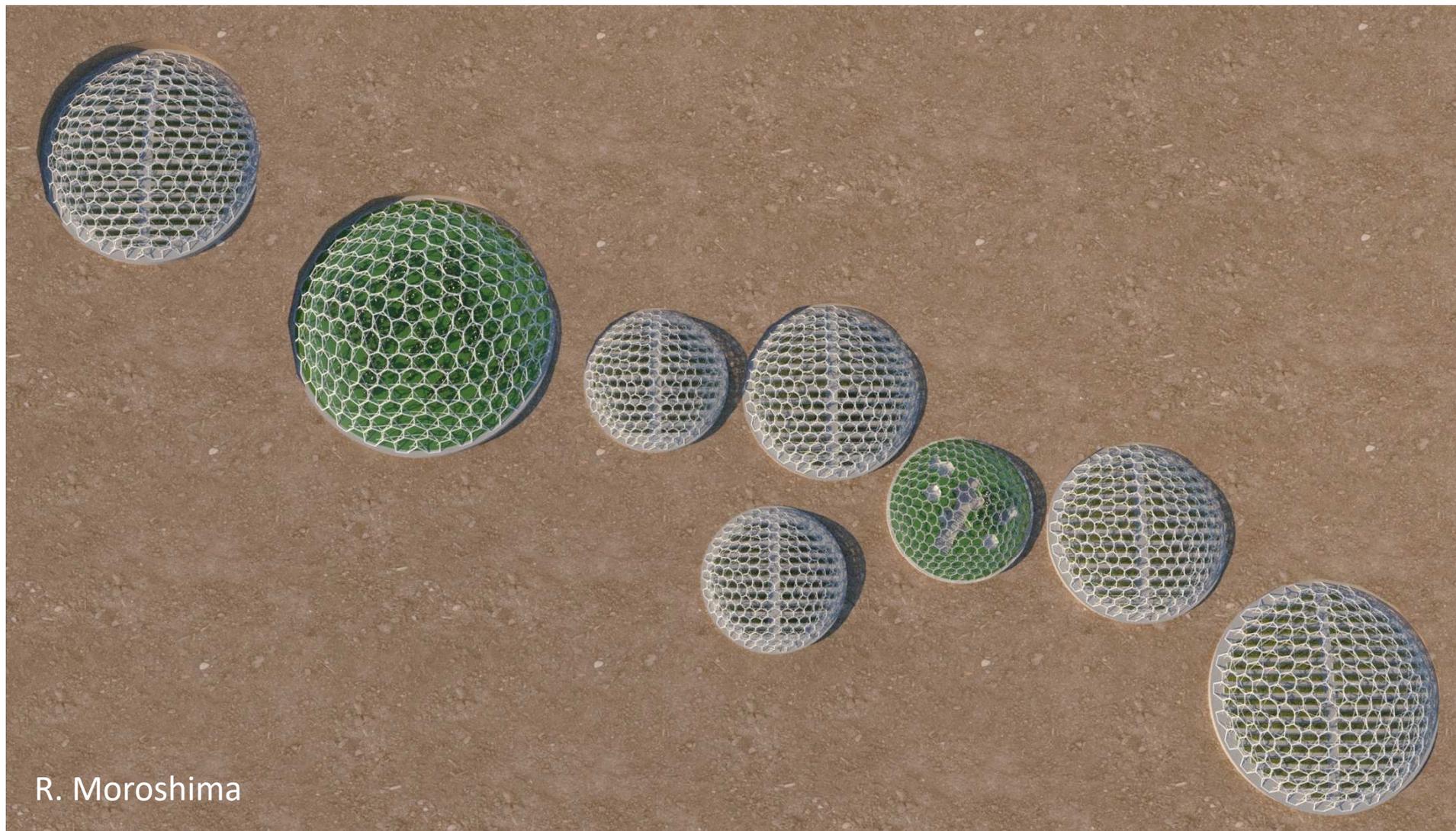
4 階



5 階

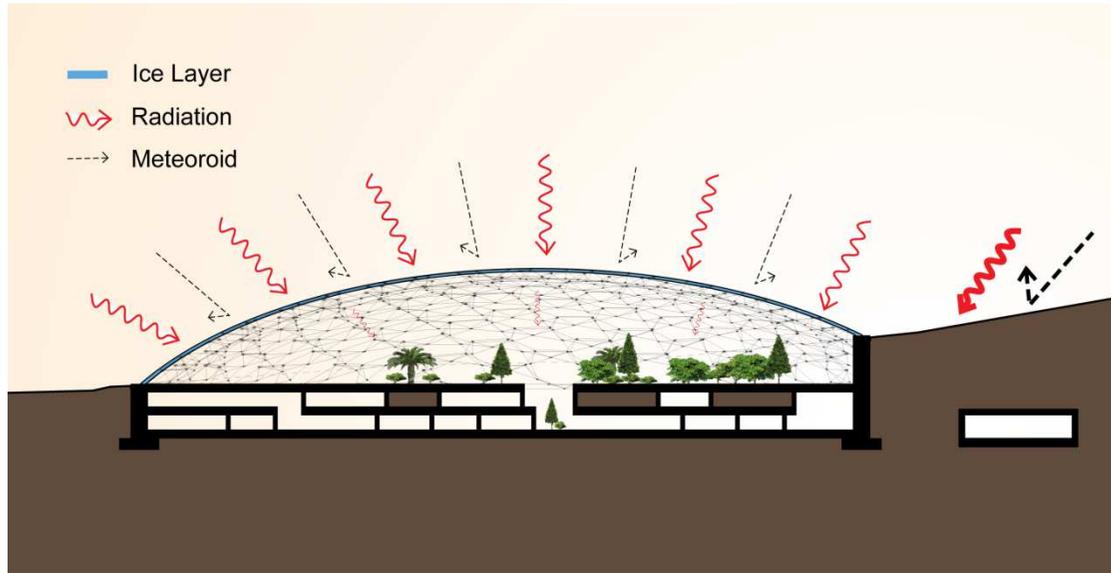


全景

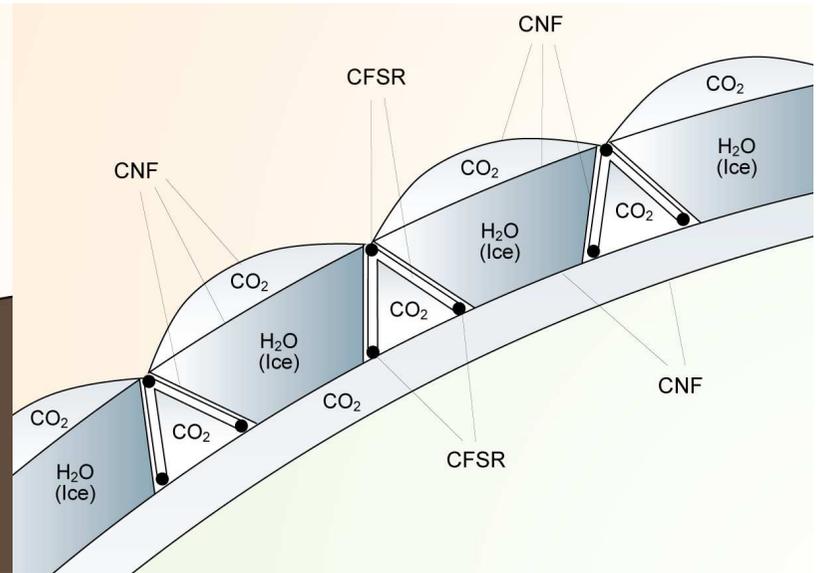


R. Moroshima

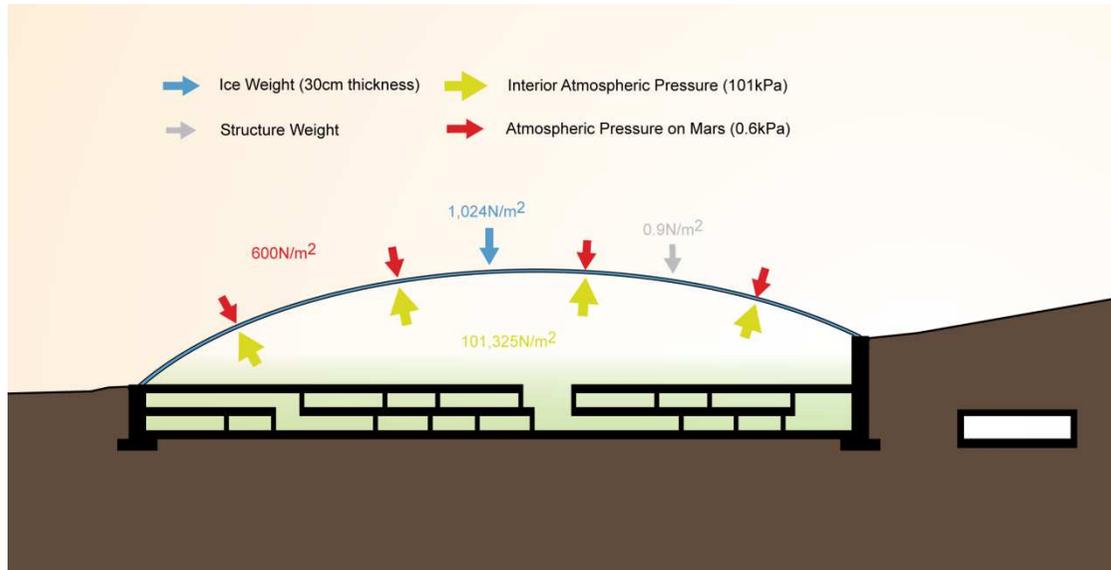
温室ドーム



流星塵・放射線防護



ドーム屋根



構造

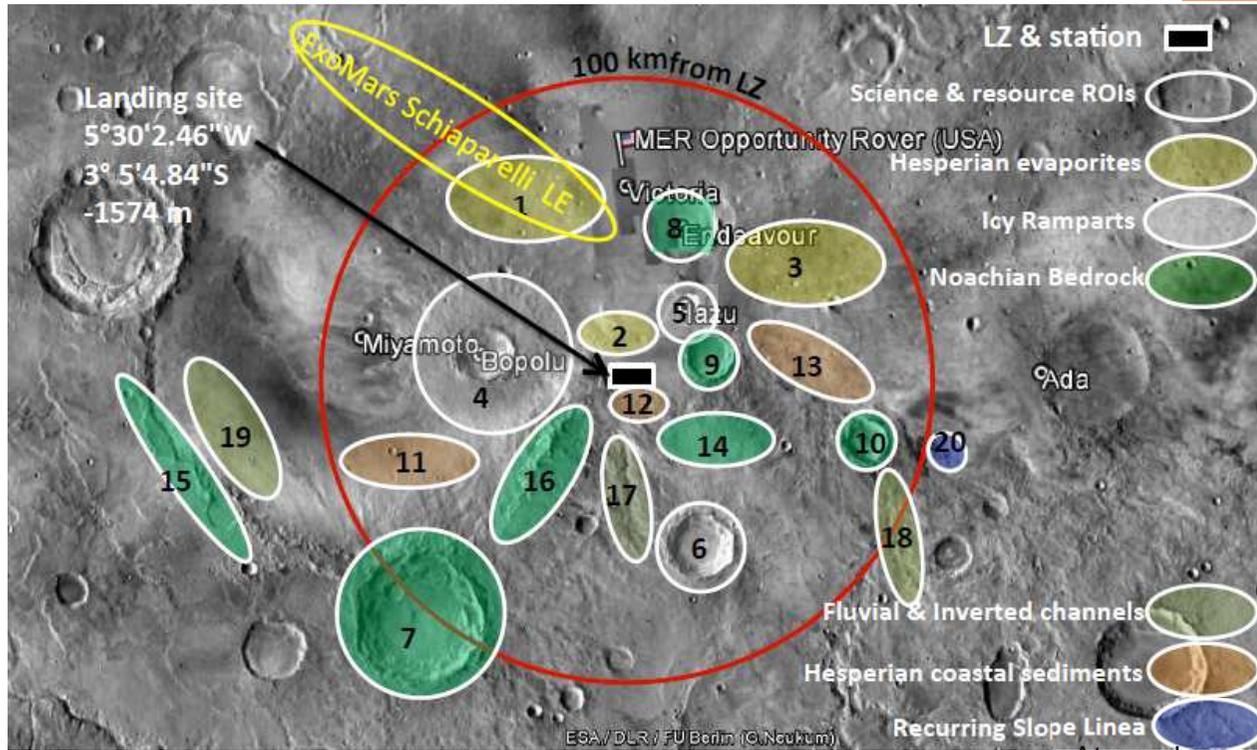
セルロースナノファイバー (CNS)、ロープ状炭素繊維複合材カポコーマ・ストランドロッド (CFSR)



CFSR: $80\text{g/m}^2 \times 101,400\text{m}^2 = 8,112\text{kg}$
 CNS: $0.016\text{kg/m}^2 \times 101,400\text{m}^2 = 1,622\text{kg}$
 水: 100,500kg for ドーム1と6のみ
 六角形メッシュドーム

現地資源利用・土木工学 (8.0)

平坦、安定、岩、傾斜、資源に近い、資源にアクセスできる



24時間運用 (原子力)

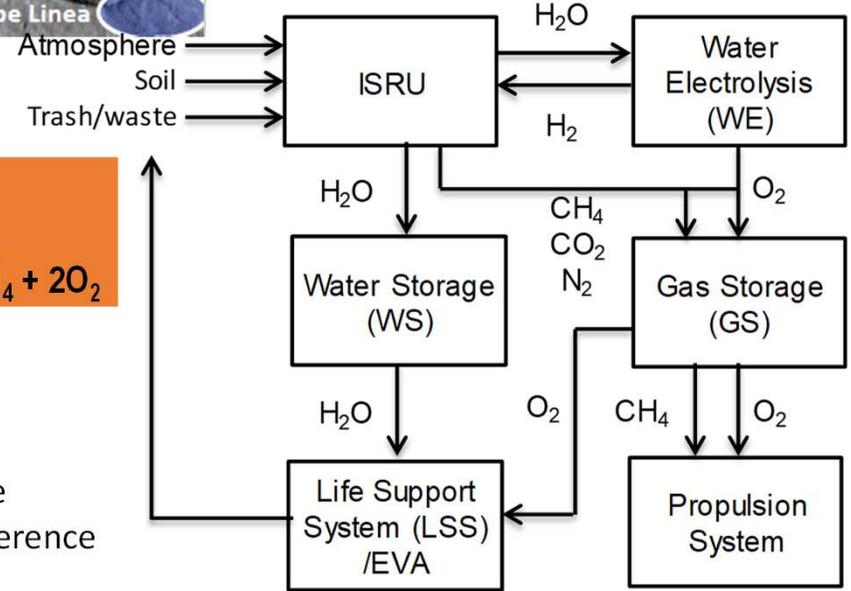
CO ₂ and N ₂	19	kg/hr
H ₂ O	131	kg/hr
O ₂	45	kg/hr
CH ₄	11	kg/hr

ISRU設計

	Mass, kg	Power, kW
CO ₂	958	50
H ₂ O	84,976	971
N ₂	958	23
O ₂	2,088	158
CH ₄	1,200	37

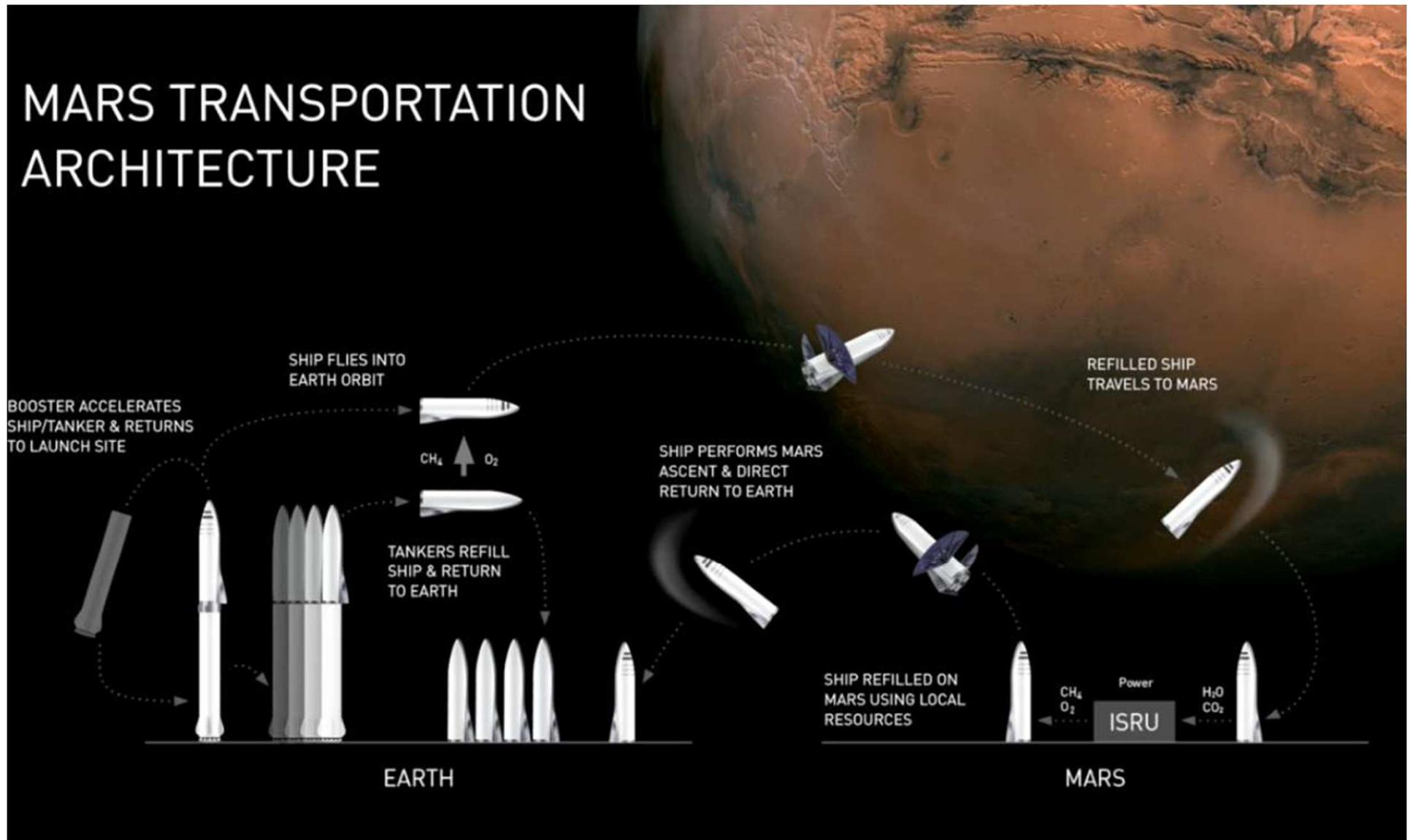
O₂/CH₄ production with Mars H₂O

Sabatier: $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
 2nd Water Electrolysis: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$
 or Electrochemical Reduction: $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{O}_2$



Donald Rapp, et al., Preliminary System Analysis of In Situ Resource Utilization for Mars Human Exploration, 2005 IEEE Aerospace Conference

惑星間輸送システム(11.0)



火星表面へ100 mT/shipのペイロード

Concept of Operation

Phase 0 (2034-2038)
無人建設期



Phase 1a (2038-2040)
居住初期



宇宙船へ居住

Phase 1b (2040-2050)
居住中期



宇宙船へ居住・温室で食料生産
居住区 (4125 m³) 温室 (6000 m²) 120 人

Phase 2 (2050-2070)
居住成熟期 (定住)



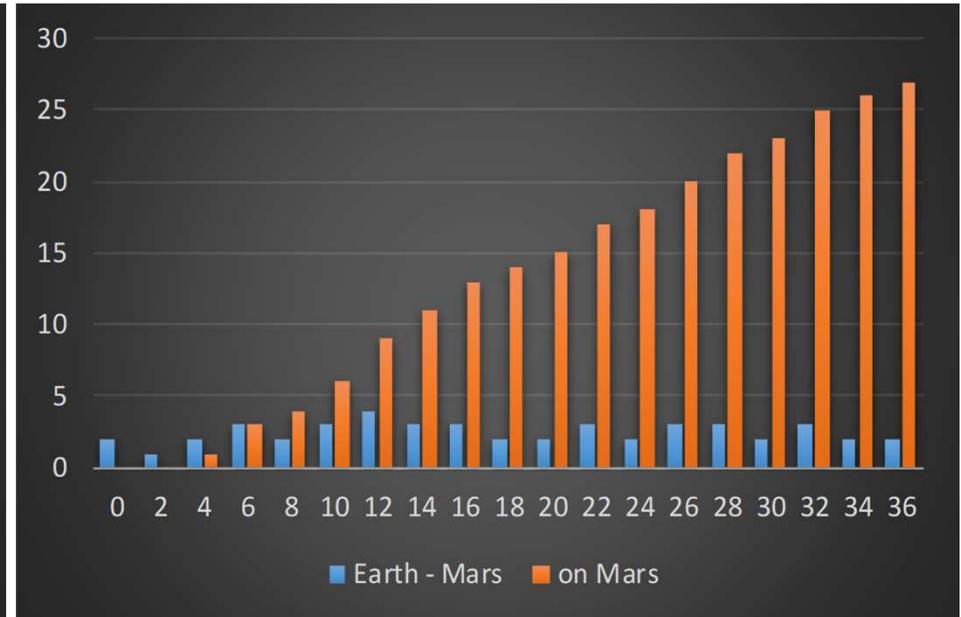
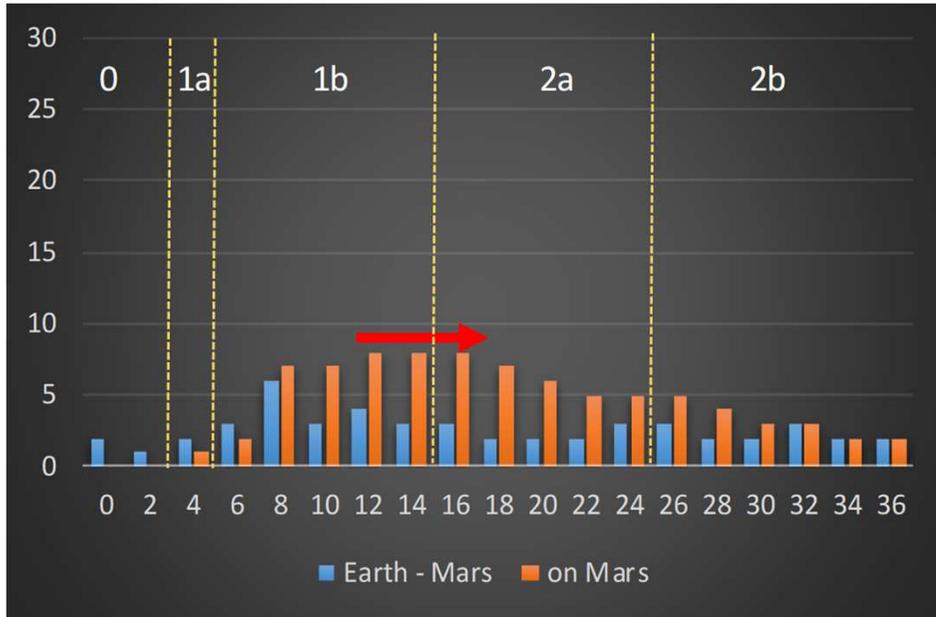
大規模ドームでの居住 (地下階) ・ 食料生産 (地上階)

定住シナリオ

フェーズ	年数	年度	入植者	人口	居住面積, m ²	栽培面積, m ²	質量, mT	輸送量, mT	電力 (0%), kW	電力 (100%), kW
0	0	2034	0	0	0	0	165	165	1,284	1,284
	2	2036	0	0	0	0	211	211	1,563	1,563
1a	4	2038	12	12	300	0	314	303	2,660	2,660
1b	6	2040	12	24	600	1,200	545	475	4,487	4,247
	8	2042	24	48	1,200	2,400	977	836	8,334	7,853
	10	2044	24	72	1,800	3,600	1,220	1,008	9,210	8,488
	12	2046	48	120	3,000	6,000	2,265	1,252	10,916	9,713
	14	2048	48	168	16,800	18,675	3,430	1,376	12,622	8,876
2a	16	2050	72	243	24,300	31,350	4,327	1,480	15,288	8,999
	18	2052	72	319	31,900	31,350	4,714	1,569	18,009	11,720
	20	2054	72	397	39,700	44,025	5,610	1,660	20,781	11,950
	22	2056	72	476	47,600	56,700	6,511	1,752	23,589	12,215
	24	2058	72	557	55,700	56,700	6,893	1,816	26,487	15,113
2b	26	2060	72	640	64,000	69,375	8,210	1,963	29,437	15,521
	28	2062	72	724	72,400	82,050	9,132	2,057	32,423	15,963
	30	2064	72	810	81,000	82,050	9,509	2,096	35,499	19,040
	32	2066	72	898	89,800	94,725	10,502	2,244	38,627	19,625
	34	2068	72	987	98,700	107,400	11,445	2,340	41,790	20,245
	36	2070	72	1,006	100,600	107,400	11,526	2,347	42,465	20,921

夜 晴天

コスト比較 再利用 vs. 使い捨て

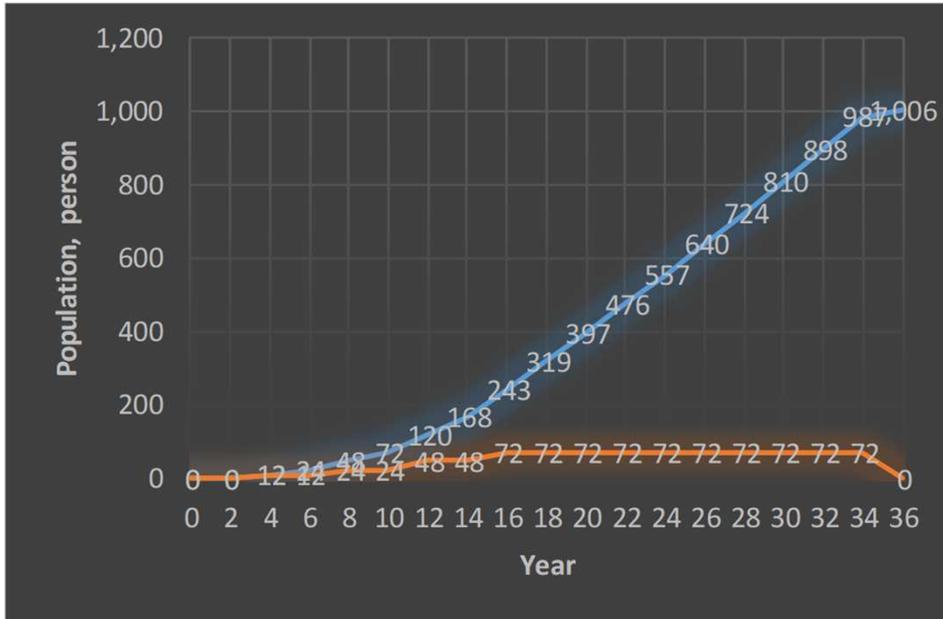


	Unit price (a)	Cargo ship reusable (a) x (b)	Number (b)		Cargo ship single-use (a) x (c)	Number (c)
Starship development	5.0.E+09 \$	5.00E+09	1		5.00E+09	1
Starship production	3.4.E+08 \$/ship	4.69E+09	14	↗	1.07E+10	32
Tanker production	3.4.E+08 \$/ship	7.37E+09	22	↘	4.02E+09	12
Crew launch cost Earth->Mars *1	7.0.E+06 \$/launch	3.57E+08	51	→	3.57E+08	51
Cargo launch cost Earth->Mars *2	7.0.E+06 \$/launch	1.16E+09	165	↘	1.05E+09	150
Crew and cargo launch cost Mars -> Earth	7.0.E+06 \$/launch	3.01E+08	43	↘	1.05E+08	15
Total cost, \$		1.89E+10		↗	2.13E+10	
		貨物機 再利用		13%	使い捨て	

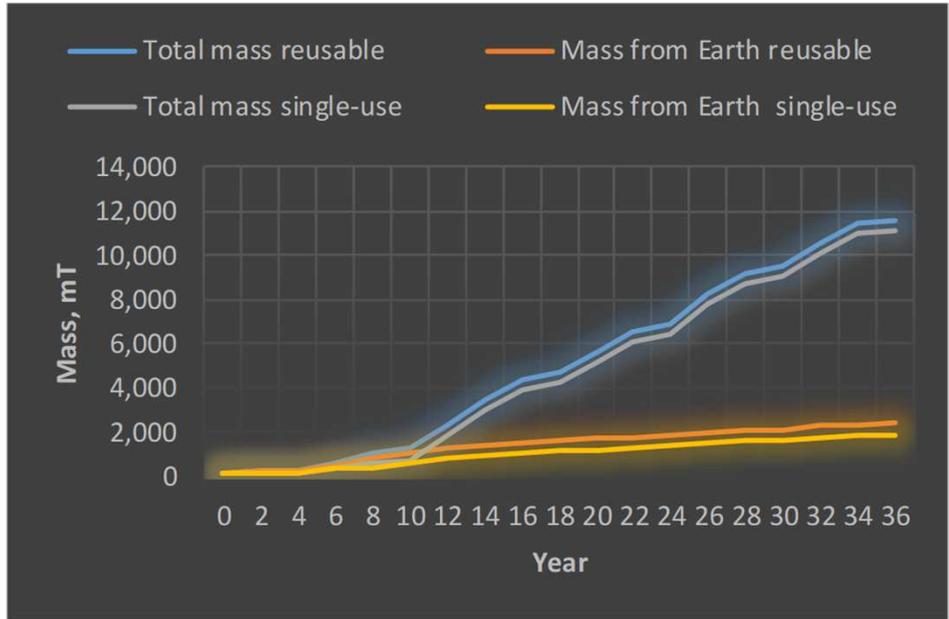
ISRU	再利用	使い捨て
CO ₂	4 (+2)	2
H ₂ O	6 (+3)	3
N ₂	2	2
O ₂	5 (+2)	3
CH ₄	5	5
Power plant	5 (+1)	4

- *1 Starship (2タンカーLEOで燃料補給) 17機火星へ着陸
- *2 Starship (4タンカーLEOで燃料補給) 31 or 30機火星へ着陸
- *3 火星周回軌道では燃料補給無し

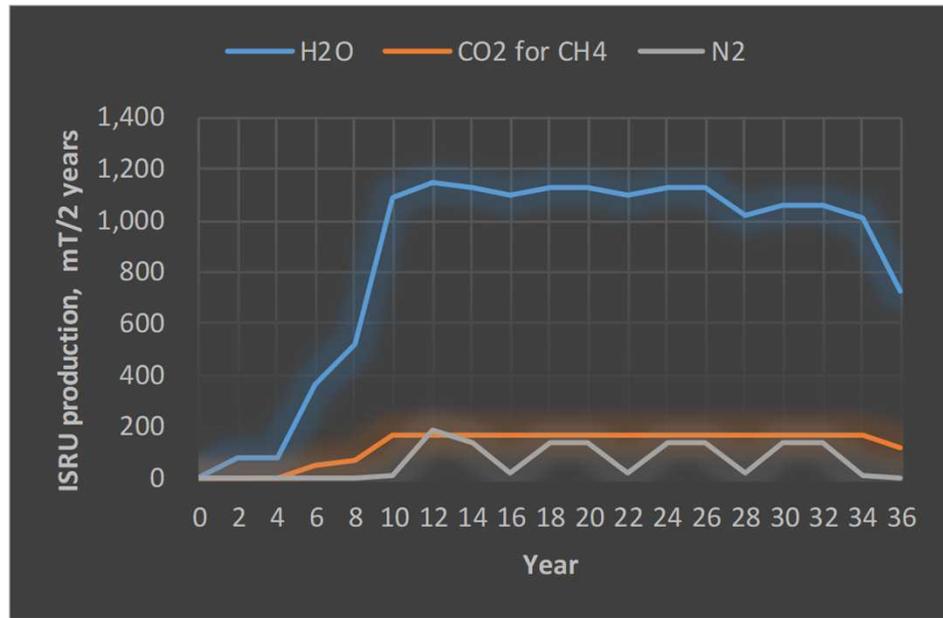
定住人口、入植者数



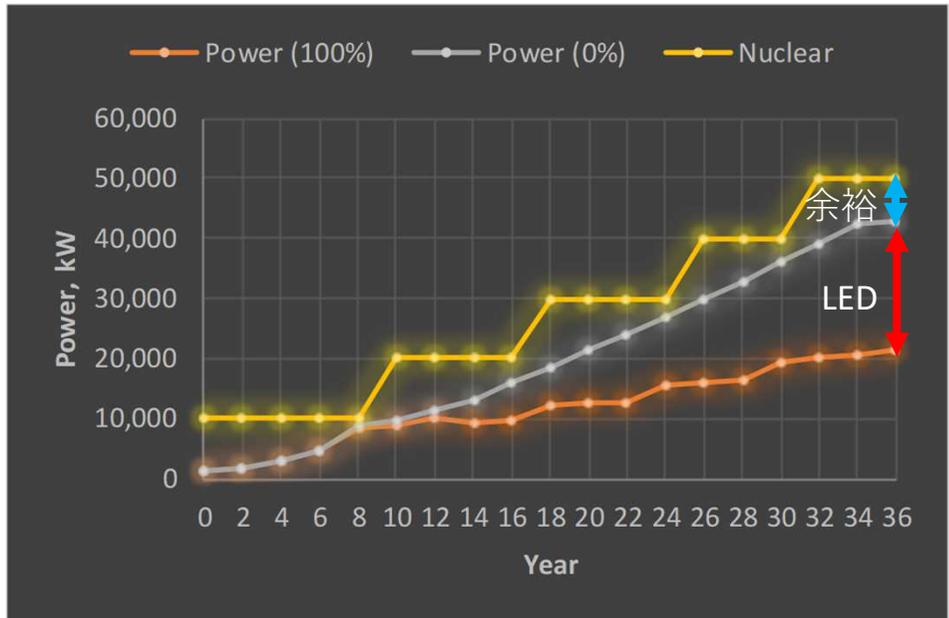
再利用と使い捨て 質量比較



現地での資源生産量



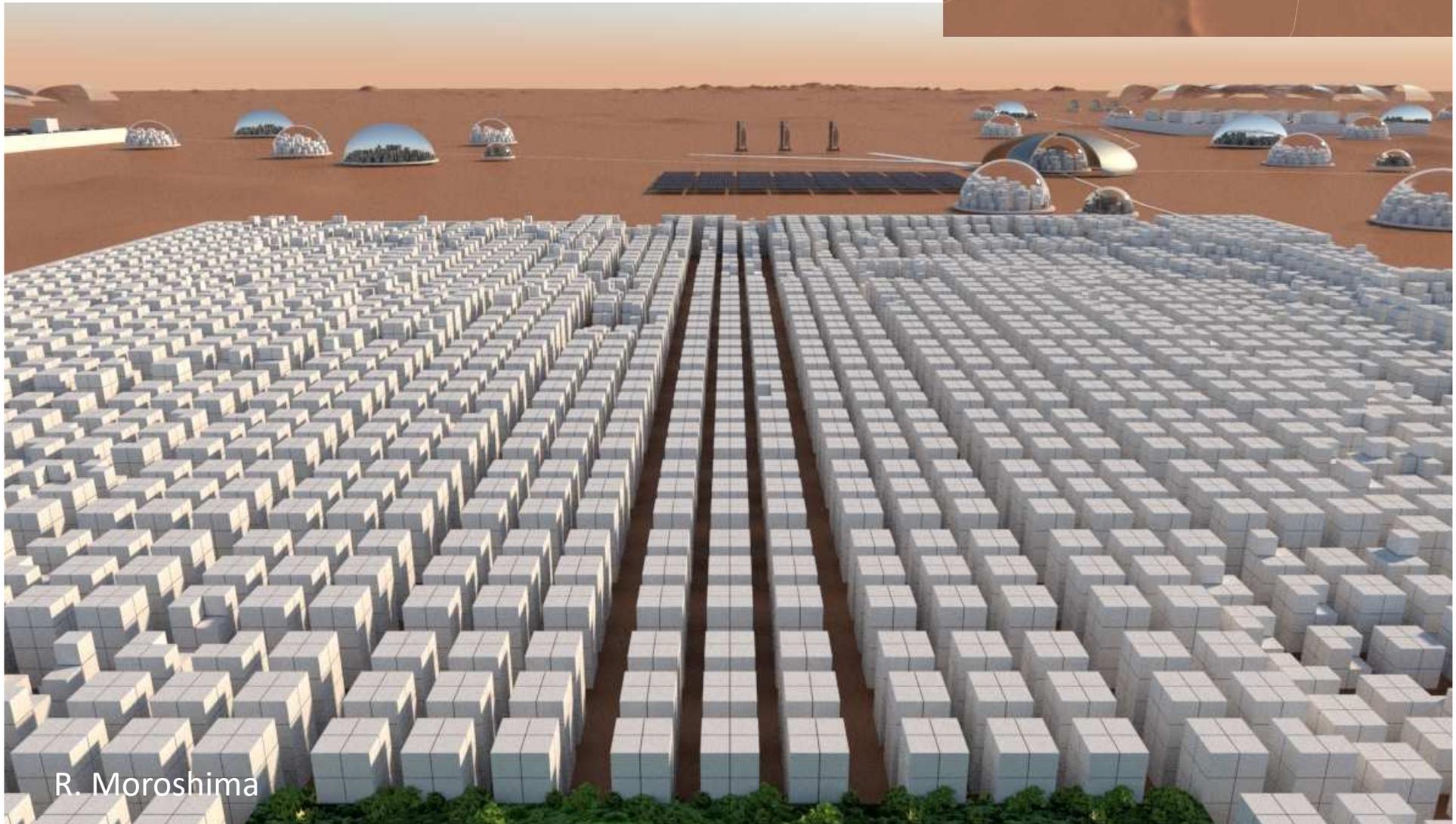
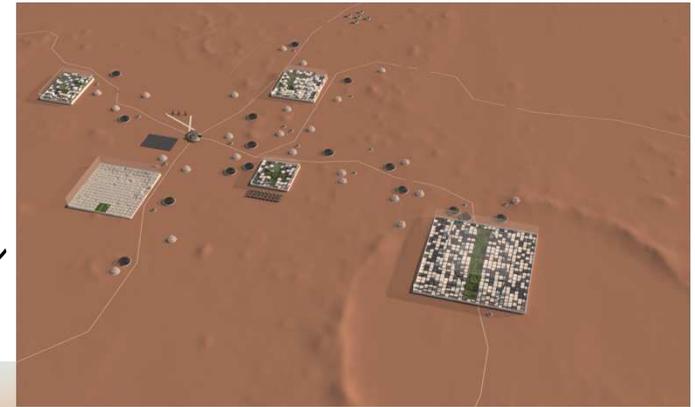
電力使用量 (昼、夜)、電力供給量



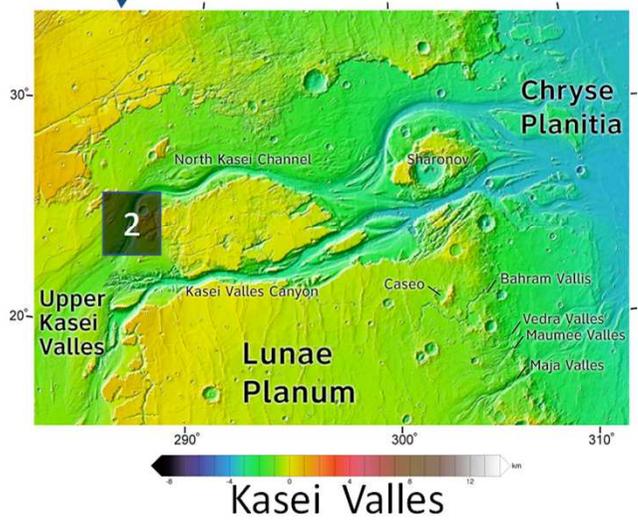
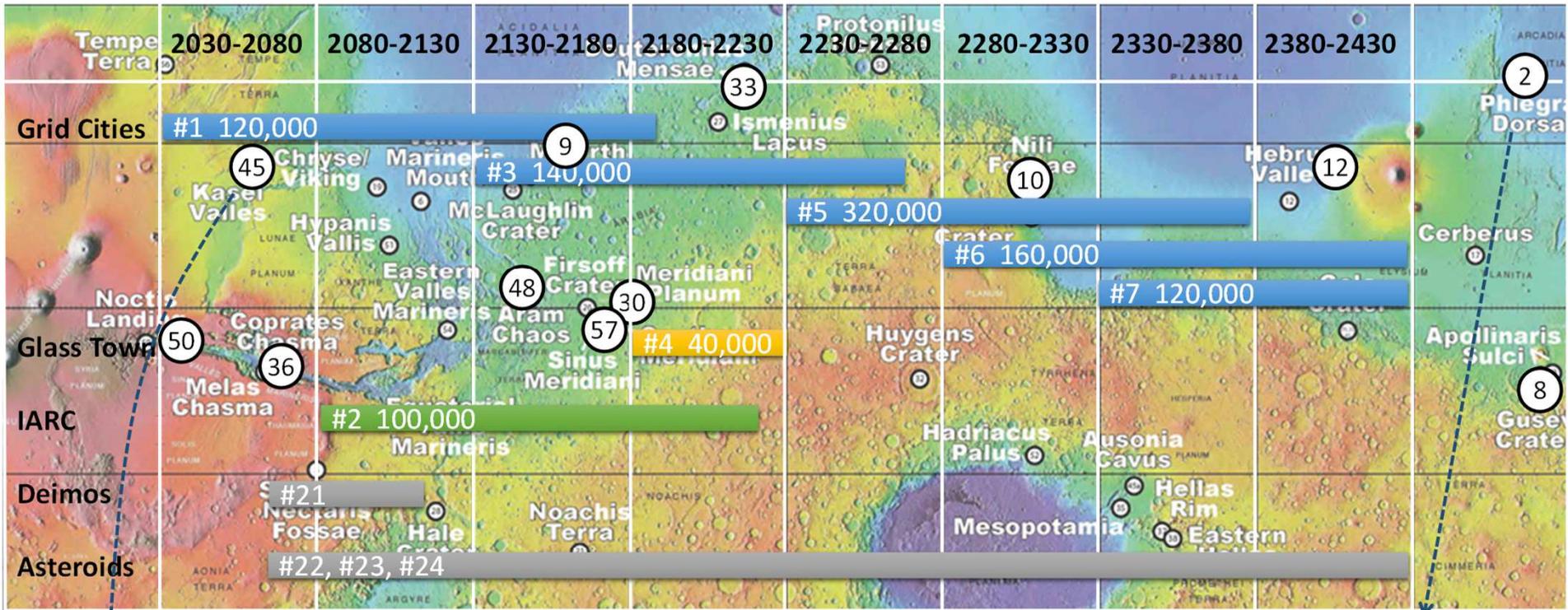
マーズコロニー開発年表

西暦	火星開発
2020年	マーズコロニー開発計画発表
2028年	火星・小惑星開発公社（MADC）設立（30の国、50の企業） 資本金積立開始、開発資金1000億USドル
2034年	無人ロボットにより火星のEndeavour Craterに最初のコロニー建設開始
2038年	最初の開拓団12人がコロニーで居住開始 2年ごとに開拓団が派遣され、インフラ整備が徐々に進む
2050年	最初の市民入植団72名が火星に到着 火星の居住人口は243名に到達
2051年	小惑星資源開発ビジネス開始
2057年	MADC黒字化
2070年	居住人口が1000人を超える 小惑星資源開発に関わる人々への、水、食料、燃料、医療、娯楽の供給拠点となる
2400年	月・火星・小惑星に居住する人口は12万人を超え、そのうち11万7千人が火星に居住

火星100万人都市国家
400年100兆円
1,417km², 30,195MW, 7000万トン



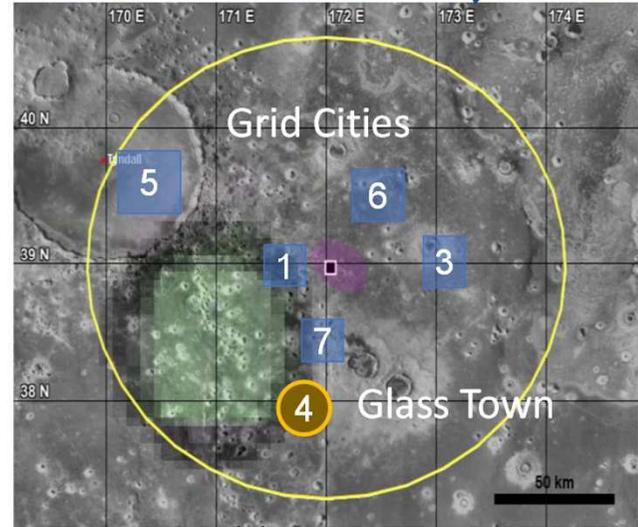
R. Moroshima



1986 DA,
1999 JM8,
and Anteros

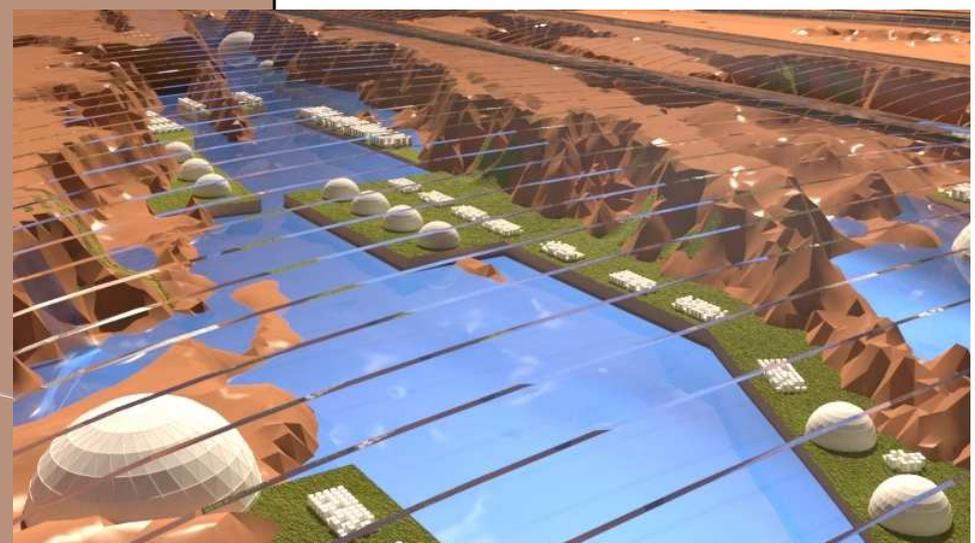
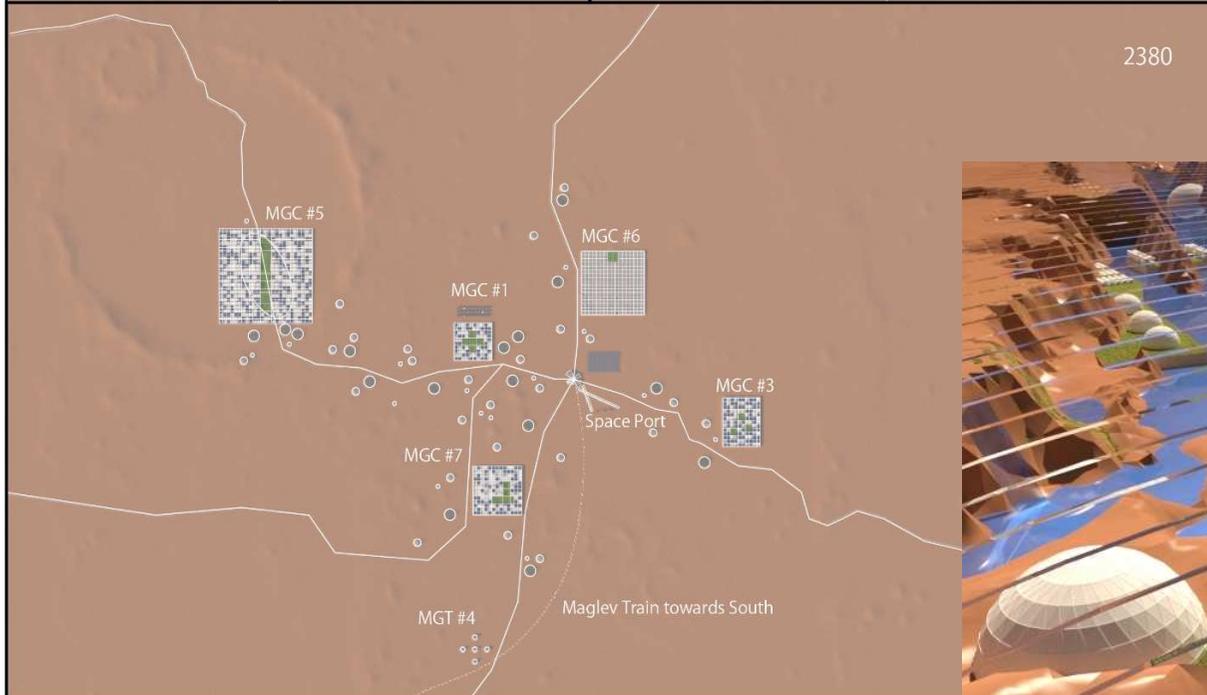
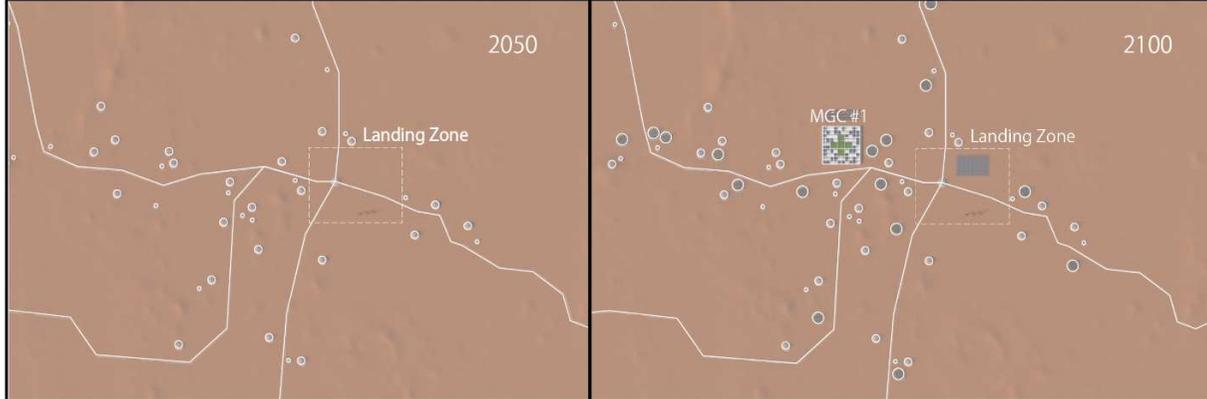


Deimos

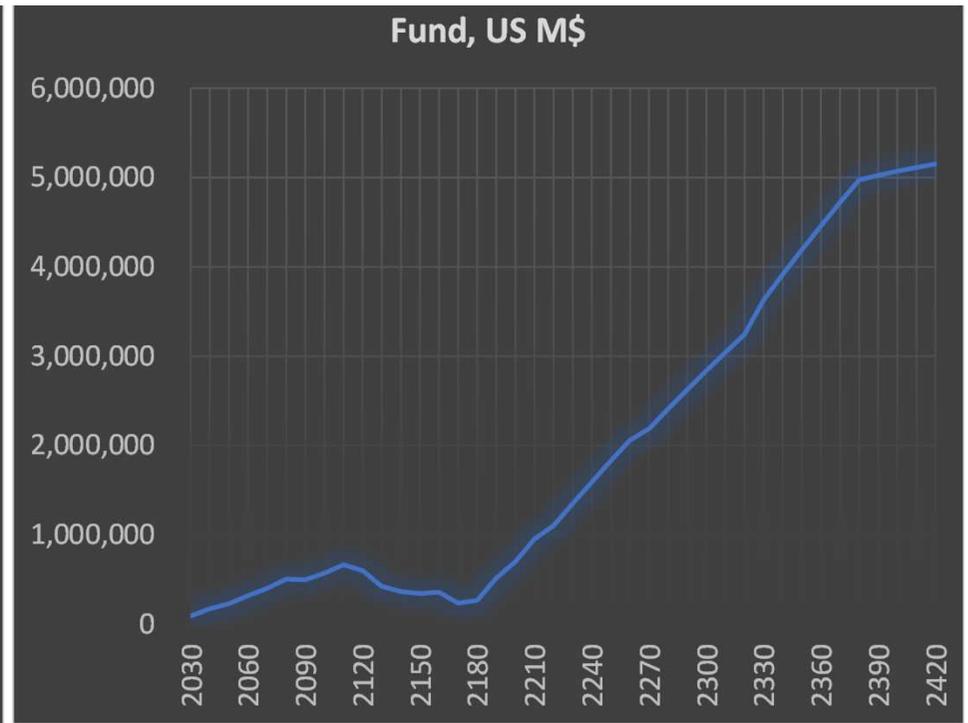
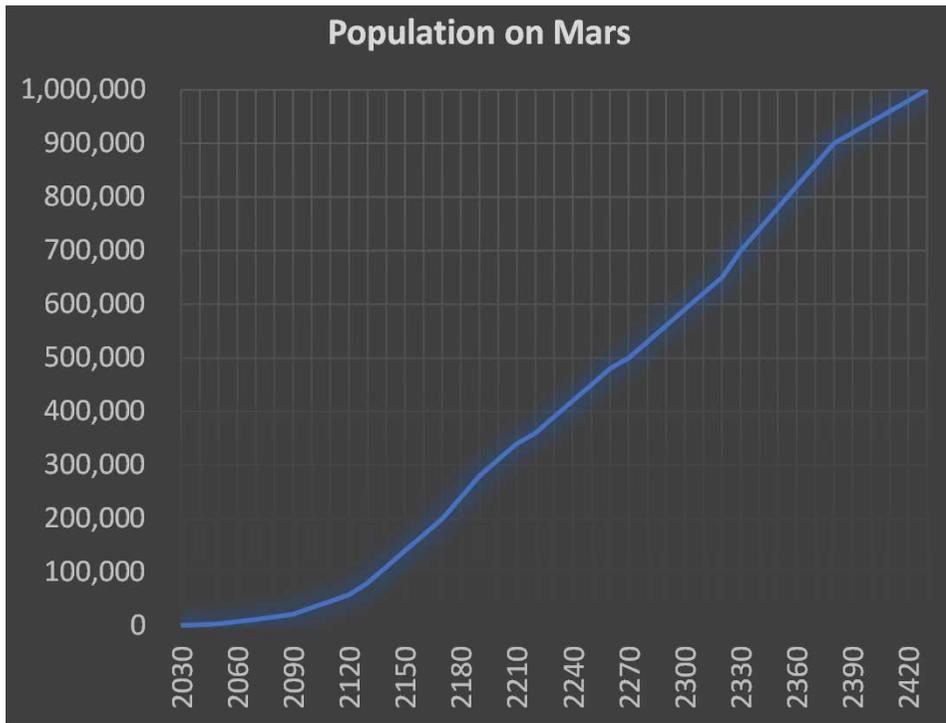


Phlegra Dorsa

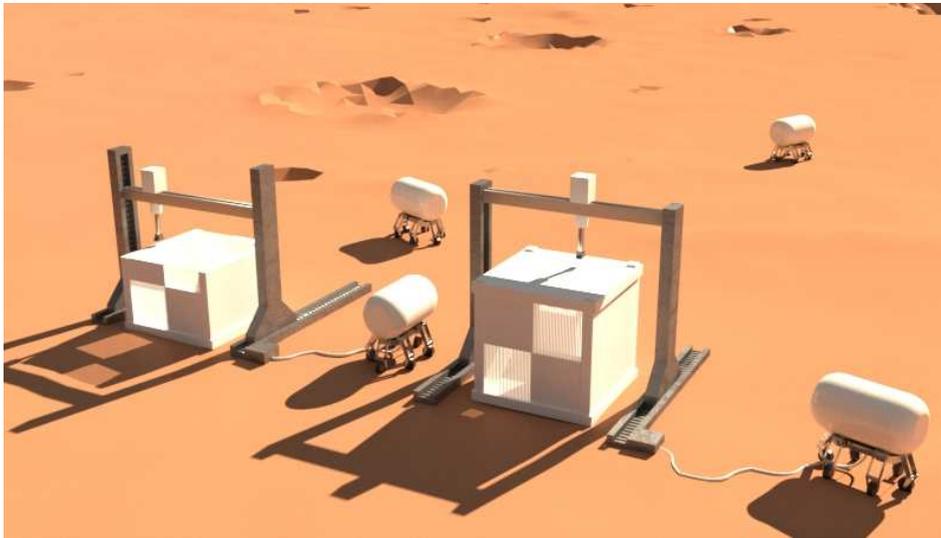
Sites	Zone No	Site Name	City Name	Population	2030	2080	2130	2180	2230	2280	2330	2380	2430
Site 1	2	Phlegra Dorsa	Grid City	120,000	1,000	16,000	60,000	110,000	120,000	120,000	120,000	120,000	120,000
Site 3	2	Phlegra Dorsa	Grid City	140,000	0	0	10,000	60,000	110,000	140,000	140,000	140,000	140,000
Site 5	2	Phlegra Dorsa	Grid City	320,000	0	0	0	0	20,000	120,000	220,000	320,000	320,000
Site 6	2	Phlegra Dorsa	Grid City	160,000	0	0	0	0	0	10,000	60,000	110,000	160,000
Site 7	2	Phlegra Dorsa	Grid City	120,000	0	0	0	0	0	0	20,000	70,000	120,000
Site 2	45	Kasei Valles	IARC	100,000	0	1,000	10,000	60,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
Site 4	2	Phlegra Dorsa	Glass City	40,000	0	0	0	10,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000
Total					1,000	17,000	80,000	240,000	390,000	530,000	700,000	900,000	1,000,000



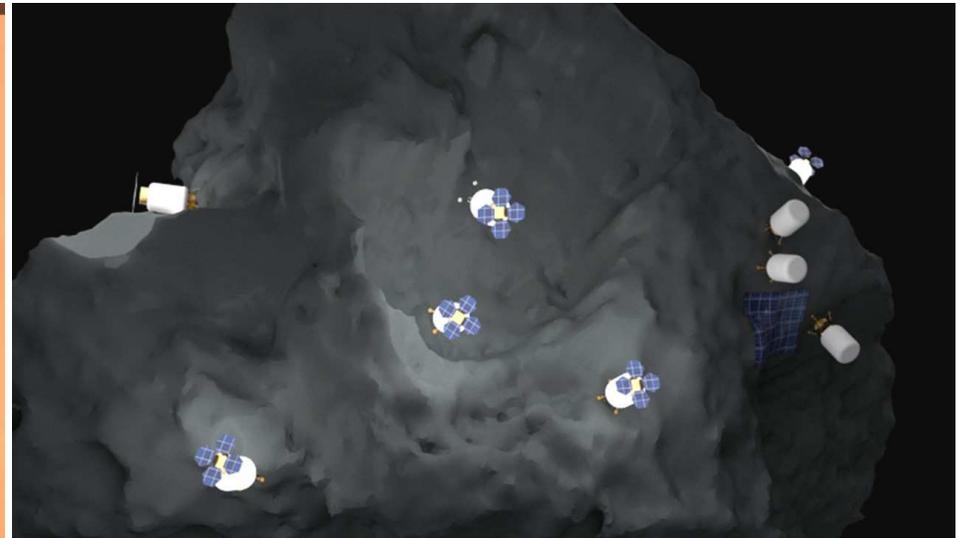
人口増加率
 旅行者の比率
 資源(Fe, Al, Cu, Si)要求量
 水(人、燃料)
 CO₂(植物、燃料)
 生活空間
 ISRUサイズ・電力
 発電設備・発電量
 建設機械



100兆円出資、不動産・資源・運輸・商業



3Dプリンターで必要分を建設



小惑星資源開発

まとめ

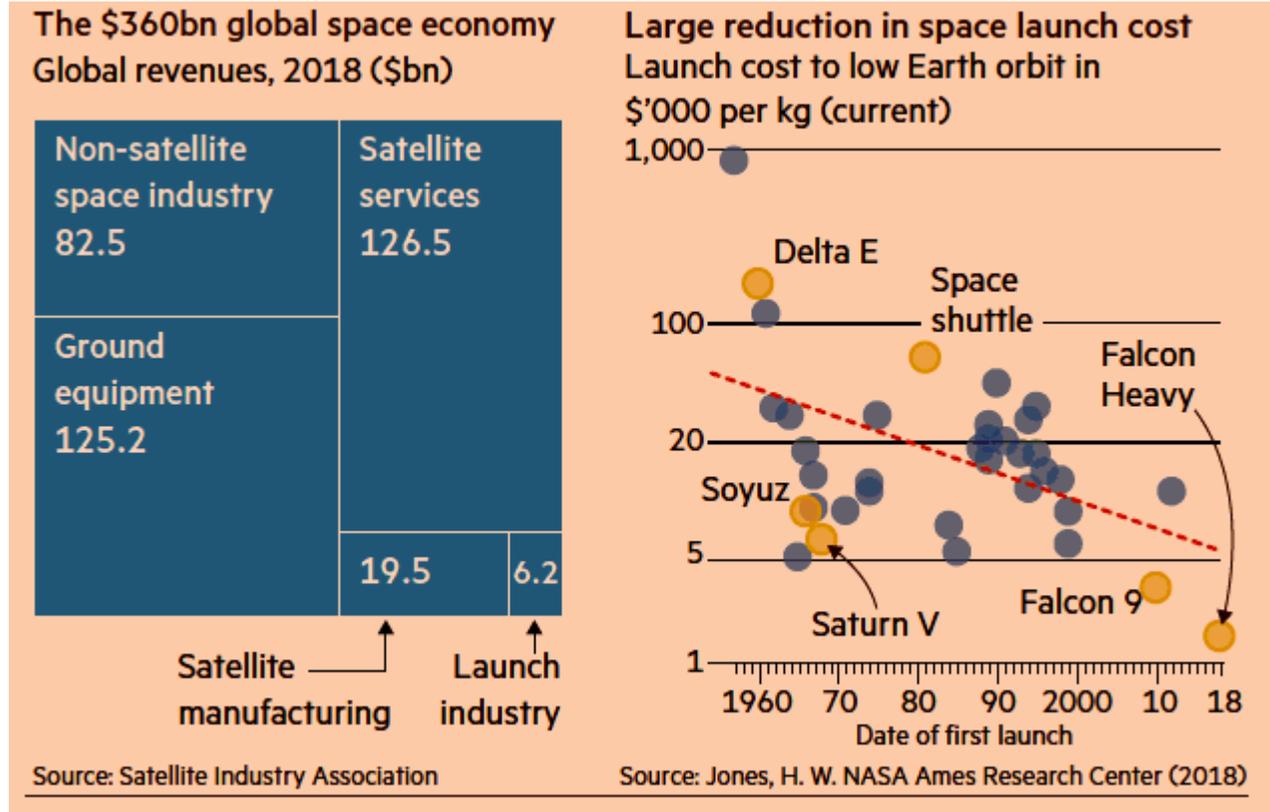
- 目的
- 機能配分
- 定量化、モデル化
- 評価

- Equivalent System Mass (ESM)
- Life Cycle Cost (LCC)
- Life Support Multi-Dimensional Assessment Criteria (LSMAC)

Maintainability, Risk Analysis, Technology Readiness Level, Radiation Impacts, Manufacturing Costs, Reliability, Human Factors, and Un-Crewed Operations.

- 代替案 輸送コストが大きく低下(1/40) 今までとは違う検討

開拓のモチベーション (大航海 (貿易・香辛料)、西部開拓 (黄金)、宇宙開拓 (???) . . . 観光? 資源? 不動産? リース? 教育・エンタメ?)



Lex., FT Weekend, US edition, Saturday 30 May/Sunday 31 May 2020, p. 18.