

**令和3年度  
新・食料産業の創造に向けた宇宙食の開発・実用化促進事業  
実績報告レポート**

令和4年3月15日

SPACE FOOD Research Group  
(代表機関：一般社団法人SPACE FOODSPHERE)

# 本調査実証レポートのサマリー

## 背景・目的

日本政府は2019年10月に、火星を視野に入れつつ月での持続的な活動を目指す米国提案による国際宇宙探査（アルテミス計画）に参画することを決定。本計画への参画に際し、イノベーション創出や新技術の実装化・事業化に向けて幅広い観点から取り組んでいく必要がある中、持続的な宇宙活動を目指す上で重要な要素の一つとなるのが「食」であり、国際的に優位性の高い高度資源循環型食料供給システムおよびQOLマネジメントシステムの構築を目指すことが持続可能な宇宙活動と日本のプレゼンス向上に資すると考えられる。そこで本事業においては、両システムの構築に資する情報収集のため、国際的な技術動向の調査および基礎実証を実施した。

## 調査実証内容・結果

### 1. 閉鎖隔離環境における食とQOLのマネジメントシステム構築に向けた基礎調査・実証

#### 調査概要

閉鎖隔離環境における食とQOLのマネジメントシステムに関連し、国内外における閉鎖滞在実験における技術や運用手法等に関する調査やインタビュー等を実施し、得られた情報の範囲にて各取り組みに関する比較評価を実施した。その結果、以下が明らかとなった。

- 設備の規模、計測・モニタリング項目、チーム構成、提供する食等の組合せは多種多様
- 実験によって様々な計測・分析手法が開発・試行されているが、確立されているものはない
- ハードウェア情報に加えて、構築プロセスや取り巻く環境、制約条件等も重要ファクター
- 食は、味や見た目、栄養、栽培への関与、食卓など複数視点から重要性が報告されている

#### 基礎実証概要

前述の調査結果を踏まえて、以下2テーマの基礎実証を実施し有用な結果を得た。

- 仮想閉鎖空間での実証：市販カメラ等の機材組合せによるデータ取得に関する基礎実証
- 被災経験自治体での実証：共同作業を通じたグループダイナミクス観察に関する基礎実証

### 2. 高度資源循環型食料供給システム構築のための基礎調査・実証

#### 調査概要

高度資源循環型食料供給システムに関連し、食料生産や資源再生、閉鎖実験に関する国内外における技術や取り組みに関する調査やインタビュー等を実施し、得られた情報の範囲にて各国の取り組みに関する定性・定量評価を実施した。その結果、以下が明らかとなった。

- 米国、欧州、中国等において近年も宇宙での食料生産等に関連する多種多様な取組み
- 北米主導のDeep Space Food Challengeにおいて大学や企業など多数プレイヤーが挑戦
- その他、国内外において研究開発/実証又は開示情報が不十分と考えられるテーマが存在

#### 基礎実証概要

前述の調査結果を踏まえて、以下4テーマの基礎実証を実施し有用な結果を得た。

- イネの低圧栽培：低圧環境下におけるイネの花形成および種子稔実の基礎実証を実施
- 変異体のLED栽培：イネ及びダイズの変異体に関するLED複数波長の栽培実証を実施
- 微細藻類の培養：微細藻類の培養効率や自動化率向上に向けた基礎実証を実施
- 資源再生手法比較：廃棄物からの資源回収手法について複数手法の比較実証を実施

## 今後の展望

QOLマネジメントシステムに関しては、月・火星探査を見据えた閉鎖滞在実験が海外で複数計画されているが、目的や実施スキーム、資金規模によって実現できる範囲は大きく異なってくる。日本独自の共創型実証基盤に向けた研究開発、閉鎖実証施設の構築の加速が不可欠。また、高度資源循環型食料供給システムに関連した海外の取組みは近年活発化しており、今後日本がプレゼンスを発揮するためには、本事業の基礎調査・実証結果を踏まえて、日本が強みとする植物工場技術や品種、培養技術等を最大限に活かした研究開発を加速させる必要がある。

## 目次

<b>1. 背景</b>	<b>3</b>
<b>2. 閉鎖隔離環境における食とQOLのマネジメントシステム構築に向けた基礎調査・実証</b>	<b>4</b>
2.1 概要	4
2.2 実施背景と手法	4
2.2.1 既存技術や最新技術に関する調査	4
2.2.2 閉鎖隔離環境施設、及び極地滞在オペレーション等に関する現地調査	4
2.2.3 上記調査に基づく技術やノウハウ等の定性／定量比較	4
2.2.4 調査で抽出された要素技術に関する閉鎖施設での基礎実証	4
2.3 実施結果・考察	6
2.3.1 既存技術や最新技術に関する調査	6
2.3.2 閉鎖隔離環境施設、及び極地滞在オペレーション等に関する現地調査	20
2.3.3 上記調査に基づく技術やノウハウ等の定性／定量比較	33
2.3.4 調査で抽出された要素技術に関する閉鎖施設での基礎実証	37
<b>3. 高度資源循環型食料供給システム構築のための基礎調査・実証</b>	<b>52</b>
3.1 概要	52
3.2 実施背景と手法	52
3.2.1 国内外の研究開発動向に関する調査	52
3.2.2 米国・欧州（ESA MELiSSA等）の最新状況調査	52
3.2.3 上記調査に基づく研究/技術の定性/定量比較	52
3.2.4 調査により判明した研究/技術に関する基礎実証	53
3.3 実施結果・考察	60
3.3.1 国内外の研究開発動向に関する調査	60
3.3.2 米国・欧州（ESA MELiSSA等）の最新状況調査	61
3.3.3 上記調査に基づく研究/技術の定性/定量比較	65
3.3.4 調査により判明した研究/技術に関する基礎実証	88
<b>4. まとめ</b>	<b>103</b>
4.1 閉鎖隔離環境における食とQOLのマネジメントシステム構築に向けた基礎調査・実証	103
4.2 高度資源循環型食料供給システム構築のための基礎調査・実証	104
4.3 今後の展望	106
<b>5. 引用文献情報</b>	<b>107</b>

## 1. 背景

今日、我が国の安全保障や経済社会において、位置・時刻・画像情報や通信機能を提供する宇宙システムの果たす役割が大きくなっており、この傾向は今後更に強まると見込まれる。とりわけ、現下の新型コロナウイルス感染症をはじめとする危機にも対応できる強靱な社会構造の構築が求められる中、宇宙システムは、その実現に不可欠な社会のデジタル化・リモート化の基盤であり、持続的な発展を図っていく必要がある。

このような中、日本政府は、2019年10月に、火星を視野に入れつつ、月での持続的な活動を目指す、米国提案による国際宇宙探査(アルテミス計画)に参画することを決定した。本計画は、月での持続的な活動を目指すなどの点で従来の宇宙科学・探査とは大きく性格が異なるものであり、これまで以上に、イノベーションの創出や新技術の実装化・事業化に向けて幅広い観点から取り組んでいく必要がある。

月あるいは火星まで人類の活動領域を広げ、持続的な活動を目指す上で重要な要素の一つとなるのが宇宙での「食」であり、その開発・実装化にあたっては2つのアプローチがある。

1点目は生活の質(QOL:Quality of Life)に関する課題である。月や火星における閉鎖隔離環境下での生活においては、地球上からの遠隔サポートには限界があるため、宇宙飛行士等が長期滞在する際の心身の健康問題への対応が必要となる。長期間にわたる活動を可能とするためには、個人の健康状態や集団生活(チーム)における人間関係などの状態把握と、食を中心としたソリューション提供を行う仕組みを併せ持つ QOL マネージメントシステムの構築を必要がある。

2点目は、安定的な食料の確保に関する課題である。一定人数以上が月や火星で長期間生活することとなれば地球からの食料の輸送コストが膨大となるため、持続的な食料供給を確保するためには、現地での食料生産システムを構築することが不可欠である。月面や火星では、植物の成長や有機物合成に必要となる水や酸素、二酸化炭素、養分などの供給が極めて少ないことから、地球から持ち込んだ資源を極限まで再利用できる技術も必要となるため、閉鎖隔離環境においてこれまでに開発された様々な要素技術を結集してシステムの統合及び研究開発を推進し、高度資源循環型の食料供給システムの構築を目指す必要がある。

以上のことから、本事業では閉鎖空間における食を中心にQOLを維持・向上させるためのQOLマネージメントシステム及び高度資源循環型食料供給システムの構築に向けた基礎調査・実証を実施することとする。

## 2. 閉鎖隔離環境における食とQOLのマネジメントシステム構築に向けた基礎調査・実証

### 2.1 概要

月・火星等の長期滞在を想定した閉鎖滞在実験等に関する取り組みは、これまで米国やロシアを中心に様々な実験や研究が進められている。これらの国内外の動向調査について、JAXAを中心に宇宙システム開発（SSD）、フィールドアシスタント（Fa）等、知見を有する関係企業等の協力を得て2019～2020年度にかけて調査を進めてきている。

これまでは、①国内外における閉鎖環境設備及び当該設備を使った実験の事例に関する全般的な調査、②閉鎖隔離実験の研究成果に関する調査、③宇宙・地球の様々な極地環境に関する比較調査（防災等の地上課題とのシナジー検討）について、それぞれ研究報告書、論文・書籍、各宇宙機関や組織等のウェブサイト、ニュース記事等の公開情報をベースに情報収集を行い基礎情報としてまとめている。また、今後の当該分野の研究開発を見据え、⑤閉鎖環境や極地における食の課題に関するインタビュー調査、⑥閉鎖実験施設を活用した衣食住関連実証に関するフィージビリティ検討などの取り組みも進めてきた。

本調査においては、上記の宇宙や極地等の閉鎖滞在実験に関する更なる詳細な調査や検討結果に加え、実際の閉鎖隔離実験施設への現地視察を通じてより実践的な研究手法・成果に関する情報ベースを構築し、当該分野の知見を有する有識者等の協力を得ながら、今後の具体的な研究開発につながるテーマに注力した調査及び基礎実証を実施した。

### 2.2 実施背景と手法

#### 2.2.1 既存技術や最新技術に関する調査

2019年度より継続的に閉鎖隔離環境や極地滞在に関する様々な基礎調査や比較・検討を行ってきた知見と蓄積した情報を活かし、より具体的かつ実践的な調査を実施することで、閉鎖隔離環境における食とQOLのマネジメントシステム構築に向けた基礎となる情報収集を行った。

調査手法としてはこれまでと同様に、学術的な知見に基づく論文や書籍を基本的な情報ソースとして、オンラインでの文献調査、情報収集およびその整理を行い、関連する学会への参加や有識者へのヒアリングなどにより、最新の技術動向や情報の背景や課題などについても踏み込んだ情報収集を行った。

#### 2.2.2 閉鎖隔離環境施設、及び極地滞在オペレーション等に関する現地調査

米・ハワイに所在し、NASAとハワイ大学が共同で継続的に実験を実施している閉鎖隔離施設「HI-SEAS」を訪問し、施設や運用オペレーションに関する現地調査、及び運用責任者や実験経験者等へのヒアリング調査を行った。過去の知識や経験を基に、実際の現場での運用の課題や問題点などに対する気づきや考察に繋げることが重要であるため、閉鎖隔離実験や極地での滞在経験のあるメンバーを現地に派遣し、具体事例に基づく実験運用に関する実践的なノウハウや課題抽出を行った。

#### 2.2.3 上記調査に基づく技術やノウハウ等の定性/定量比較

過去の実績としての調査結果をベースに対象の比較・分類を行い、「2.2.1 既存技術や最新技術に関する調査」や「2.2.2 閉鎖滞在実験施設、及び極地滞在オペレーション等に関する現地調査」の結果として得られた問題点や課題を分析の骨子として定性/定量比較を行った。比較の方法としては、閉鎖環境に関する過去の調査の際に適用した極地分類を活用し、閉鎖隔離実験におけるオペレーション内容および被験者やクルーの活動における「閉鎖空間・環境」「設備・センサー」「チーム構成・パフォーマンス」「食」「倫理」に関する分析項目を着眼点とした比較手法等を利用して定性/定量比較を実施した。

#### 2.2.4 調査で抽出された要素技術に関する閉鎖施設での基礎実証

閉鎖隔離環境に準じた設備等を利用し、閉鎖模擬実験における計測・モニタリング機器等を用いたオペレーション手法に関して、調査・分析で得られた知見を活用し、想定される実際の閉鎖実験の期間や計測シーンなどを見据えて、各機器の動作状況や耐久性、通信強度等の確認に関する予備実証を行った。

また、閉鎖施設に加え、2016年4月の熊本地震で2度の震度7を経験した熊本県益城町において、今後の防災対策の一環として自治体を実施する避難所運営の検討活動等とも連携し、一部の基礎実証を行った。また、実際に長期の避難所生活等を経験した町民やその支援をした自治体職員等のリアリティのある経験に基づいた意見やフィードバックも収集した。

上記基礎実証に関する具体的手法等については、「2.3.4 調査で抽出された要素技術に関する閉鎖施設での基礎実証」にて記載する。

## 2.3 実施結果・考察

### 2.3.1 既存技術や最新技術に関する調査

・学術的な知見に基づく論文や書籍を基本的な情報ソースとして、オンラインでの文献調査、情報収集およびその整理を行った。情報収集にあたっては「閉鎖空間・環境」「設備・センサー」「チーム構成・パフォーマンス」「食」「倫理」に関する内容を中心に、閉鎖隔離実験におけるより詳細な情報の取得に努めた。

・2021年11月9日～12日にかけて開催された「第65回 宇宙科学技術連合講演会」に参加し、最新の技術動向について調査を行った。今回の宇科連では閉鎖居住施設・実験に直接関連する論文はそれほど発表されていなかったが、宇宙居住や有人活動をキーワードに多様なアプローチで研究が進められており、閉鎖居住に類する技術・研究について情報収集を行った。

#### (1) 極限閉鎖環境の比較検討（過去の調査内容の整理）

JAXAやSSD、Faは、これまで様々な極限閉鎖環境、いわゆる極地について調査を行ってきた。地球上の厳しく、過酷な自然環境下での生活や滞在、ならびに究極の極地である宇宙での有人活動など、現在人間が暮らし、活動を行っている様々な極地の整理から、各極地で培われた極限環境に対応するためのソリューションやその前提となる考え方を抽出することで、人類の宇宙進出を推進するための技術開発を行うと共に、地上での生活への応用や防災・災害対応への適用など、宇宙と地上の両輪で研究・開発を行うことを目的に、極地という共通項に関する比較検討を進めてきた。これら調査・研究の結果（文献1、文献2）は、本調査が目指す極地および閉鎖環境におけるQOLマネジメントシステム構築に向けた基礎情報として本調査においても活用・検討した。

#### ① 極地環境

現在の人間の活動範囲または近い将来に想定される生活圏を、地上と宇宙の11か所の極地における計13か所の比較対象滞在施設（表2.3.1-1）として抽出し、それぞれの極地で人間が滞在をしていく上で、どのような工夫がなされているか、具体的な生活環境の調査を行っている。

表2.3.1-1 極地環境

場所	カテゴリー	極地	比較対象滞在施設
地上	パーソナル	避難所	体育館（日本）
			避難施設（イタリア）
		隔離施設	ダイヤモンドプリンセス号
		ヴァンライフ	日本国内のヴァンライフ
		キャンプ	日本国内のキャンプ
	チーム	山頂ベース	エベレストのベースキャンプ
		南極基地	昭和基地
潜水艦		そうりゅう型潜水艦	
宇宙	地球低軌道		スペースシャトル
			国際宇宙ステーション
	月周回軌道		ゲートウェイ
	コミュニティ	月表面	1,000人規模の月面基地
		火星表面	1,000人規模の火星基地

## ② 極地比較評価

調査結果を基に各極地を8つの観点（表2.3.1-2）で各極地の過酷度の評価を行った結果をレーダーチャート（図2.3.1-1～図2.3.1-3）で示している。レーダーチャートは数値が大きいほど過酷度が高い指標となっているが、この結果から、必ずしも周囲の自然や地理的な過酷さが極地の過酷さに繋がっている訳ではなく、むしろ多分に滞在する人間の健康状態や心理的状况に依存することが如実に示された。自然条件の良い地上にある避難所（日本）や隔離状態にある豪華客船（ダイヤモンドプリンセス号）よりも、文明都市部から離れ、自然環境の厳しいエベレストや南極、宇宙の方が、そこに滞在する理由やモチベーションの違いにより、トータルでの過酷度は低くなる結果となった。

表2.3.1-2 極地過酷度の評価観点

観点	概要
1. 基本	極地の前提条件や代表的な特徴、滞在者の年齢構成や健康状態などの基本情報
2. 地理	極地の気温や気圧などの地理的環境条件
3. 居住	居住空間の大きさ、室温、音、明るさなどに代表される居住施設の居住性
4. 環境	極地でなされている食料・水の供給および汚水・廃棄物処理などの環境制御技術
5. 健康	滞在者の身体の健康に関わる食、睡眠、公衆衛生など
6. 心理	滞在者の心の健康に影響を与えるストレス因子など
7. 運用	極地で提供されている滞在者の支援体制および施設の運用体制など
8. 計画	リスク管理・対策などの考え方

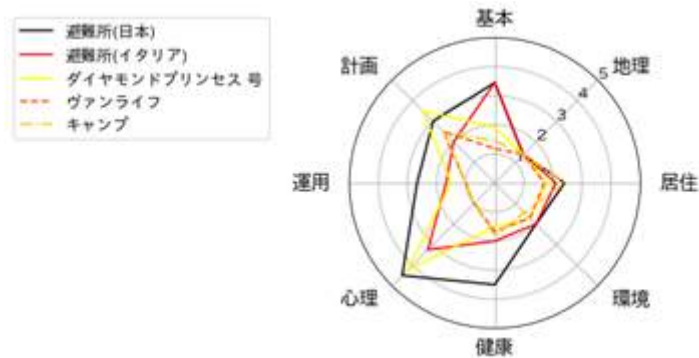


図2.3.1-1 評価結果 (パーソナル・地上)

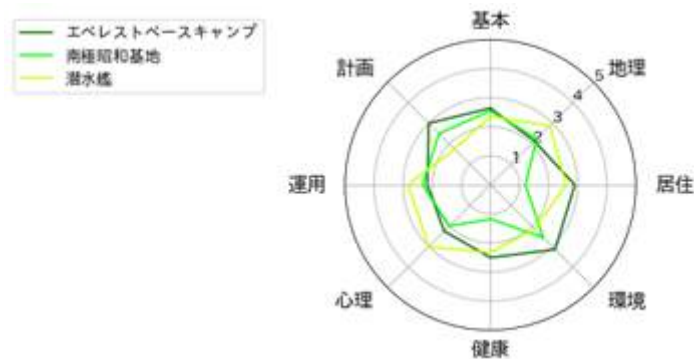


図2.3.1-2 評価結果 (チーム・地上)



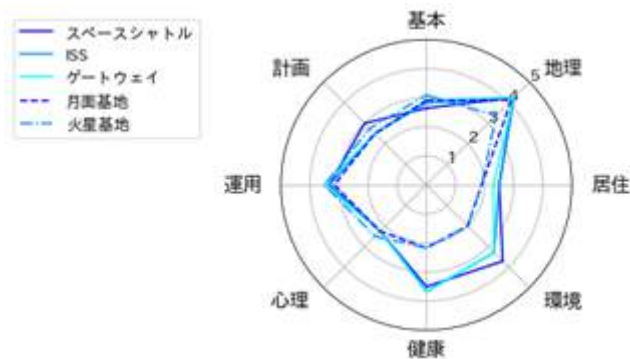


図2.3.1- 3 評価結果 (チーム/コミュニティ・宇宙)

こうした極地における過酷度を和らげる手法として、居住環境・設備といったハード面の改善による手法が考えられるが、費用面での制約や経年的な設備の劣化や陳腐化など、常に最良の状態を維持することは難しい。一方で、滞在者の健康や心理面を改善するための運用や計画などのソフト面は、比較的アップデートが容易で柔軟な対応が可能であると考えられる。とりわけ閉鎖隔離環境における食に関しては、滞在者の心理面に与える影響が非常に大きく、滞在者のストレス緩和や心理状態の把握といった極地におけるQOL (Quality Of Life) 向上を検討する上で、こうした分野の研究・開発を推進していくことは宇宙のみならず地上に大きな還元をもたらす研究になるものと考えられる。

## (2) 国内外の閉鎖隔離環境 (過去の調査内容の整理)

閉鎖隔離環境における滞在实际やミッションは、国内外において様々な形で実施されてきた。そのような中で滞在者の心理面やストレスの度合いによって、各個人やチームとしてのパフォーマンスにどのような影響が出るのか、多様なデータや結果が抽出されているが、その性質上、人間のプライバシーや倫理面に关わる問題が多く、情報の共有や実験手法の共通化などに関して、現状でも大きな改善の余地がある状況となっている。これら調査・研究の結果 (文献3、文献4、文献5) は、本調査が目指す極地および閉鎖環境におけるQOLマネジメントシステム構築に向けた基礎情報として本調査においても活用・検討した。

### ① 宇宙探査におけるリスク

宇宙の果てまで探検することは、地球上とは異なり、極限環境で宇宙飛行士の体と心に大きな負担を強いる。人間は非常に順応性があるが、長期間宇宙探査 (Long Duration Space Exploration: 「LDSE」) の物理的な危険性は、生物の行動機能、個人およびチームのパフォーマンス、およびミッションの成功に対する様々な脅威をもたらしている。こうした宇宙飛行・宇宙探査における物理的リスクおよび神経行動学的リスクを以下に示す。

#### a) 物理的リスク

- 放射線
- 重力
- 閉鎖環境－居住空間内の微量有害ガス、微生物
- 隔離 (孤立) と監禁状態 (制限・制約) ーストレス要因
- 地球からの距離－限られた医療、食糧

#### b) 神経行動学的リスク

- 覚醒/調節系 (概日リズム) と感覚運動系 (運動行動の制御・実行・抑制)
- 正原子価と負原子価－対人関係における結合概念：ストレスによる行動への影響
- 認知的 (注意・記憶・認知制御) および社会的 (コミュニケーション) プロセス

## ② 模擬実験施設（アナログ）環境利用実験に対する考慮事項と課題

月、小惑星、火星へのミッションなどの将来の宇宙探査において、個人やチームは、無重力や低重力、限られた種類の食事や運動、放射線被曝の増加といった物理的条件の下で長時間作業し、生活することになるが、閉じ込められた宇宙空間、限られたプライバシー、可変的な作業負荷、家族や友人からの隔離といった心理社会的ストレスも加わる。

閉鎖隔離実験は、宇宙飛行に関連したリスクを特徴づけるために、地上ベースの宇宙模擬実験施設（アナログ）環境、あるいは研究が一般化すると予想される対象環境や集団の一つ以上の定義的特徴を共有する環境で実施されている。アナログ環境での研究は、目標とする運用環境よりも制約の少ない作業や生活のリスクに関する極めて重要なデータを提供することができるが、かなりの課題を抱えている。

### a) アナログの特定と選択

- アナログの包括的なリストが存在しない
- アナログの適切性は汎用性のある研究課題や関心の大きさに依存

### b) アナログ利用の許諾

- 利用申請のプロセスが謎に包まれている
- 利用申請のプロセスに時間がかかる

### c) データ収集の課題

- アクセスが困難な場所でのデータ収集の難しさ
- 基準データの不足
- サンプルサイズの小ささ

## ③ 世界の閉鎖隔離環境

世界には閉鎖隔離環境が幾つか存在するが、大きく分けて2つに分類される。1つはICE（Isolated, Confined and Extreme）と呼ばれ、地球上にある実際の極限環境に短・長期の滞在を行い、地上における研究などを行うことを目的とした環境である。もう1つはICC（Isolated, Confined and Controlled）と呼ばれ、宇宙探査における問題や課題をシミュレートすることを目的とした模擬実験施設（アナログ）であり、通常は地上の比較的気候の穏やかな場所や都市部などに存在する。最近では宇宙探査におけるシミュレーションを目的としたアナログを、敢えてICEとして比較的厳しい環境に構築し、よりリアルに近い模擬ミッションを行うケースも増えてきている。

### a) ICE（Isolated, Confined and Extreme）： 閉鎖隔離極限環境

- 各国南極観測基地【マクマード基地（米国）等、南極】： 南極観測プロジェクト
- ANSMET（南極隕石探索）プロジェクト【南極】
- HMPRS【デヴォン島、カナダ】： Haughton-Marsプロジェクト
- アクエリアス海底研究所【フロリダ、米国】： NEEMO（NASA Extreme Environment Mission Operations）
- Mars Desert Research Station【ユタ、米国】： MDRS、Mars160
- HI-SEAS【ハワイ、米国】： HI-SEAS Mission

### b) ICC（Isolated, Confined and Controlled）： 閉鎖隔離制御環境

- HERA（Human Exploration Research Analog）【ヒューストン、米国】： NASA－HERAキャンペーン
- 閉鎖環境適応訓練設備【つくば、日本】： JAXA－宇宙飛行士選抜試験
- NEK（地上実験施設）【モスクワ、ロシア】： Russia－Mars500

表2.3.1-3 ICEとICCの比較

ICE（閉鎖隔離極限環境）	ICC（閉鎖隔離制御環境）
極限環境	ローカル環境
リアルミッション ※最近では模擬ミッションを行う目的の施設もある	模擬ミッション
研究はミッションの補助	研究はミッションが目的
コンディション制御が限定的、あるいは皆無	コンディションの実験的制御
フィールドワークまたはトレーニングミッションに選ばれた乗組員	宇宙飛行士の基準を満たすために選ばれた乗組員
乗組員の人数は可変	乗組員のサイズを制御可能

#### ④ 閉鎖隔離実験におけるデータ取得

安全上重要な動的環境における複雑なタスクで高いパフォーマンスを発揮するには、チームの一員として他者と協力して作業する能力に依存することが多い。チームワークのコンピテンシー（高い業績を出す行動特性）は、伝統的に観察や調査を用いて測定されてきた。生理学、活動、およびコミュニケーションデータを測定できるものを含むウェアラブルの出現は、現在、研究者に、比較的控えめで自動化された方法でチームの相互作用データを収集する手段を提供している。

以下に対人交流に関するデータ取得およびチーム内関係性測定フレームワークの手法を示す。

##### a) 対人交流に関するデータ取得

###### i. 生理学的測定

- ・心血管測定（血圧、心拍変動、呼吸性洞性不整脈）
- ・皮膚コンダクタンス（電気皮膚活動）
- ・感情表現（顔面筋電図）
- ・神経イメージング（脳波、fMRI）
- ・生化学的・ホルモン変動（コルチゾールレベルの変化）

###### ii. 言語的・パラ言語的コミュニケーション

- ・アンケートや観察－伝統的手法
- ・目立たない測定とリアルタイム自然言語処理－2000年代後半からの測定システム  
※パラ言語的コミュニケーション（コミュニケーションの流れ、ジェスチャー、姿勢、表情、視線行動、声の速度・音量・音程）

###### iii. 地理空間センシングとアクティビティ追跡

- ・センサーによるチームメンバーの物理的接近性や行動・身体活動レベルの集団的パターン
- ・コラボレーションに使用される情報システムで補足された活動

##### b) チーム内関係性測定フレームワーク

###### i. 概念ドメイン

- ・関心要素（例：ICE環境における個人・チームのストレス要因、適応、回復力）の定義と既存フレームワーク・理論への適用検討
- ・チーム構成（例：宇宙飛行士の数、役割）における属性分析

###### ii. データ収集・測定ドメイン

- ・データの収集（ストレス・適応に関する情報：生理学的データ、音声・ビデオデータ、タスク完了時間、エラー率、等）
- ・関心のある観察結果へ番号・カテゴリー割り当て（分散と変化の程度、エラーからの回復率など苦痛－適応基準によるコード化）

### iii. データ分析ドメイン

- ・異なる要素と関心のある現象間の関係性検証（例：チームコミュニケーション分析－一般線形モデルから膨大なデータを活用したネットワーク分析、システムダイナミクス分析、シーケンシャル分析へ）
- ・観察等の伝統的な測定方法＋複数のデータを統合したコンテキストの構築

## ⑤ 極限環境実験に関する倫理

宇宙空間の極限環境下で実施する極限環境研究の倫理に関して常に新たな問題が存在し、研究者は必然的に（1）この研究が現在の倫理ガイドラインを使用して評価できるかどうか、（2）新たな研究ストリームの独自の性質を考慮して、新しい倫理基準が必要かどうか、という疑問を考慮しなければならない。

人間が極限環境にて人体を使った実験を行う場合の理念や指針が戦後いくつか制定され、今日の有人宇宙探査に向けた人体実験や模擬実験を行う際の指針となっている。以下にその概略を示す。

### a) ベルモント報告書

- 倫理的研究実践の基準を記述したもので、(1)米国における研究関連の規制と(2)組織が研究プロトコルを審査するために使用する現在の手順の基礎となった文書
- これまでの倫理指針とは異なり、明らかに医学的なものに焦点を当てたものではなく、幅広い分野の研究の指針となり得る3つの中核的な原則「人の尊重、ベネフィシエンス（恩恵）、正義」を強調

### b) NASAの4つの保護

- いかなる形でも強制されることなく、自由かつインフォームド・コンセントによって示された自発的な参加
- 被験者がいつでも、理由を問わず、ペナルティなしで実験から撤退する自由
- 被験者または社会に対する研究の潜在的な利益と、被験者が負うリスクとの間の適切なバランス
- 研究対象者の選定における公正な手続きと成果

### c) 課題

- 火星ミッションなど新たな探査活動では途中離脱は不可能
- 既存のガイドラインではリスク分析（リスクと報酬のバランス）の詳細が非提示

## ⑥ 宇宙探査におけるチームワーク

宇宙でのチームワークに必要な考え方として、チームワークのABCS（attitudes, behaviors, and cognitions：態度、行動、認識）がある。多くのチームのABCは相互に関連しており（例：チーム認識の変数がチームメンバーの行動に影響を与えるなど）、これらの構成要素は、効果的な宇宙飛行士チームのための他の重要な構成要素へと拡張することを可能にする。

### a) Attitudes：態度

- 心理的安全性－相互作用を介して現れるチームレベルの態度
- 相互信頼－チームメイトの利益を守るといった共通の信念
- 集団的志向性－チームにおける集団で働くための態度または嗜好

## **b) Behaviors : 行動**

- 衝突管理－必ずしもチームの有効性を否定しない衝突の管理
- 調整－複雑なタスクにおけるメンバー間での仕事量の移動

## **c) Cognitions : 認識**

- チーム学習－個人の知識構築、チーム知識の構築、チームの継続的な改善
- チーム知識の成果－チーム全体での知識の分布、個人の知識範囲の共有

## **⑦ 長期宇宙探査におけるチームワーク訓練**

長期宇宙探査におけるチームワーク訓練に関しては、通常の宇宙探査と異なる手法が要求される。深宇宙においては地球との通信もリアルタイムでは行われない中、長期の間、個人の価値観や考え方、場合によっては文化も異なるチームメンバーに自らの命を預け、自律したミッションを遂行していく必要がある。こうした発展途上のチームワーク訓練について以下に示す。

### **a) チームトレーニング概要**

- 効果的なチームワークに関するKSA（知識：Knowledge、技能：Skills、態度：Attitudes）
- トレーニングコンテンツ、配信方法、ツールの検討

### **b) 多文化チームの訓練**

- 文化の多様性：個人の価値観、信念、態度が国の違いによって引き起こされる深層レベルの多様性
- 科学的状況：文化の多様性がチーム認識に与える影響を調査した研究は殆ど存在しない

### **c) 火星に向けた宇宙飛行訓練**

- 現在の訓練設計は深宇宙探査に必要な自律性レベルにはない
- 合理的な訓練必要性（12日間のSSミッションに必要な訓練期間は1年間）
- 通信遅延の影響の軽減

### (3) 閉鎖隔離環境の比較

国内外には様々な閉鎖隔離環境が存在しており、その中で多様な閉鎖隔離模擬実験が実施されてきた。実験から得られた様々な知見は、研究論文や書籍、メディアによる取材記事、アウトリーチ活動によるホームページやSNSなど、様々な形で情報の共有が行われており、こうした情報の中から、学術的な論文や書籍を基本的な情報ソースとし、過去の調査においてターゲットとした世界の主要な閉鎖隔離施設・環境を中心に、閉鎖隔離模擬実験や、閉鎖隔離環境をベースとした研究ミッションの詳細について情報収集を行った。

過去の国内外の主要な閉鎖隔離環境の比較について論じた学術論文（文献6）の比較表に倣い、収集した情報（文献7～文献69）を基に、現在の閉鎖隔離環境について「①主要な閉鎖隔離環境の概覧」「②主要な閉鎖隔離環境における科学および医学調査」「③主要な閉鎖隔離環境における技術、試験および開発」「④主要な閉鎖隔離環境の技術・研究情報」として作成した比較表を、以下に記載する。

#### ① 主要な閉鎖隔離環境の概覧

表2.3.1-4 主要な閉鎖隔離環境の概覧

環境	名称	機関	場所	目的	主要ミッション	イメージ
ICC	HERA (Human Exploration Research Analog)	NASA (米国)	テキサス (米国)	月や火星での長期の閉鎖隔離とチームワークについてのデータ収集 (4名: 男性+女性)	HERA Campaign	
	Mars500 Complex	IBMP (ロシア)	モスクワ (ロシア)	火星への往復ミッションの模擬 (6名: 男性)	Mars500	
	閉鎖環境適応訓練設備	JAXA (日本)	茨城県つくば市 (日本)	長期滞在ミッションへの適応性を医学的・心理学的観点から総合的に評価 (8名: 男性+女性)	宇宙飛行士選抜試験	
	CEEF (Closed Ecology Experiment Facilities)	環境科学技術研究所 (日本)	青森県六ヶ所村 (日本)	自然生態系と物理化学装置を併用した閉鎖居住実験 (2名: 男性+動物)	閉鎖居住実験	
	月宮1号	CNSA (中国国家航天局)	北京 (中国)	中長期的な人間の月滞在を想定した閉鎖居住実験 (2名: 男性2名、女性2名)	月宮365	

ICE	NEEMO (NASA Extreme Environment Mission Operations)	NASA (米国)	フロリダ (米国)	長期宇宙飛行を想定 した多目的のミッシ ョンとして設計され た極限環境研究居住 区 (6名：男性＋女 性)	NEEMO 1～ NEEMO23	
	HI-SEAS (Hawaii Space Exploration Analog and Simulation)	—	ハワイ (米国)	長時間の孤立状態が 乗組員の結束力とタ スク完了に及ぼす社 会的・心理的影響調 査 (6名：男性＋女 性)	HI-SEAS Mission	
	MDRS (Mars Desert Research Station)	Mars Society (米国)	ユタ (米国)	長期隔離試験およ び地質学的フィール ドワーク (6名：男 性＋女性)	MDRS Mission Mars160	
	FMARS (Flashline Mars Arctic Research Station)	Mars Society (米国)	デヴォン島 (カナダ)	長期隔離試験およ び地質学的フィール ドワーク (6名：男 性＋女性)	FMARS Mission Mars160	
	Biosphere2	—	アリゾナ (米国)	超長時間生態環境 試験 (8名：男性 4名、女性4名)	First Mission Second Mission	
	McMurdo Station	NASA (米国)	南極 Ross Island	長期生態研究 (多 数名：男性＋女 性)	長期生態研究 (LTER) プロ ジェクト	

## ② 主要な閉鎖隔離環境における科学および医学調査

国内外における主要な閉鎖隔離環境の各施設で実施したミッションや実験に対して、学術論文やジャーナル等で発表され、確認可能であった科学や医学における調査分野に「○」を付けている。空欄は未確認の分野であり、その分野に対する調査の存在を否定するものではない。また対象の分野は基準とした論文（文献6）にて挙げられた分野を踏襲しており、本調査にて全ての施設で対象とならない分野も含まれている。

表2.3.1-5 主要な閉鎖隔離環境における科学および医学調査分野

環境	名称	生理系	心血管系	筋骨格系/代謝系	神経生理学	内科栄養学・内分泌学	血液学	環境マイクロ生物学 マイクロ生物学	宇宙生物学	心理学	ヒューマンファクター
ICC	HERA	○			○		○			○	○
	Mars500 Complex	○	○	○	○	○	○	○		○	○
	閉鎖環境適応訓練設備	○								○	○
	CEEF	○				○					
	月宮1号	○			○		○			○	
ICE	NEEMO	○	○	○						○	○
	HI-SEAS	○			○		○			○	○
	MDRS	○								○	○
	FMARS	○								○	○
	Biosphere2	○		○		○		○		○	○
	McMurdo Station	○			○					○	



### ③ 主要な閉鎖隔離環境における技術、試験および開発

国内外における主要な閉鎖隔離環境の各施設で実施したミッションや実験に対して、学術論文やジャーナル等で発表され、確認可能であった技術や試験、開発に関する分野に「○」を付けている。空欄は未確認の分野であり、その分野に対する技術、試験、開発の存在を否定するものではない。また対象の分野は基準とした論文（文献6）にて挙げられた分野を踏襲しており、本調査にて全ての施設で対象とならない分野も含まれている。

表2.3.1-6 主要な閉鎖隔離環境における技術、試験および開発分野

環境	名称	惑星環境	ECLSS	衛生管理	廃棄物処理	食料生産	外科・歯科	船外活動	居室空間	情報発信
ICC	HERA			○						
	Mars500 Complex									
	閉鎖環境適応訓練設備									
	CEEF		○		○	○				
	月宮1号		○		○	○				
ICE	NEEMO		○					△ (模擬EVA)		
	HI-SEAS				○			△ (模擬EVA)		△ (方針変更)
	MDRS							△ (模擬EVA)		○
	FMARS							△ (模擬EVA)		○
	Biosphere2		○		○	○				○
	McMurdo Station	○	○	○	○					

#### ④ 主要な閉鎖隔離環境の技術・研究情報

各施設で実施したミッションや実験に対して、学術論文やジャーナル等で発表され、確認可能であった技術・研究情報に数値を記載または「○」を付けている。空欄は未確認の分野であり、その分野に対する技術・研究の存在を否定するものではない。「－」は値の確認ができなかった項目である。

表2.3.1-7 主要な閉鎖隔離環境の技術・研究情報(1)

環境	名称	閉鎖空間					
		モジュール数	フロア数	サイズ (m)	床面積 (m <sup>2</sup> )	加圧空間容積 (m <sup>3</sup> )	窓数
ICC	HERA	3	2	14.3 x 8.3	59	150	0
	Mars500 Complex	5	1	3.6 x 20 3.2 x 11.9 6.3 x 6.17 3.9 x 24	－	550	0
	閉鎖環境適応訓練設備	2	1	3.8 x 11 (x2棟)	83	－	0
	CEEF	3	2		333	1000	0
	月宮1号	3	1	居住： 14 x 3 x 2.5 植物： 10 x 5.8 x 3.5 (x2棟)	160	500	0
ICE	NEEMO	1	1	Φ4 x 13.7	30	172	3
	HI-SEAS	2	2	Φ9 x 5	111	368	2
	MDRS	2	2	Φ8.2 x 7.3	100	352	6
	FMARS	1	2	Φ8.2 x 7.3	100	352	9
	Biosphere2	7	N/A	154 x 110 x 28	13000	203880	全面
	McMurdo Station (Building 30)	1	3	56 x 26	4422	－	－

表2.3.1-7 主要な閉鎖隔離環境の技術・研究情報(2)

環境	名称	環境			設備・センサー			
		室温	湿度	CO2濃度	発電容量	貯水量・水使用量	カメラの台数	センサー等
ICC	HERA	19~25°C	70% (±10%)	－	－	－	－	温度、湿度、CO2濃度
	Mars500 Complex	18~26°C	－	－	－	－	84	温度、湿度、CO2濃度
	閉鎖環境適応訓練設備	－	－	－	－	－	5	－
	CEEF	－	－	－	－	5100L	－	温度、

								湿度、 O2/CO2濃 度
	月宮1号	24.11 ±1.36°C	49.62 ±4.96%	600 ppm 以下	—	74.37kg/ 日	—	温度、 湿度、 O2/CO2濃 度
ICE	NEEMO	—	—	—	—	—	—	温度、 湿度、 O2/CO2濃 度
	HI-SEAS	—	—	600～ 1500 ppm	10kW	3785L	8	温度、 湿度、 CO2濃度
	MDRS	—	—	—	—	2000L	0 (過去に 設置)	温度、 湿度
	FMARS	—	—	—	—	70L/日	—	温度、 湿度
	Biosphere2	15°C～ 35°C	—	500～600 ppm	—	7560L + 水 域環境	—	1900箇所 のセン サー
	McMurdo Station (Building 30)	—	—	—	—	—	—	—

表2.3.1-8 主要な閉鎖隔離環境の技術・研究情報(3)

環境	名称	ミッション・チーム構成・パフォーマンス					
		期間(最長)	クルーの数 (最大)	パフォーマンス 検証	グループ ダイナミクス 検証	対人 トラブル	意図的な 事故への 対応を検証
ICC	HERA	45日	4	○	○		
	Mars500 Complex	520日	6	○	○	△ (一部)	
	閉鎖環境適応訓練 設備	14日	8	○	○		
	CEEF	120日	2				
	月宮1号	365日	4				○
ICE	NEEMO	10日	6				
	HI-SEAS	8ヶ月	6	○	○	△ (一部)	○
	MDRS	14日 (80日)	6			△ (一部)	
	FMARS	40日 (80日)	6			△ (一部)	
	Biosphere2	700日	8			○	
	McMurdo Station (Building 30)		285				

表2.3.1-9 主要な閉鎖隔離環境の技術・研究情報(4)

環境	名称	食			倫理		その他	
		摂取カロリー 目安	食物栽培	食に関連 する実験	インフォームド コンセント	アウト リーチ	衛生	コスト
ICC	HERA				○			—
	Mars500 Complex	3,000-3,200 kcal/日			○		シャワー 10日に1 度	—
	閉鎖環境適応訓練 設備				○			—
	CEEF	2,250kcal/日	○	○	○			100億円
	月宮1号	男性： 2,200～ 2,600kcal/日 女性： 1,400～ 1,800kcal/日	○	○				—
ICE	NEEMO				○			—
	HI-SEAS		△ (一部)	△ (一部)	○	△ (一部)	シャワー 1週間に8 分/人	300K + α USD
	MDRS		△ (一部)	△ (一部)	△ (実験者に 依存)	○	チーム方 針による	573K USD
	FMARS				△ (実験者に 依存)	○		680K USD
	Biosphere2	2000~2200 kcal/日	○	○	○	○		150M USD
	McMurdo Station (Building 30)							—

【結果概要・考察】

・既存の閉鎖隔離環境において、個人またはチームのストレスやパフォーマンスに関しては、様々な計測手法や分析方法が開発・試行されており、閉鎖空間におけるQOL分析手法を確立するにあたり、より考え方の近い手法を参考に独自の計測・分析手法の構築が可能と考えられる。一方、事例数を極端に増やすことができない実験分野でありながら、類似の分析に関して異なる手法が用いられる等、データの蓄積方法に大きな問題点があるため、今後国際的に共通した実験の枠組みや手法の構築を進める動きなど、将来的な動向も注視しつつ進めていく必要があると考えられる。

・倫理面に関しては、プライバシーに関する事項など収集可能な情報自体もそれほど多くないが、実験データの収集とは相反する課題であり、各閉鎖隔離実験において境界線の引き方に苦労している様子が伺え、実験に際しての倫理委員会の設置など、明確なルールの確立から推進していく大方針が検討されるべきと考えられる。

・様々な閉鎖環境の経験値から、食の大切さ、とりわけ食に対する個々人の関わり方が非常に重要であることが強調されており、また、味・見た目・食感・栄養・栽培・食卓（を囲む人）など多様な視点で、非常に敏感に反応していることが理解された。閉鎖隔離環境における食とQOLを追求するに当たり、通常の生活と比較して、食卓に対する感度を極めて高めた対応が必要であることを認識した。

### 2.3.2 閉鎖隔離環境施設、及び極地滞在オペレーション等に関する現地調査

・2021年10月2日～15日にかけて、米国ハワイ州ハワイ島にある閉鎖居住実験施設「HI-SEAS」および関連施設の視察を行った。

・併せて、HI-SEASにおける閉鎖居住実験の総責任者であるハワイ大学教授より、HI-SEAS設立の背景や具体的な運用方法、実験の内容や成果等、多岐に渡る情報のレクチャーを頂いた。また実際の運用管理担当者やデータ分析担当者、施設設備保守責任者、研究出資者、倫理審査委員など関係者へのヒアリングを実施し、情報収集を行った。

#### (1) 現地調査概要

##### ① 調査過程

###### a) 経緯

2021年6月にHI-SEASの運営責任者であるハワイ大学教授にコンタクトを取り、本事業の説明と閉鎖居住施設の構築検討および閉鎖居住実験に関する調査を行っている旨を伝え、HI-SEAS施設と実験の視察をお願いしたところ快諾を頂き、スケジュールを10月初旬に設置し、訪問に向けた調整を行った。

###### b) 調査日程

現地調査は以下の日程で実施した。

10/2 (土)	日本出発
10/3 (日)	調査準備、通訳者出迎え、調査機材購入
10/4 (月)	ハワイ大学教授との視察スケジュール打合せ、調査機材購入
10/5 (火)	ハワイ大学教授からのHI-SEAS施設および実験内容についてのレクチャー
10/6 (水)	HI-SEAS運営母体組織のエネルギーラボ視察、HI-SEAS施設視察
10/7 (木)	HI-SEAS運営母体組織出資者とWebミーティング、Biosphere2参加者とミーティング、CSAアナログ施設見学
10/8 (金)	調査データ整理、ハワイ大学教授へ追加質問
10/9 (土)	休日
10/10 (日)	Biosphere2参加者(2名)とWebミーティング、調査データ整理
10/11 (月)	調査データ整理
10/12 (火)	研究倫理審査委員会とWebミーティング、HI-SEAS管制官とミーティング
10/13 (水)	帰国書類等の準備、PCR検査受診
10/14 (木)	ハワイ出発
10/15 (金)	日本帰国

###### c) 調査メンバー

現地調査は本調査に資する閉鎖居住実験参加経験者および閉鎖環境設備研究者の中から以下のメンバーで実施した。

調査担当	:	宇宙システム開発株式会社所属
調査担当	:	NPO法人フィールドアシスタント所属*
調査補助(通訳含む)担当	:	コロラド大学ボルダー校所属

\*渡航直前の怪我のため渡航中止。リモートにて期間中のMTG参加や調査支援を実施。

##### ② 調査手法

現地調査は以下の手法にて実施した。

###### a) 関連情報の入手

現地到着後、ハワイ大学教授よりHI-SEASに関連する情報をレクチャー形式にて講義・提供頂き、その上で視察スケジュールおよび視察内容の確認を行った。また可能な範囲でレクチャー内容の音声データを取得した。

#### **b) 関連施設の視察**

HI-SEASの運営母体組織のエネルギーラボを訪問し、その中にあるHI-SEASの運用オペレーションを行っているコントロールセンターの視察を行った。また可能な範囲で写真撮影および説明時の音声データ取得を行った。

#### **c) HI-SEAS施設の視察**

HI-SEAS施設を視察し、HI-SEAS周辺環境、施設概観・内観、具体的な施設滞在・実験内容、EVAサイトおよびEVA内容の確認を行った。また写真撮影および説明時の動画および音声データの取得を行った。

#### **d) 関係者へのヒアリング**

HI-SEAS運営、運用オペレーション、実験研究者、倫理委員会およびBiosphere2滞在者へのヒアリングを行い、背景にある情報の入手に努めた。可能な限り対面で実施し、スケジュールの都合で難しい場合は、Webミーティングにて実施した。また可能な範囲で音声データの取得を行った。

### **(2) 関連情報の入手**

#### **① HI-SEASにおける閉鎖実験**

##### **a) 目的・背景**

- ・HI-SEASの目的はクルーの挙動とパフォーマンスを見ることにあり、特に長期ミッションを成功させるためにチームやクルーを選抜し、訓練し、支援している。
- ・特に火星にフォーカスしており、クルーの身体的・精神的孤立、チームの精神衛生状態、コミュニケーション遅延の影響を調べている。
- ・HI-SEASの運営母体組織は、環境システムと再生可能エネルギーに興味があり、ソーラーや水素によるエネルギー実験を行っている。HI-SEASはそうしたシステムを実証する場でもある。

##### **b) 環境・設備**

- ・視覚的にも心理的にも外部から遮断されている。外から近づいた人は壁のような地形によって見えず、HI-SEASからは荒涼とした火星のような景色しかほぼ見えない。
- ・かなりクオリティの高い機材（バッテリーやエネルギー供給システム）が導入されている。
- ・火星のような地形などにこだわらなければICCでも良いかもしれない。
- ・キッチンは恐らく本当のミッションで使用されるものよりも大きなスペースを取っている。
- ・トイレはコンポストトイレを使用している。問題は色々あったが解決したことでほぼ何もメンテナンスせず使用できている。
- ・クルー毎に小さくても個別の部屋があることは重要である。視覚的なプライバシーと同じくらい聴覚のプライバシーも重要だが十分な聴覚プライバシーは備えていない。
- ・クルーに必要な容積基準よりも大きなスペースとなっている。火星には重力があるためそこまで容積を気にする必要はなく、また使えないスペースも沢山ある。
- ・ドーム型になった理由は資金提供をしてくれたHI-SEAS運営母体組織の意向による。元々はコンテナを組み合わせて建てる予定であった。ファスナーでドームカバーを開けると大きな窓にできる作りになっているが、これも運営母体組織の意向によるもの。インフレータブルを考慮すると十分に現実的な形であると考えている。
- ・周辺地域はハワイ先住民たちが近代的な建物を建てることに対して非常にセンシティブになっているため、ミッション主催側としてはドームカバーの色も赤茶色のものを希望していたが、やはり運営母体組織の意向により白になったとのこと。
- ・EVAスーツは現実的な作業と信頼性の観点からあまり忠実な再現を狙っていない。

### c) 実験・ミッション

- ・過去のミッションでは通信遅延の問題については意識してミッションを行っていたが、現在はNASAも月に興味が移っているため通信遅延は取り入れられていない。通信遅延はメールサーバに20分間経ってから送信する設定をすることで行っている。
- ・20分の遅延は完全に運用形態を変える必要があるほど大きな問題であり、クルーの自律性も同様である。
- ・物資補給は当初はドームの裏から運んで置いておく形やローバーアクティビティといった擬似シナリオで実施していたが、リアリティを考慮しEVAで外部にあるコンテナまで取りに行く形に変更した。
- ・シャワーはミッションによって異なるが凡そ1人当たり1週間で10分使用できる。しかしクルーは宇宙飛行士のように非常に競争意識が高く、そうした目標を与えるとそれを超えようとする。
- ・HI-SEASでのパフォーマンス測定のための最大のデータ収集方法は地質学に関するフィールドワークで、溶岩洞の容積の推定と地図作成、その地域の岩の密度の推定、等をさせている。大概EVAでこのワークは実施され、1サイクルで通常2週間を要する。
- ・EVAでは必ず少なくとも2名で実施させ、待機メンバーも最低2名となるようにしている。
- ・EVAの対象として溶岩洞を選択した理由としては、火星でも実際に探査すると考えられるからである。内部環境が保護され、気温の変化や放射線の影響も少なく、安定した水氷があるため、生命の痕跡を残している可能性がある。また天然の放射線防御ができる利点と複雑な地形である欠点などの考慮すべき点はあるが、住居としての活用も考えられる。
- ・HI-SEASのミッションは、ミッション1がフードスタディ、ミッション2~4はクルーダイナミクス、ミッション5~6はクルーコンポジションであり、基本的にクルーコンポジションが主の調査目的である。

### d) チーム構成・パフォーマンス

- ・クルーセレクションの方法に関してNASAからは情報提供を受けていないため、自分たちで構築した方法である。
- ・クルーセレクションでは同系統の人を2名は入れるようにしている。男性・女性や軍人・市民など。また理想的な宇宙飛行士に近い人を選ぶのではなく、様々な能力をもった人が組み合わせられるようにしている。
- ・訓練に関して、3つのミッションで本土のNASAの訓練に参加させてもらった。これはセレクションの一環でもあり、各自が他のクルーを評価するようにした。他には地質調査の方法を訓練している。
- ・コマンダーと他のメンバーでリーダーシップの考え方を共有しておく必要がある。指示をしていくタイプと協議しながら進めていくタイプで、双方の考え方が異なると上手くいかない。
- ・ミッション2~4においては、可能な限り同じクルー選抜基準を用いるなどして、データの比較が容易になるように考慮した。この場合3種類のデータではなく、クルー毎、日にち毎のデータを取得することができる。但し、クルーの構成を統一することは難しい。
- ・クルーは宇宙飛行士のように、高い教育を受けており、期待されている回答をするため、真のパーソナリティを事前に掴むことは難しい。

### e) 分析・考察

- ・HI-SEASではNASAが求めるデータの他に、電力・水使用量・CO2・温度等のデータも集めている。インテリジェントハウジングに関わっているメンバーもセンサーシステムの構築に携わっている。
- ・EVAのフィールドワークで提出されたレポートは採点され、パフォーマンス測定する基準となる。効率性やEVA回数、等他の指標も含めて、結果重視の評価を行う。
- ・人間のパフォーマンス低下を顕著に見るためには4か月程度の閉鎖実験が必要で、その解決策を探るには4か月以上の実験期間が必要となる。

- ・長期ミッションにおいては、多様性より類似性を選択した方がパフォーマンスとして良い結果が出る。
- ・様々な方法でクルーの状態を測る取り組みをしている。声のトーンや大きさから判定する方法や、ゲーム、スマートウォッチによるバイタルデータ取得、生体サンプル、などである。
- ・アンケートも様々なものを行っているが、単純に同じ回答を選択するクルーがいる場合など、結果の正確性を保つことは難しい。

#### f) 運用・倫理

- ・閉鎖実験では現実的に可能な事と有益なデータは複雑なトレードオフである。トイレの中でデータを取るようなことはあり得ない。
- ・メディアへの露出とクルーのプライバシーに関してもトレードオフである。HI-SEASではメディア露出はクルー個々人の判断に任せている。12ヶ月ミッションの際に、1人のクルーが12ヶ月間の様子をメディアに提供しポッドキャストになっているが、ミッションの主催側としては、ここまで公開させたのはミスだったと考えている。

### (3) 関連施設の視察

#### ① エネルギーラボ

##### a) 目的

- ・エネルギーラボは、HI-SEAS施設の建設に資金提供を行ったHI-SEAS運営母体組織が行っている環境システムと再生可能エネルギーの実験場的なラボである。HI-SEASでは本施設と同一の設備管理システムを使用しており、HI-SEASに導入またはアップグレードを行う前に十分な検証がなされていることで、HI-SEASの安定した運用に寄与している。

##### b) 設備

- ・バッテリーシステム（図2.3.2-1）は8年ほど前から導入しているソニー製で、HI-SEASに導入しているシステムと同一である。ソニーからこのシステムを導入している規模としては最大級の顧客である。



図2.3.2-1 ソニー製バッテリーシステム

- ・水素エネルギー利用の1つの形態として、トヨタのFCVミライ（図2.3.2-2）をハワイ島で最初の1台として導入しており、電気自動車も含めて環境に配慮したエネルギーシステムを構築している。



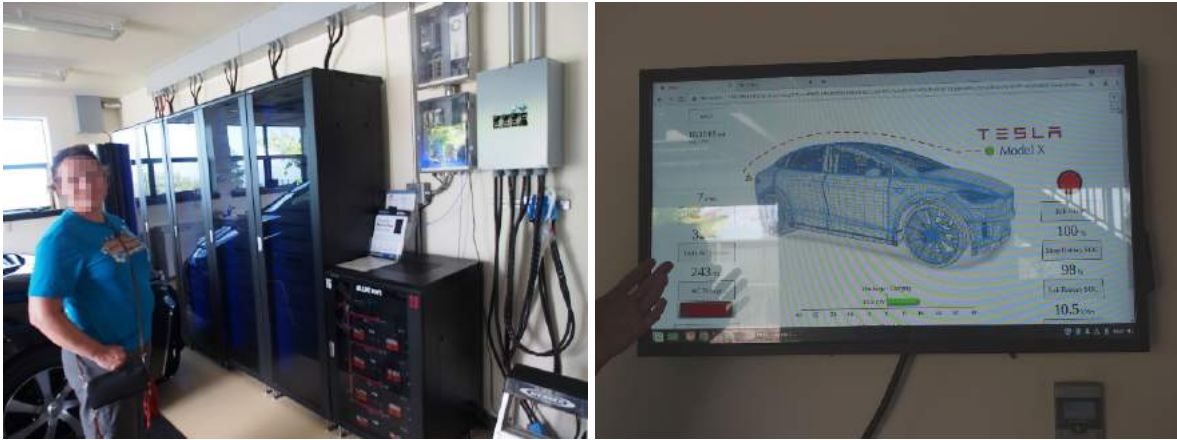


図2.3.2-2 FCVミライおよび電気自動車によるエネルギーシステム

**c) 運用**

・エネルギーラボのある広大な農場は外部の電力と一切接続がなく、エネルギーは全て自分たちで発電している。ソーラー発電システム（図2.3.2-3）は天気に左右されるため、その分も考慮した発電容量（1MWh）となっているのは、HI-SEASと同じである。



図2.3.2-3 ソーラー発電システム

・毎日の発電の中で余った分を水の電気分解により酸素と水素として取り出している（図2.3.2-4）。水素は低圧（250psi）と高圧（6,000psi）のタンクにそれぞれ貯蔵され、低圧の方はバックアップの発電機のようにシステムのバックアップに使っているため、完全に化石燃料とは切り離されている。



図2.3.2-4 水素生成・貯蔵システム

・産み出したエネルギーはバックアップエネルギーの他に車、料理、地下水の汲み上げに使っている。

## ② ミッションコントロール

### a) 目的

・エネルギーラボの2階に新しくミッションコントロール室（図2.3.2-5）を設置した。ミッションサポートは世界中からリモートで行われているため、必ずしもこの部屋に人がいる必要はないが、ミッション中は誰かがここに居ることが多い。



図2.3.2-5 ミッションコントロール室

・リモートでミッションコントロールが可能のため、こうした設備が必ずしも必要ではないが、HI-SEAS運営母体組織が管理している施設であるため、明確なコントロール室を設けることにした。また農場の中にアパートがあり、そこから管制官が通うのにも適している。

### b) 設備

・HI-SEAS施設にはベッドルームとトイレ以外はモニタが設置されており、ミッションコントロールからそれら映像（図2.3.2-6）を常に見ることができる。

・エネルギーラボおよびHI-SEASからは無線で近隣のポイントを介してインターネットに接続している。



図2.3.2-6 HI-SEAS管理システム

### c) 運用

- ・以前のミッションでは火星を模擬した20分遅延のコミュニケーションを行っていたが、現在行われている月模擬に関しては3秒程度の遅延で実施している。
- ・ソニーバッテリーシステムは0%から100%までチャージするのに90分で済むが、ここでは十分な電流が流せないことと、バッテリー自体の寿命を延ばすために2時間～2時間半でチャージされるようにしている。電力量としては40kWhの能力がある。
- ・モニタリングしているカメラは固定式で角度をリモートで変えることはできない。
- ・研究倫理審査委員会の指示により、特別な目的が無い限りは撮影した映像を録画することはできない。
- ・システムは基本的には自動で室内をコントロールしている。気温は夜になると少し下げられるようにして朝に温まるようにヒーターを調節する。
- ・このシステムは新しいセンサーを取り付ける度にシステムを書き換える等アップデートを続けてきたが、8年間の運用で外販できるまでのシステムになっている。全てのコントロールパネルをブラウザ上で利用でき、画面レイアウトなども自由に変更できる。

## (4) HI-SEAS施設の視察

### ① HI-SEAS

#### a) 環境・施設

- ・施設周辺からは周辺で人間が活動している様子は殆ど見えない。道路があることと、マウナケア山への旅行者が多い時に山頂から降りてくる車のヘッドライトは分かるがそれくらいである。
- ・火山地帯は火星と環境が似ており、閉鎖模擬実験を行うICEの環境（図2.3.2-7）として非常に適していると考えている。

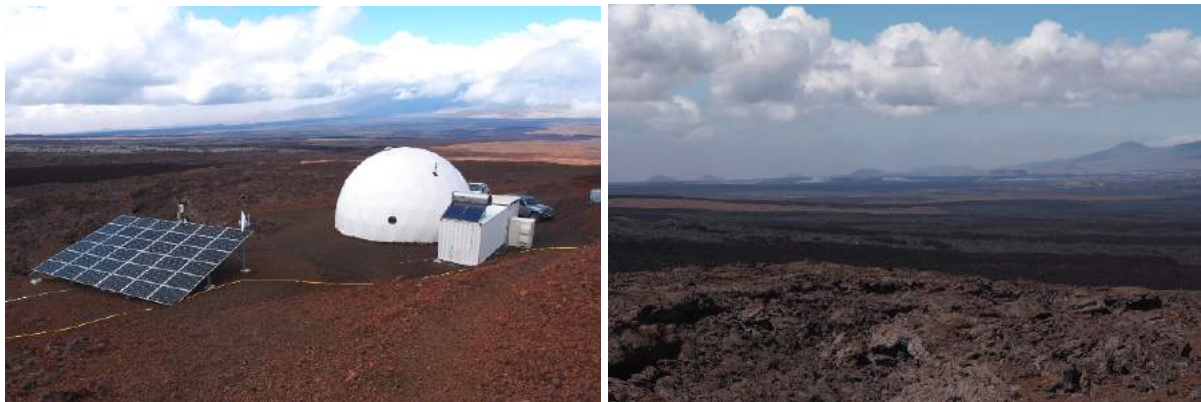


図2.3.2-7 HI-SEAS全景・周辺環境

- ・この周辺は天候条件にも恵まれており、また裏の峰によって過去にあったハリケーンでも大きな被害を受けることはなく済んだ。
- ・ハリケーン時のクルーの緊急時対策としては、より強固に設置されている物資補給用コンテナに避難することとなっている。
- ・カバーに一度も開けたことがないがファスナーの開口部を設けており、半分が窓となりうる設計となっている。

#### b) 設備・空間

##### 【建築設備】

- ・排水（シンク、シャワー、尿）を廃棄する設備（図2.3.2-8）が施設のすぐ脇に設置されている。基本的にはフィルターを通してある程度浄化された水が溜まるようになっており、後は自然に蒸発させる仕組みとなっている。尿フィルターはミッションの無い時期などに時々取り換える必要がある。

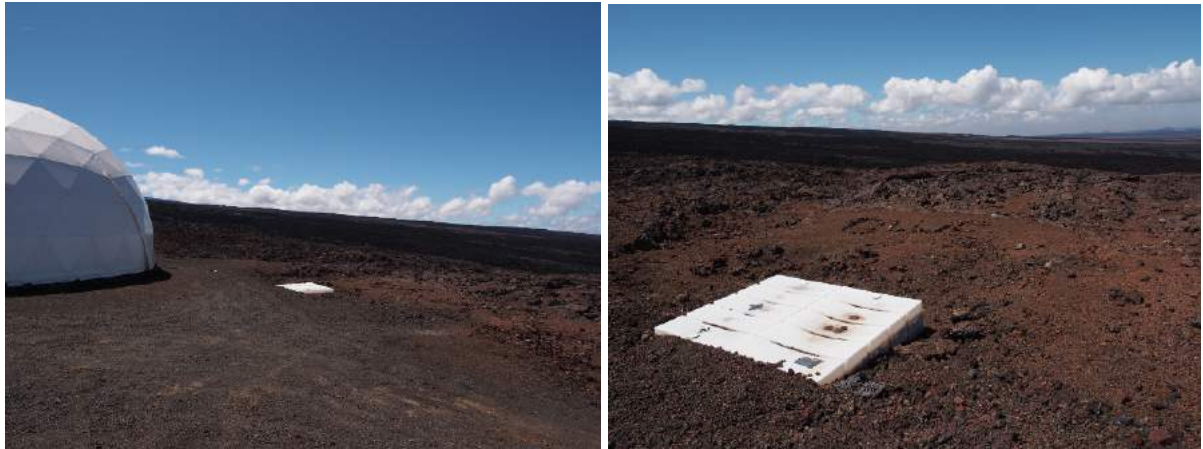


図2.3.2-8 排水廃棄設備

- ・電力は、初期のミッションではソーラー発電をディーゼルで補う形で発電していたが、その後ソーラーパネルを追加しソーラーのみで運用している。日中雲の中であっても充電できており、バックアップ発電機は2～3日程度かなりの曇りが続いてソーラー発電が出来ない場合に必要になる。
- ・周辺の土壌には粘土質の物質が含まれておらず、パネルに付着しないため、ソーラーパネルは7年間運用しているが一度も掃除をしていない。
- ・通信とエネルギーシステムは冗長性があり、エネルギー源も複数ある。水素だけでも5～6日分を賄うことができ、また水素の貯蔵量を増やすことも可能である。
- ・室内の暖房はプロパンを利用した温水暖房システムを導入し、各所にダクトを張り巡らせている。当初電気ヒーターを利用したが、電気負荷が大きすぎることで、全体を適温にすることが難しかったため切り替えた。
- ・エネルギーラボと同じソニー製のバッテリーシステムが設置されており、現在は35kWh程度の電力を供給しており、導入から7年経っても90%程度の容量を保っている。
- ・日本の企業が作っているある除湿器は200L/日の水を生成することができるようで、その機械を導入し、飲料水を生成しようとしている。この場所は標高が高く雲の中にあるため、非常に湿度が高く、こうした手法が利用可能であると考えている。

#### 【内部空間】

- ・この施設は3Dモデリングソフトを活用して設計し、90日で設計と建築を完了した。最初の組み立ては海辺で実施し、一度解体した後に、この山まで運んで再度組み立てることで完成した。内部（図2.3.2-9～10）は他の模擬施設と比較して非常に広い空間となっている。

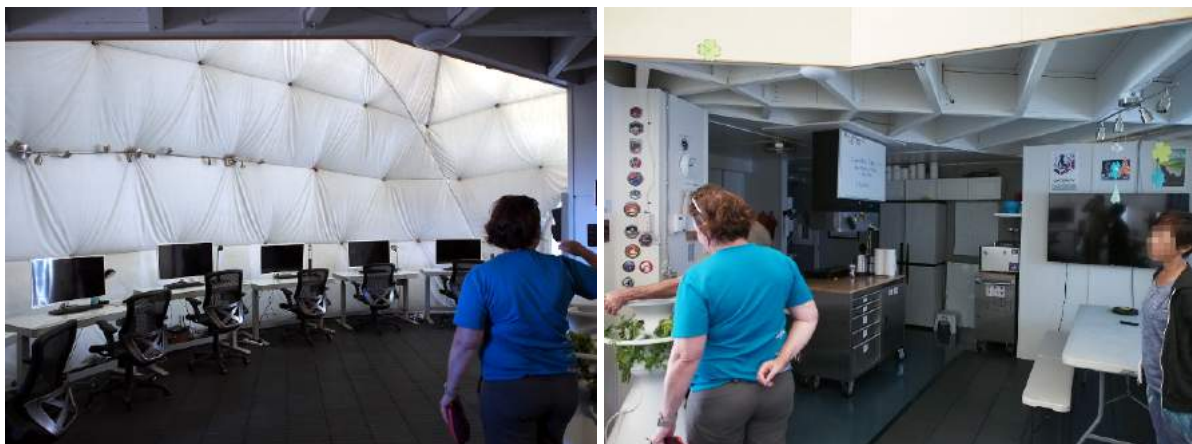


図2.3.2-9 HI-SEAS内観1

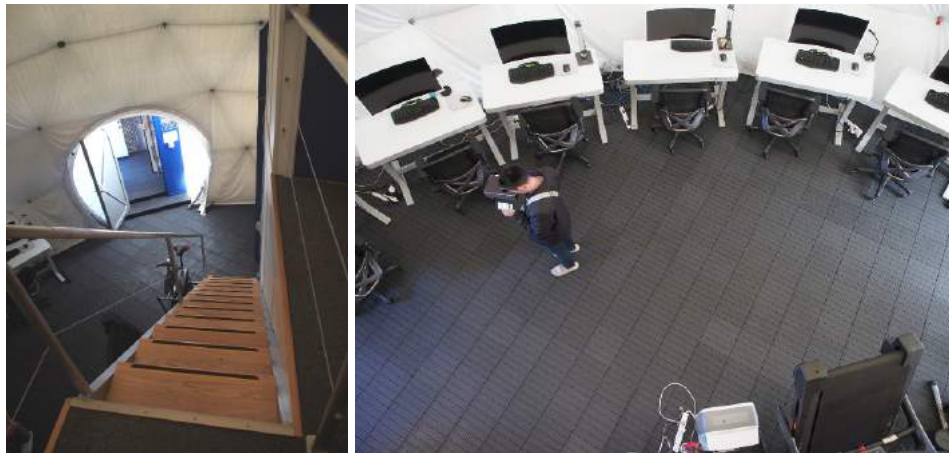


図2.3.2-10 HI-SEAS内観2

・1階と2階に1つずつトイレを用意しており、コンポストトイレ（図2.3.2-11）を設置し、おがくずを入れて微生物による廃棄物の分解を促している。



図2.3.2-11 2階階段、コンポストトイレ

・キッチン（図2.3.2-12）は大きくゆとりがあるが、カウンターなどは車輪がついているため、レイアウト変更などで大きなスペースを確保、再構成することも可能である。



図2.3.2-12 キッチンスペース

- ・現在は、最近ミッションで使用されている植物栽培装置が設置されており、継続的に食料として提供している。いずれグリーンハウスモジュールを増築したい。
- ・洗濯機が具備されており、体積も小さいため使用しても良いこととしている。
- ・2階には6名分の個室（ベッドルーム）（図2.3.2-13）が用意されており、最近ベッドの上にマットレスも敷かれている。クルーはスーツケース1つ分の私物を持ち込むことが許可されているが、アルコールは禁止である。



図2.3.2-13 クルー個室

- ・施設内には2つの小さな窓を設けており、ここからのみ外部の景色を見ることができ、人工物のようなものは見ることができないように考えている。周りに植物が見られないのは大きな特徴で、視覚的に植性のない環境を模擬できるという利点になる。
- ・管制室からの観察用カメラは幾つかの箇所に設置している。
- ・入口のエアロックの隣に倉庫（図2.3.2-14）があり、ここに食糧庫とバッテリーシステム、EVA用の機材が置いてある。

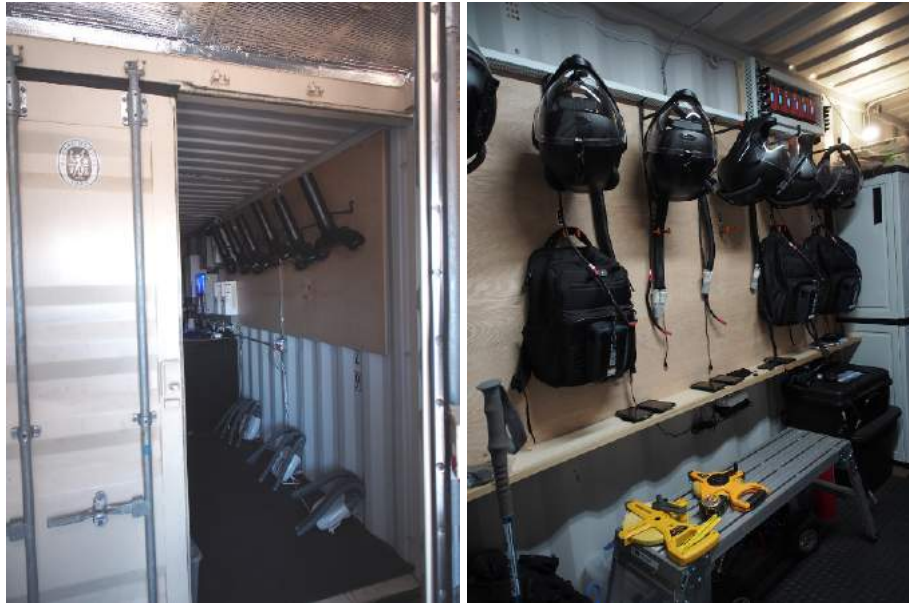


図2.3.2-14 バッテリーシステム・EVA機器室

#### 【EVA機材】

- ・EVA用のスーツは現在のものは、見た目は良いが着脱が簡単すぎるため、着脱をきちんとシミュレーションできるスーツの方が良いと考えている。
- ・EVAスーツにはペルチェ式冷却システムと呼ばれる熱制御機構がバックパックに具備されている。空気孔はヘルメットのバイザー部分まで伸びており、これでヘルメットが曇るのを防ぐと同時に新鮮な空気を送り込む。クルーが常備するスマホにはアプリが入っており、空調の体積流量をクルーが自由に調整できるようになっている。
- ・バックパックのバッテリーは3時間程度使用可能なため、長くても2時間程度であるEVAにおいて、空調・コミュニケーションを支える容量としては十分である。
- ・冷却システムはヘルメット内の温度制御が可能であるが、冷却下着のようなスーツ内部の熱制御の機能は具備していない。但し、スーツ自体はヘリコプターのパイロットスーツであるため、常に身体を暖かく快適に保つようにできており、熱を逃すための通気性パネルも入っている。
- ・スーツはクルーの身体にフィットすればとても心地良いが、特に女性のクルーで、身体が小さいがためにスーツが大きすぎるのがよくある。従って何種類かのサイズを用意しているが、カスタムスーツを作らない限り、全てのクルーのサイズに合うスーツを用意することは難しい。
- ・クルーが溶岩洞に入るときによくお尻を痛めるため、スーツを作ってるカナダの会社とお尻用のパッドをスーツに埋め込む検討をしていた。他にも膝パッドの検討もしたが、EVAの際、クルーは膝パッドと手袋をつける対応とした。
- ・HI-SEASとの間の通信が途絶してしまうため、カメラとアンテナがついているラジオ機器をEVAで持って行き、溶岩洞の洞窟に設置することとした。以前の実験では通信途絶を一つのリスクとして捉えてミッションを行っていた。
- ・EVAスーツのヘルメット（図2.3.2-15）の顎部分にカメラが付いており、管制側はクルーが見ているものを同様にすることができる。またヘッドアップディスプレイが備わっており、バッテリー残量やナビゲーション用の地図を映し出すことができる。SpyGlassというソフトウェアを使用していて、それを用いることで、カメラ映像の上に地図情報を重ねることができ、EVAからの帰路など視覚的に難しい状況でも、GPSを利用してGoogle Mapのように帰路を自動的に映し出すことができる。



図2.3.2-15 EVAスーツ・ヘルメット

### c) 実験・ミッション

- ・電力を敢えて供給しないことで悪天候を模擬するようなシナリオを当初検討していたが、様々な理由で似たような状況が定期的が発生するため、その必要は無かった。
- ・わざと不具合をおこすことができるシステムも存在しており、敢えてクルーにストレスを与える実験で利用する。
- ・施設の安全機能として非常電話を設置しており、管制室か911に連絡することができる。
- ・シミュレーション手順と非常時の手順が両方とも手順書として具備されている。
- ・緊急用の救急用品を用意しているが、クルーは健康な状態でミッションを始めるため、病気になることはあまり無く、どちらかというとなEVAによる怪我が多い。
- ・EVAで探査を行う溶岩洞は深さが分かっていないようなものもあり、最低でも200ft (60m) くらいはある。

### d) チーム構成・パフォーマンス

- ・これまでのクルーで唯一ドロップアウトしたクルーは60歳の男性で標高が身体に合わなかったためである。
- ・また唯一実験中止になったのは電気ショックが原因であったが、120VACであり実際は大きな問題はなかったはずだが、1人のクルーがパニックに陥り911に電話をしてしまったため、止む無く中止した。

### e) 運用・倫理

- ・食料や物資の補給は、当初施設後ろのクルーからは直接見えないエリアに届けていたが、車両の音などが聞こえることで火星居住のシミュレーション感覚が薄れてしまうため、現在は少し離れた場所にある倉庫に届け、EVAで取得する形となっている。
- ・水タンクは1000ガロン (3785L) あり、一般的にクルーは1~2か月でタンクの水を消費する。ミッションでは水 (飲料水、シャワー) の補給は4~6週間程度で行うスケジュールとしていた。
- ・実験室の中に地学調査の分析サンプルを保管している他、クルーの唾液サンプルなども採取、冷凍保管し、ミッション終了後に回収している。

### f) その他

- ・HI-SEASの管理システムや設備は、MDRSと比較しても非常に洗練されており、高価な機材なども惜しみなく投入されているが、NASAでもここまで豊富な予算はつかないと思われるため、日本での施設建設においてHI-SEASを参考にすることは難しいと思われる。



**【結果概要・考察】**

・HI-SEASは、閉鎖隔離実験を行うICE環境として非常に高度なレベルで条件を構築していることを認識することができた。またNASAや地元企業との関わりや資金の潤沢さなど、想像以上に大きく同プロジェクトに影響していることが伺えた。今後日本独自の新しい閉鎖生態系模擬環境を構築する上で、施設運営の形態、実験オペレーションの運用・管理体制、実験手法・分析方法いずれも非常に参考になる情報が示された。将来的には日本とHI-SEASが協力するなど、国際間連携体制を築くこともオプションの一つとなりうる。