

# 2I06 月面拠点のための生命維持システム技術 インテグレーションの検討

宮嶋宏行 (東京女学館大)

A Study of Life Support System Technology Integration for Lunar Outpost  
Hiroyuki Miyajima (Tokyo Jogakkan College)

Key Words: Breakeven Point, Equivalent System Mass (ESM), Component Technology

## Abstract

I developed a life support sizing analysis tool to support Regenerative Life Support System (RLSS) design and studies. It consists of a mass balance and system sizing models, and can assist the engineer in performing RLSS preliminary design and trade studies, combining different life support configurations and technologies. In this paper, I conducted trade studies based on International Space Station (ISS) operation data and lessons learned comparing different life support systems for lunar outpost to consider impacts to cost, which is described as an Equivalent System Mass (ESM) using this tool.

## 1. はじめに

近年、世界各国で国際宇宙ステーション(ISS : International Space Station)に続く有人宇宙活動として月探査計画が注目を集めている。特に、2004年の米国による新宇宙探査ビジョンの発表以降、有人月探査に関するシステムスタディが盛んに行われ、その成果はESAS (Exploration Systems Architecture Study)<sup>1)</sup>として2005年に発表されている。生命維持システムの分野では米国の有人宇宙船(CEV : Crew Exploration Vehicle)の開発に続き、月面着陸機、月面拠点の生命維持システムの検討が始まっている。一方、日本でも宇宙航空研究開発機構(JAXA)長期ビジョン発表以降、有人月探査構想<sup>2)</sup>やHTV(HII Transfer Vehicle)の有人宇宙船化<sup>3)</sup>などが検討されている。

さて、生命維持システムのシステムスタディに目を向けた場合、数ヶ月程度の月探査では再生型生命維持システムがコスト面では不要であると考えられてきた。実際、ISSへの常時滞在は2000年に始まっているが、長い間、気体や水を再生する機能を持たず、2009年に水の再生が始まったばかりである。最近のトレードスタディの研究では、再生型が供給型の質量コストを下回る損益分岐点が意外に早い時期になるという事例も見られる。シャワー用水、食器洗浄水、洗濯用水の使用を想定した場合(36.11kg/Crewmember-day(CM-d))には、損益分岐点は水再生9日目、CO<sub>2</sub>の還元223日目になるとの報告がある<sup>4)</sup>。また、同じ報告ではシャワー用水、食器洗浄水を最小限しか使用しない場合(6.41kg/CM-d)には、損益分岐点は水再生93日目、CO<sub>2</sub>還元223日目となってい

る。つまり期間や乗組員の生活方法によっては月面拠点でも再生型生命維持システムの導入が質量コスト面で有利になる。再生型生命維持システムの設計のためには様々な条件でのコンフィギュレーションや要素技術をコスト面からシステム全体として検討する必要がある。そのために再生型生命維持規模解析ツールを開発し、昨年の本講演会で報告した<sup>5)</sup>。

本報告では、ISSの運用に関して公開されているデータや教訓をもとに将来想定される月面拠点の生命維持システムについて再生型生命維持規模解析ツールを用いて検討した。

## 2. 生命維持システムの検討

### 2-1 居住に関するパラメータ

本検討で対象となる居住に関するパラメータを表1に示す。再生型生命維持規模解析ツールはこれらのパラメータの様々な組み合わせについて検討可能である。

表1 居住に関するパラメータ

分類	パラメータ
ミッション	人数、期間
設備	モジュール数、リーク率、与圧容積
居住環境	全圧、酸素分圧、二酸化炭素分圧、水蒸気分圧
人間入力	酸素消費量、供給食糧量、飲用水量、衛生用水量、シャワー用水量、トイレ用水量、洗濯用水

	量、調理用水量
人間出力	二酸化炭素排出量、尿固形物量、尿水分量、便固形物量、便水分量
生活用品	洗濯しない場合の衣類質量、洗濯しない場合の衣類体積、洗濯する場合の衣類質量、洗濯する場合の衣類体積
食品	食品質量、食品パッケージ質量、食品コンテナ質量、ゴミ質量
EVA	EVA 回数、EVA 時間、エアロック体積、エアロック放出気体体積、エアロック使用回数、酸素消費量、水再生率、冷却水損失量、吸着剤量、EVA による食糧・食品パッケージ・水の追

	加量
物質再生	水再生率、物資貯蔵日数、消費カロリー、食糧生産量、栽培面積、収穫率

## 2-2 コンフィギュレーション

物質再生の点から生命維持システムのコンフィギュレーションを3つに分けて表2に整理する。Shuttle型はスペースシャトル、ISS型は国際宇宙ステーションに近いタイプ、閉鎖型はすべての物質を再生するタイプである。

## 2-3 要素技術

表2に示した機能を実現する要素技術を物質循環に関係する部分のみ表3に示す。ただし、閉鎖型の技術の組み合わせは候補の一例でしかない。

表2 物質の再生に関するコンフィギュレーション

機能	供給・処理物質	Shuttle 型	ISS 型	閉鎖型
空気処理系	CO <sub>2</sub> 処理	除去	除去・再生	除去・再生
	O <sub>2</sub> 供給	供給	再生・生産	再生・生産
	N <sub>2</sub> 供給	供給	供給	供給
水処理系	水供給	燃料電池	燃料電池・再生	再生
	排水処理	廃棄	再生	再生
廃棄物処理系	尿処理	貯蔵	再生	再生
	便処理	貯蔵	貯蔵	再生
食料系	食料供給	供給	供給	生産
居住系	衣類供給	供給	供給	再生 (洗濯)

表3 機能ごとの要素技術

機能	サブ機能	Shuttle 型	ISS 型	閉鎖型
空気処理系	CO <sub>2</sub> 除去	LiOH	4BMS	4BMS
	CO <sub>2</sub> 還元	—	サバチエ	作物栽培
	微量有害物除去	活性炭、フィルタ	活性炭、フィルタ、酸化剤	活性炭、フィルタ、酸化剤
	空気貯蔵	N <sub>2</sub> /低温 O <sub>2</sub> タンク	N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> タンク	N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> タンク
	空気供給	N <sub>2</sub> /低温 O <sub>2</sub> タンク	CO <sub>2</sub> 還元、水電気分解	作物栽培
	温湿度制御	CHX	CHX、排水へ凝縮	CHX、排水へ凝縮
水処理	飲料水貯蔵	タンク	タンク	タンク
	水供給	タンク	タンク、水再生	作物栽培
	水精製	ヨウ素、MCV	ヨウ素	ヨウ素
	排水処理	放出	多重ろ過	多重ろ過
	排水貯蔵	タンク	タンク	タンク
廃棄物処理系	尿処理	排水タンクへ	VCD	湿式酸化
	便処理	便バッグ	便バッグ、乾燥圧縮	湿式酸化
食料系	食料生産	—	—	作物栽培
	食料供給	積載型食品	積載型食品	冷蔵/冷凍
居住系	洗濯	—	—	洗濯

4BMS: 4ベッドモレキュラシーブ, CHX: 凝縮熱交換, LiOH: 水酸化リチウム, MCV: 微生物チェックバルブ, VCD: 蒸気圧縮蒸留

### 3. 再生型生命維持規模解析ツール

システムの比較には等価システム質量(ESM : Equivalent System Mass)<sup>6)</sup>を用いる。ESMは生命維持システムのコストを式(1)のように質量、体積、電力、熱負荷、労働時間で表し、サブシステム  $i=1$  から  $n$  まで合計して ESM を計算する。

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

- $M_{li}$ : サブシステム  $i$  の初期質量[kg]
- $SF_{li}$ : サブシステム  $i$  の初期質量貯蔵係数[kg/kg]
- $V_{li}$ : サブシステム  $i$  の初期体積[m<sup>3</sup>]
- $V_{eqi}$ : サブシステム  $i$  の与圧体積質量等価係数[kg/m<sup>3</sup>]
- $P_i$ : サブシステム  $i$  の必要電力[kW<sub>e</sub>]
- $P_{eqi}$ : サブシステム  $i$  の電力質量等価係数[kg/kW<sub>e</sub>]
- $C_i$ : サブシステム  $i$  の冷却要求[kW<sub>th</sub>]
- $C_{eqi}$ : サブシステム  $i$  の冷却質量等価係数[kg/kW<sub>th</sub>]
- $CT_i$ : サブシステム  $i$  の労働時間要求[CM-h/y]
- $D$ : ミッション期間[y]
- $CT_{eqi}$ : サブシステム  $i$  の労働時間質量等価係数[kg/CM-h]
- $M_{TDi}$ : サブシステム  $i$  の時間依存質量[kg/y]
- $SF_{TDi}$ : サブシステム  $i$  の時間依存質量貯蔵係数[kg/kg]
- $V_{TDi}$ : サブシステム  $i$  の時間依存体積[m<sup>3</sup>]

それぞれのサブシステムの質量、体積、電力、熱負荷、労働時間を ISS の仕様データ<sup>7)</sup>を基にスケリング<sup>8)</sup>により見積もる。

生命維持システムの規模推算と ESM の計算に再生型生命維持規模解析ツールを利用する。本ツールは Excel で作成され、図 1 に示すように基準要求データシート、基準技術データシート、コンフィギュレーションシート、マスバランスシート、結果表示シートの 5 つのスプレッドシートからなる。

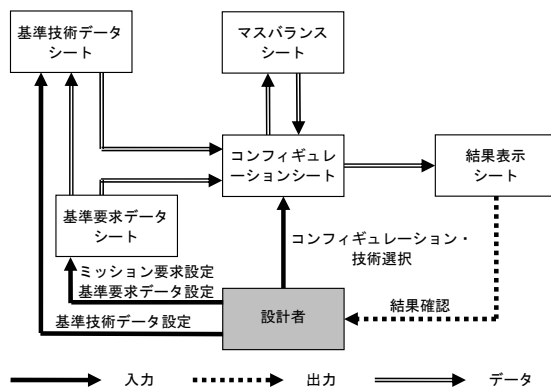


図 1 再生型生命維持規模解析ツールの構成

### 4. 計算結果

再生型生命維持規模解析ツールを利用した月面拠点の生命維持システムの検討結果を示す。人間の要求を表 4 に示すように設定し、人数を 3 人で計算した。月面拠点のサブシステムの基準技術を ISS 型に設定した生命維持システムを図 2 に示す。この構成について OPEN : ISS 型月面 1 (再生なし)、ISS(0) : ISS 型月面 1 (水再生なし)、ISS(1) : ISS 型月面 1 (再生あり)、ISS(2) : ISS 型月面 2 (再生あり) の 4 つの場合について比較した。ISS 型月面 2 はシャワー用水を利用することが特徴である。

表 4 人間の要求 単位: kg/CM-d

要求項目	ISS 設計 <sup>9)</sup>	ISS 型月面 1	ISS 型月面 2
酸素	0.84	0.84	0.84
食料 (固形)	0.62	0.62	0.62
食料 (水分)	1.15	0.50	0.50
代謝水	0.00	0.35	0.35
調理用水	0.79	0.00	0.79
飲用水	1.62	2.10	2.10
手洗い用水	4.09	0.20	0.20
シャワー用水	2.72	0.00	2.72
トイレ洗浄水	0.49	0.30	0.30
洗濯用水	12.5	0.00	0.00
食器洗浄水	5.45	0.00	0.00
合計	30.27	4.91	8.42

文献 10) をもとに ISS 型月面 1、ISS 型月面 2 を作成

図 3 に月面拠点生命維持システムの質量比較を示す。最初の 1 ヶ月は OPEN が質量コストの面で有利であるが、2 ヶ月目以降は ISS (1) が有利になっている。水の再生を行わない ISS (0) は 3 ヶ月目に OPEN を下回っている。シャワー用水を利用する ISS(2) も 2 ヶ月目に OPEN を下回り、シャワー設備を設置した場合、水再生が質量コストの面で有利になることがわかる。

図 4 に月面拠点生命維持システムの ESM 比較を示す。体積、電力、熱負荷、労働時間まで考慮した ESM コストの面では、ISS (1) が 3 ヶ月目に一番早く OPEN を下回り、シャワー設備を有する ISS(2) が 4 ヶ月目に OPEN を下回る。つまり水の使用量が少ない場合でも、多い場合でも水の再生は月面拠点における優先事項と考えられる。

さらに、図 5 に 3 人が 180 日間月面拠点で活動した場合の ESM 配分を示す。括弧内の数字は物質の再生率である。ISS(2) の ESM が ISS(1) の 1.06 倍であることを考えると、シャワー設備の設置が十分検討に値するコスト範囲にあることが分かる。

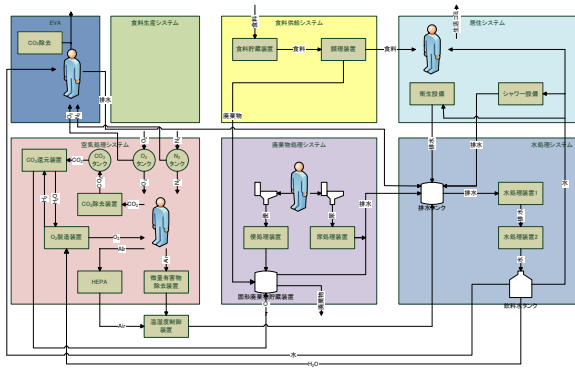


図2 ISS型月面拠点生命維持システム構成図

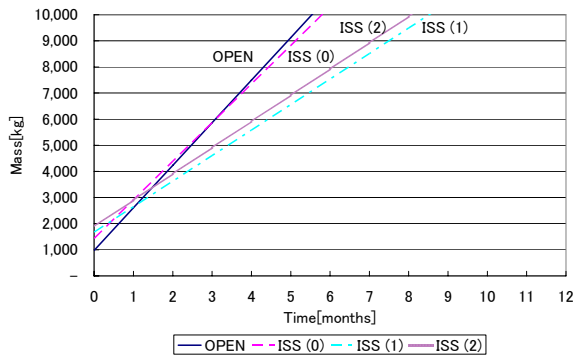


図3 月面拠点生命維持システムの質量比較

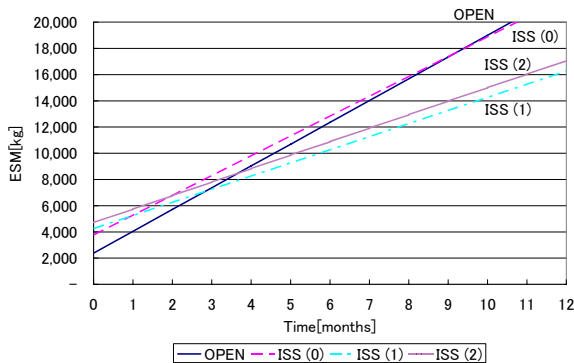


図4 月面拠点生命維持システムのESM比較

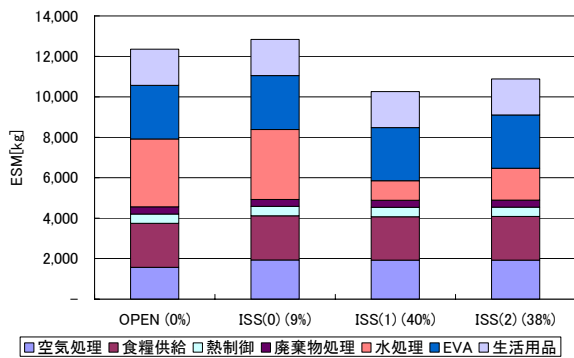


図5 3人が180日間月面拠点で活動した場合のESM配分

## 5. まとめ

ISSの運用に関して公開されているデータや教訓をもとに将来想定される月面拠点の生命維持システムについて検討した。再生型生命維持規模解析ツールを用いて、水の使用量や再生について、4つの典型的な組み合わせについて検討した。質量コストの面では常時滞在2ヶ月以上が目安であり、ESMコストの面では常時滞在4ヶ月以上であれば水の使用量が少ない場合でも、多い場合でも再生が有利になる。つまりシャワー用水の使用によって水の使用量が増えた場合だけではなく、水の使用量が比較的小さい場合でも、水再生の検討は優先事項であると考えられる。

## 参考文献

- [1] NASA, NASA's Exploration Systems Architecture Study, NASA TM-2005-214062, 2005.
- [2] 阿部貴宏、佐藤直樹、有人月探査構想と有人技術開発、第51回宇宙科学技術連合講演会講演集、2007.
- [3] 今田高峰、佐々木宏、坂下哲也、HTVの有人宇宙船化の検討、第51回宇宙科学技術連合講演会講演集、2007.
- [4] H. Jones, Breakeven Mission Durations for Physicochemical Recycling to Replace Direct Supply Life Support, SAE Technical Paper Series 2007-01-3221, 2007.
- [5] 宮嶋宏行、日本独自の月面拠点を想定した生命維持システムのトレードスタディ、第52回宇宙科学技術連合講演会講演集、2008.
- [6] A. J. Hanford, Advanced Life Support Research and Technology Development Metric – Fiscal Year 2002, 2003.
- [7] R. L. Carrasquillo, Summary of Resources for the International Space Station Environmental Control and Life Support System, SAE Technical Paper Series 972332, 1997.
- [8] H. Y. Yeh, et al., Advanced Life Support Sizing Analysis Tool (ALSSAT) Using Microsoft® Excel, SAE Technical Paper Series 2001-01-2304, 2001.
- [9] P. O. Wieland, Designing for Human Presence in Space: An Introduction to Environmental Control and Life Support Systems, NASA RP-1324, 1994.
- [10] C. L. Phillistine, International Space Station Water Usage Analysis, SAE Technical Paper Series 2005-01-2836, 2005.