

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

宮嶋宏行 東京女学館大学

第52回 宇宙科学技術連合講演会
淡路夢舞台国際会議場
2008年11月5日(水) - 7日(金)

有人月探査

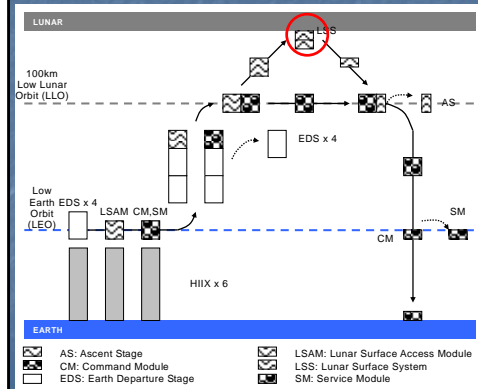
- 近年、世界各国で国際宇宙ステーション(ISS : International Space Station)に続く有人宇宙活動として有人月探査計画が注目を集めている。
- 生命維持システムの分野では、米国の**有人宇宙船(CEV : Crew Exploration Vehicle)**の開発に続き、**月面着陸機、月面拠点**の生命維持システムの検討が始まっている。
- 国際宇宙ステーション → 有人火星探査 → 2004年の米国による新宇宙探査ビジョン → 有人月探査
 - **米国**: 現在CMP (Constellation Program)として有人月探査を含む有人宇宙探査計画が進められている。技術的な検討がLSAS (Exploration Systems Architecture Study)で行われ2005年に発表。
 - **欧州**: 火星探査を含む**AURORA計画**。
 - **日本**: 有人月探査構想、月への有人輸送システム、HTV(HII Transfer Vehicle)の有人宇宙船化などが検討。

生命維持システムのシステムスタディ コスト計算とトレードスタディ

- 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。
 - 地球低軌道のISSでは**空気も水も再生**されていない状態でも長期間運用されている。
- 一方で、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研究事例もある。
 - 飲料水に加え、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/CM-d)には、損益分岐点は**水再生93日**、**CO₂還元281日**などの報告もある。
 - 飲料水に加え、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**、**CO₂還元281日**となっている。
- **ミッション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、様々な条件下でのコンフィギュレーションや要素技術をシステム全体として検討することが必要。
↓
コンフィギュレーションと要素技術の候補について検討を行う
再生型生命維持規模解析ツールを開発。
↓
月面拠点の生命維持システムについて検討。

日本の持つ輸送系の延長線上に考えられる 有人月探査ミッションの一例



物質再生の点から見た 生命維持システムの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 ₂ 処理	除去	除去・再生	除去・再生
	O ₂ 供給	供給	再生・生産	再生・生産
	N ₂ 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
食糧系	食糧供給	供給	供給	生産
居住系	衣類供給	供給	再生(洗濯)	再生(洗濯)

生命維持システムの要素技術

機能	サブ機能	Shuttle型	ISS型	閉鎖型
空気処理系	CO ₂ 除去	LiOH	4BMS	4BMS
	CO ₂ 還元	—	※バリエ	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 ₂ /低温O ₂ タンク	N ₂ /O ₂ タンク	N ₂ /O ₂ タンク
	空気供給	N ₂ /低温O ₂ タンク	CO ₂ 還元、水電気分解	作物栽培
水処理系	温湿度制御	CHX	CHX、排水へ凝縮	CHX、排水へ凝縮
	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、MGO	ヨウ素	ヨウ素
	排水処理	放出	多重ろ過	多重ろ過
廃棄物処理系	尿処理	排水タンクへ	VCD	濃縮脱水
	便処理	便バッグ	便バッグ、乾燥圧縮	濃縮脱水
食糧系	食糧生産	—	—	作物栽培
	食糧供給	—	冷蔵/冷凍	冷蔵/冷凍
居住系	洗濯	—	洗濯	洗濯

コスト計算法 (1) Equivalent System Mass (ESM)の定義と計算

$$ESM = \sum_{i=1}^n [(M_{i1} \cdot SF_{i1}) + (V_{i1} \cdot V_{eq}) + (P_i \cdot P_{eq}) + (C_i \cdot C_{eq}) + (CT_{eq} \cdot D \cdot CT_{eq}) + (M_{TDi} \cdot D \cdot SF_{TDi}) + (V_{TDi} \cdot D \cdot V_{eq})]$$

M_{i1} : サブシステム*i*の初期質量[kg]
 SF_{i1} : サブシステム*i*の初期質量貯蔵係数[kg/kg]
 V_{i1} : サブシステム*i*の初期体積[m³]
 V_{eq} : サブシステム*i*の与圧体積質量等価係数[kg/m³]
 P_i : サブシステム*i*の必要電力[kW/e]
 P_{eq} : サブシステム*i*の電力質量等価係数[kg/kW/e]
 C_i : サブシステム*i*の冷却要求[kW/h]
 C_{eq} : サブシステム*i*の冷却質量等価係数[kg/kW/h]
 CT_{eq} : 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_{eq} : 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[m³]

等価係数(月面)	
体積	100 kg/m ³
電力	226.0 kg/kW/e
冷却	53.6 kg/kW/h

電力の等価係数は小型の原子炉を用いた場合

コスト計算法 (2) サブシステムのスケールング

スケールング1

$$M_B = M_{Bbc} \cdot RNC_i / BNC_i$$

$$V_B = V_{Bbc} \cdot RNC_i / BNC_i$$

$$P_i = P_{Bbc} \cdot RNC_i / BNC_i$$

スケールング2

$$M_B = M_{Bbc} \cdot (0.4 + 0.6 \cdot RNC_i / BNC_i)$$

$$V_B = V_{Bbc} \cdot (0.4 + 0.6 \cdot RNC_i / BNC_i)$$

$$P_i = P_{Bbc} \cdot (0.4 + 0.6 \cdot RNC_i / BNC_i)$$

スケールング3

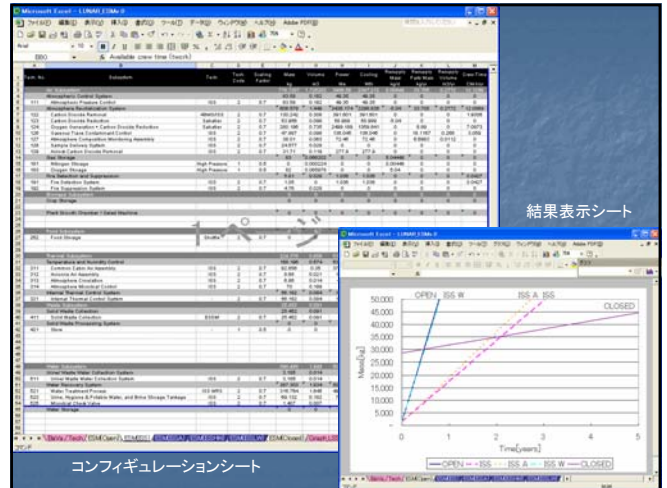
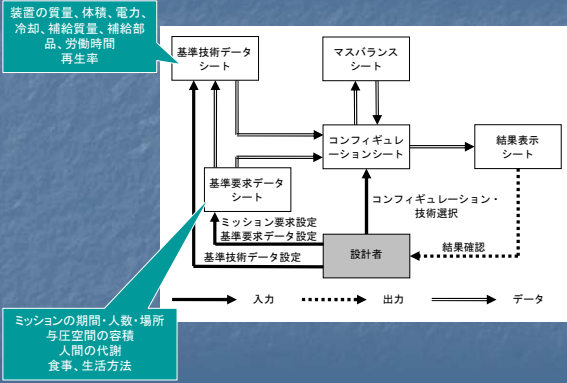
$$M_B = M_{Bbc}$$

$$V_B = V_{Bbc}$$

$$P_i = P_{Bbc}$$

M_{Bbc} : 基準ハードウェア*i*の質量
 V_{Bbc} : 基準ハードウェア*i*の体積
 P_{Bbc} : 基準ハードウェア*i*の電力
 RNC_i : ハードウェア*i*の要求能力
 BNC_i : ハードウェア*i*の基準能力

再生型生命維持規模解析ツールの構成



月面拠点の生命維持システム検討条件

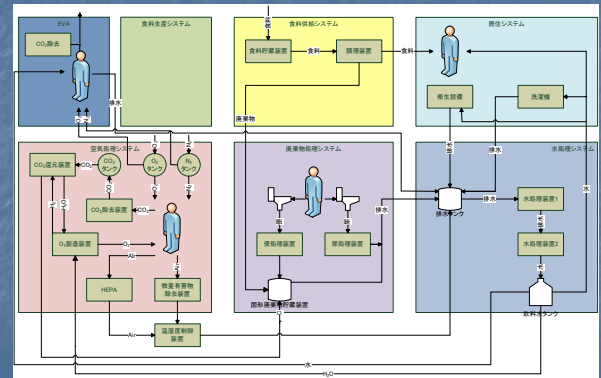
人間の要求 3人で計算

- 以下の構成について比較
 - 供給型 (OPEN)
 - ISS型 (ISS)
 - ISS型で空気再生なし (ISS A)
 - ISS型で水再生なし (ISS W)
 - 閉鎖型 (CLOSED)
- 閉鎖型の食糧生産設備
 - Drysdaleモデルにより食糧自給率100%の場合を計算
 - 乗組員あたりの供給エネルギー2700kcal/CM-d

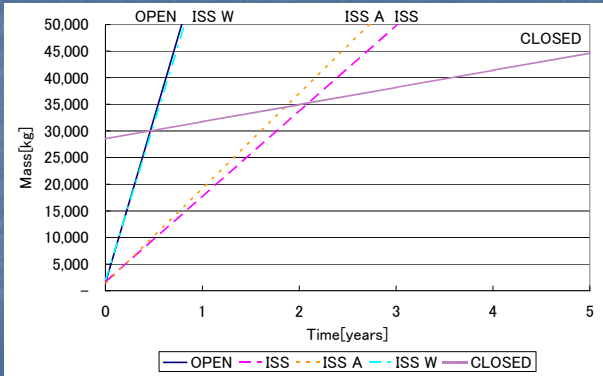
要求項目	通常 kg/CM-d
酸素	0.84
食料(固形)	0.62
食料(水分)	1.15
調理用水	0.79
飲用水	1.62
手洗い用水	4.09
シャワー用水	2.72
トイレ洗浄水	0.49
洗濯用水	12.5
食器洗浄水	5.45
合計	30.27

CM : Crewmember

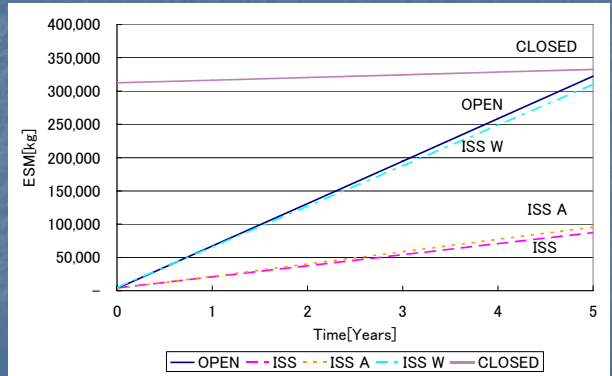
月面拠点のISS型生命維持システム構成図



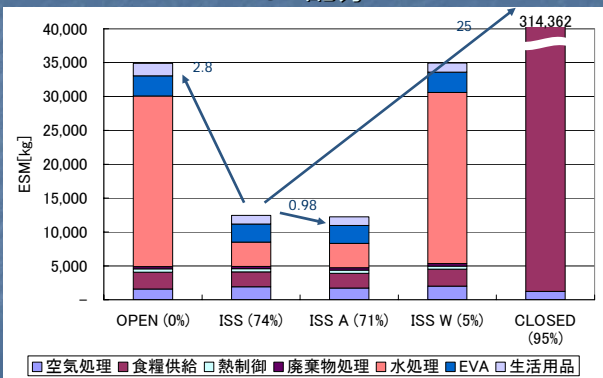
月面拠点生命維持システムの質量比較



月面拠点生命維持システムのESM比較



3人が180日間月面拠点で活動した場合のESM配分



計算結果の考察

3人が180日間月面拠点で活動した場合

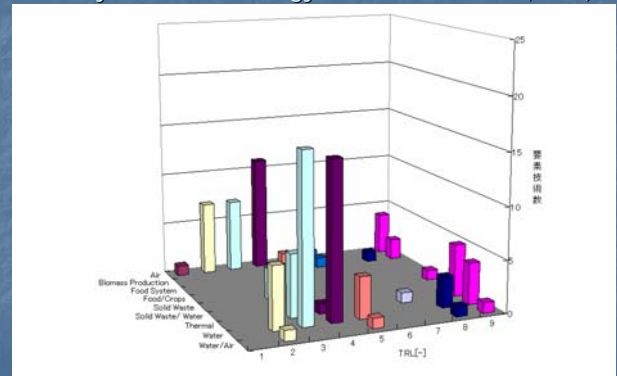
- 質量比較
 - 水再生の効果は大きく、空気再生の効果は水再生に比べて大きくない。
 - 本格的な食糧生産はミッション期間が2年以上の場合に必要なとなる。
- ESM比較
 - 体積、電力、熱負荷、労働時間まで考慮した場合、本格的な食糧生産は難しい。
 - CO₂還元装置が不要。必要となるのはミッション期間が221日以上の場合。

まとめ

- コンフィギュレーションと要素技術の候補について検討できる再生型生命維持規模解析ツールを開発した。
- これを利用して、ISS型のコンフィギュレーションと要素技術をベースにした月面拠点生命維持システムについて検討した。
- 現在、ISSの要素技術データを利用しているが、今後、日本独自の要素技術やコンフィギュレーションを取り入れたシステムスタディを行う予定である。

要素技術の研究開発状況[米国]

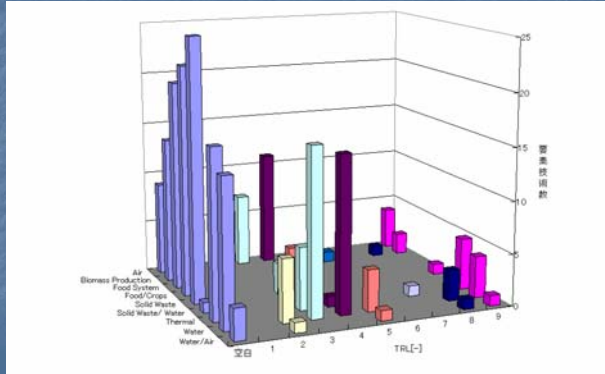
Subsystem - Technology Readiness Levels (TRLs)



2005.4.13 M. Anderson調査

要素技術の研究開発状況[米国]

Subsystem - Technology Readiness Levels (TRLs)



2005.4.13 M. Anderson調査

日本はどの要素技術を？

- 単独で有人月探査？
- 国際協力で有人月探査？
 - 基幹システムは米国
 - 有人火星探査を意識する米国はシステムの信頼性の点からTRLの高い要素技術を利用してくる。
- TRLは低くとも面白みのある要素技術に挑戦？