

3H00 先端生命維持システム (ALS)の概念設計に設計法はどこまで貢献できるか

宮嶋宏行 東京女学館大学
石川芳男 日本大学

発表の流れ

- 有人宇宙活動における生命維持システムの系譜
 - なぜ、設計法か？
- 予備設計のステップと設計法の概観
- 設計法の課題と、その解決
 - 設計法は、どこまで貢献できるか？

有人宇宙活動の歴史

- 今までの有人宇宙活動
 - 1960年代 VOSTOK, MERCURY, VOSKHO, GEMINI, SOYUZ, APOLLO
 - 1970年代 SALYUT, SKYLAB
 - 1980年代 SPACE SHUTTLE, MIR
 - 1990年代 ISS (国際宇宙ステーション)
- 有人火星探査計画
 - 1989年 Space Exploration Initiative (SEI)
 - 1993年 Reference Mission (Human Exploration of Mars)
- 地上実験施設・・・資源を再生しながらの閉鎖居住実験
 - 1970年代 ソ連のBIOS3
 - 1990年代 米国のLunar-Mars Life Support Test Project (LMLSTP)
 - 2000年代 日本のClosed Ecology Experiment Facilities (CEEFF)
- 現在の計画
 - 2004年 米国の新宇宙政策発表
 - ISSの次の計画としての、月や火星への有人探査。・・・有人探査システムCrew Exploration Vehicle (CEV)の開発が始まる。

生命維持システムの比較

	APOLLO	SKYLAB	SPACE SHUTTLE	ISS
人数	3人	3人	7人	6人
期間	6-13 days	29-85 days	~16日	10年
気圧	O ₂ 100%, 34.5kPa	O ₂ 74%, N ₂ 26%, 34kPa	O ₂ 21.7%, N ₂ 78.3%, 101kPa	O ₂ 21.7%, N ₂ 78.3%, 101kPa
温・湿度制御	21-24 °C	13-32 °C	18.3-26.6 °C	18.3-26.6 °C
CO2除去	○ (LiOH)	○ (Ze)	○ (LiOH)	○ (Ze)
CO2再生	×	×	×	△
O2生成	×	×	×	○
トレースコンタミネント制御	○ (AH)	○ (AH)	○ (AH)	○ (AH)
ガス貯蔵	○ (O ₂)	○ (O ₂ , N ₂)	○ (O ₂ , N ₂)	○ (O ₂ , N ₂)
水処理	×	×	×	○
水貯蔵	○	○	○	○
廃棄物管理	× (集積・尿廃棄)	× (集積・便乾燥)	× (集積・便乾燥・尿廃棄)	△ (集積・便圧縮、尿処理)

参考: Historical ECLSS for U.S. and U.S.S.R./Russian Space Habitats, NASA/TM-2005-214007

生命維持システムの分類

クラス	閉鎖度	水	酸素	食料	固形物
1	完全閉鎖系	火星以遠の宇宙拠点の生命維持システム (地上)例: BIO-Plex, CEEFF, BIOS3			
2		将来の宇宙拠点の生命維持システム 例: 月面基地、火星基地			
3					
4	部分閉鎖系	将来の宇宙拠点の生命維持システム 例: 月面基地、火星基地			
5					
6	再生しない	現在の宇宙拠点の生命維持システム 例: ISS			
7					

△ : 一部再生

いまだ存在しないシステム
機能分析が重要

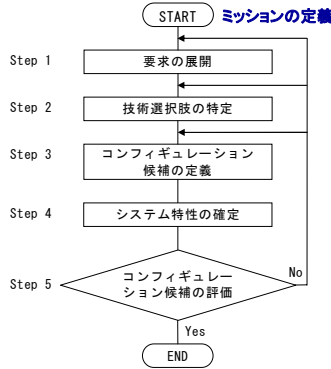
機能配分が過去40年間
あまり変わっていない。

参考: Designing For Human Presence in Space, NASA RP-1324

目的

- そこで
 - 生命維持システムの予備設計を5つのステップに分け、設計法がそれぞれの設計過程でどこまで貢献できるかについて考察する。
 - 特に、いまだ存在しない生命維持システムを設計するための設計法について考える。
- 先行研究 → 予備設計 → 基本設計 → 詳細設計

予備設計5つのステップ



Step 1 要求の展開 Step 2 技術選択肢の特定

設計者が行う

機能	サブ機能	物理化学的技術	生物学的再生技術
空気管理	圧力制御	バルブ	※
	温度・湿度制御	凝縮熱交換	※
	換気	ファン	※
二酸化炭素除去	LiOH, 4BMS, 固体アミン	植物、藻類、バクテリア	
	有害ガス処理	活性炭、触媒酸化	植物、バクテリア
	微粒子	HEPAフィルタ	※
空気組成の監視	センサー、質量分光計	※	
	酸素供給	貯蔵、電気分解、CO2還元	植物、藻類
	窒素供給	貯蔵	※
水管理	水準備	貯蔵、水処理、尿処理	バイオリアクタ、植物
	水質の監視	センサー	※
	水供給	配管	※
廃棄物管理	有機物処理	貯蔵、湿式酸化、燃焼	菌類、バクテリア
	無機物処理	貯蔵	※
食料管理	食料準備	貯蔵	植物、藻類、菌類
	食料処理	地上技術の改良	※

※生物学的再生技術では不可能

Step 3 コンフィギュレーション候補の定義

設計者が行う

- ミッションに最適な技術の組合せ
 - ミッション特性：乗員数、ミッション期間、キャビンリーク、補給可能性、電力、容積、輸送コスト、現地資源の利用など
- 設計経験則
 - ミッション期間にかかわらず温度・湿度・気圧制御や大気組成監視は物理化学的技術と生物学的再生技術の間で共通である。
 - 2～3週間以上のミッションでは二酸化炭素除去再生技術を使用する。
 - 水使用量(特に衛生水)によっては、2～3週間以上のミッションでは水再生技術を利用したほうがよい。
 - 大幅な水の損失が予想される場合には尿から水を回収したほうがよい。
 - 電力の使用できる度合いにもよるが、酸素再生技術は2～3ヶ月以上のミッションで適用したほうがよい。
 - もし、余分な水を得た場合には、電気分解を使って酸素の生産ができる。
 - もし、水収支を維持しなければならないならば、酸素再生は二酸化炭素を減らすことができる。
 - もし、再生した資源を利用できるならば廃棄物の再生を行ったほうがよい。例えば、植物生産を行っているときの固形廃棄物から炭素や窒素を回収する。

Step 4 システム特性の確定

- サブシステムごとの物理特性(質量・体積)と運用特性(電力消費、熱負荷、乗員労働時間)を確定する。

質量 = \sum サブシステムの質量

サブシステムの質量 = ハードウェア質量 + 初期充填質量 + (消費質量 + 消耗品質量 + 交換部品質量) × ミッション期間

体積 = サブシステムの体積

サブシステムの体積 = ハードウェアの体積 + (消費体積 + 消耗品体積 + 交換部品体積) × 補給間隔

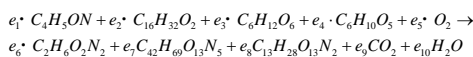
電力 = \sum サブシステムの電力

熱負荷 = \sum サブシステムの熱負荷

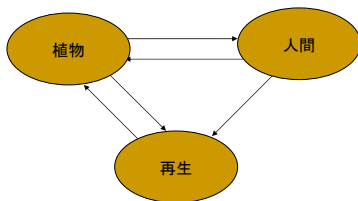
労働時間 = \sum サブシステムに関わる労働時間 × ミッション期間

→ 物質収支の計算・・・生化学量論

物質収支の計算・・・生化学量論

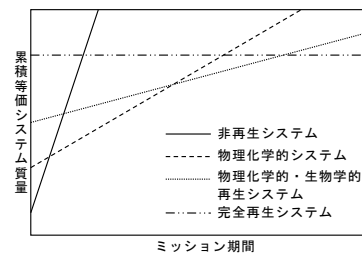


たんぱく質・脂質・糖質・繊維・酸素 →
尿・糞・その他の有機物・二酸化炭素・水



Step 5 コンフィギュレーション候補の評価

- 物理特性・運用特性を非再生システムと比較



等価システム質量(ESM)・・・打ち上げコストに対する体積、電力、熱負荷、労働時間の重要度を質量に変換したもの

予備設計5つのステップと設計法 (中間まとめ)どこまで貢献できるか？

	設計法	設計ツール
Step 1 要求の展開	設計法なし、機能分析は設計者による一般的な設計法なし	
Step 2 技術選択枝の特定	設計法なし、技術選択枝の開発	
Step 3 コンフィギュレーション候補の定義	設計法なし、試行錯誤？	
Step 4 システム特性の確定	生化学量論 → シミュレーション	G-189A, CASE/A ECOSIM, Matlab/Simlink
Step 5 コンフィギュレーション候補の評価	等価システム質量 → トレードオフスタディ	ESAP, LISSA, BETS, LSOP ESM Spreadsheet

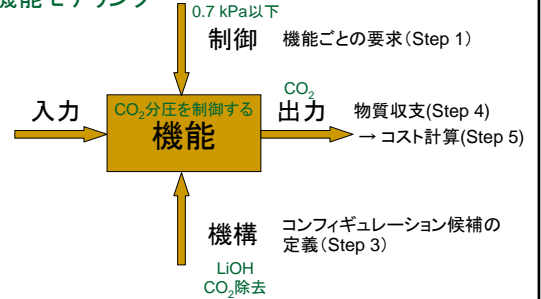
今までの生命維持システム(クラス6, 7)の設計 → Step 4, 5を支援
 いまだ開発されたことのない生命維持システム(クラス1(完全閉鎖系))
 → Step 1~5までをシステムティックに設計支援する必要...その方法は？

IDEF (Integrated DEFinition methods)

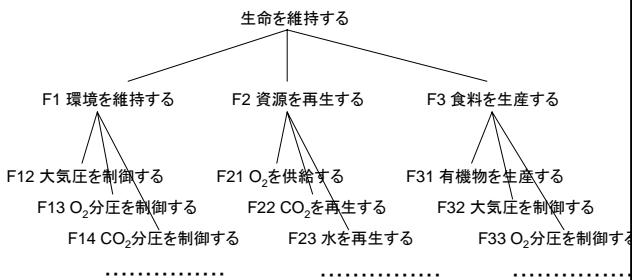
アイデフ / 統合化定義方法論

複雑な対象を分析する構造化分析/設計技法で、コンピュータ・ソフトウェアの設計、ビジネスプロセスの分析に利用される。

IDEF0 機能モデリング

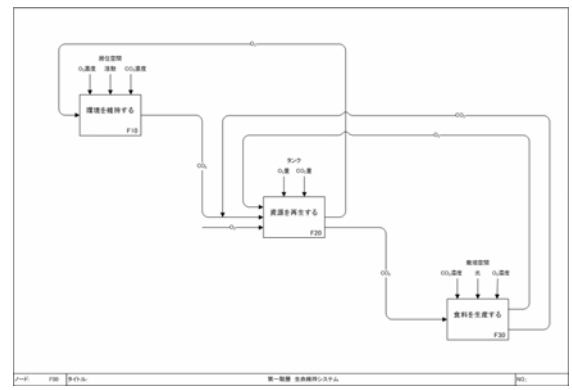


生命維持システムの機能配分 クラス1(完全閉鎖系)...クラス2以下は派生

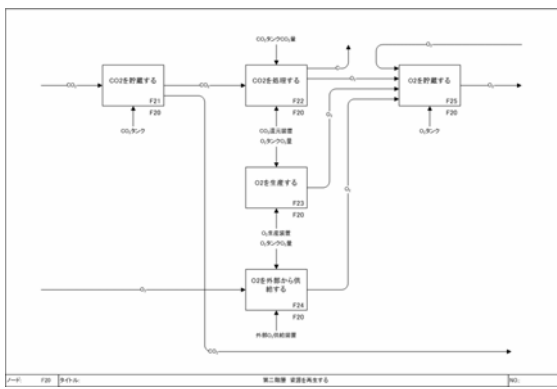


機能配分(垂直関係)だけでは表現できない、機能間の水平関係まで表現できる。

第一階層 全体システム

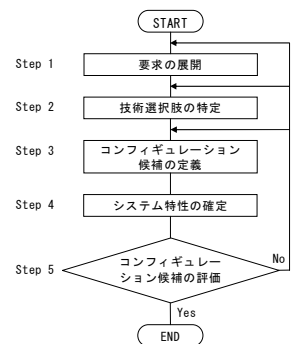


第二階層 F2 資源を再生する



(最終まとめ)どこまで貢献できるか？

- 予備設計を支援する設計法としてIDEF0を検討した。
- IDEF0を用いることでStep 1~5までをシステムティックに設計支援できる。.....
機能モデルを利用して Step 4, 5の既存の設計法との連携が可能になる。

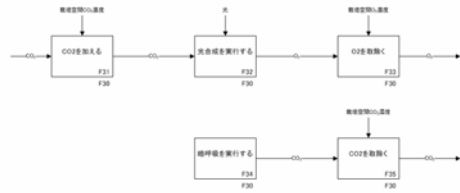


第二階層 F1 環境を維持する



F1-1 F12 製作中 第二階層 環境を維持する 301

第二階層 F3 食料を生産する



F3-1 F35 製作中 第二階層 食料を生産する 301

等価システム質量(ESM) ミッションによるコスト換算係数

ミッション	コスト要因		
	体積 [kg/m ³]	電力 [kg/kW]	冷却 [kg/kW]
国際宇宙ステーション	66.66	476	163.8
火星へ移動	16.1	83.3	21.1
火星表面	2.08	86.9	66.7