

有人宇宙活動技術の研究

Technology Research for Supporting Manned Space Activity
宇宙先進技術研究グループ(Advanced Space Technology Research Group)
大西 充、小口美津夫、吉原 正一、桜井誠人、大森克徳、星野 健
Mitsuru Ohnishi, Mitsuo Oguchi, Shoichi Yoshihara,
Masato Sakurai, Katsunori Ohmori and Takeshi Hoshino

Abstract

The final goal of "Manned Space Activity" is for people to live in areas far from the earth without help from the earth. However its technology will be necessary when we can make a manned space base beyond Mars. In order to discuss and to propose an advanced life support system for future space development, "advanced life support system working group" was started. In our research, a few mile stones are made for near future technology, that is, SEPAL (Self-contained PArtially-circulated Life support system). In the research on SEPAL, physico-chemical process which is promising technology is being studied. In order to increase flight opportunities, a self-contained system is considered. In the research on Space Environment Utilization, studies of three subjects, which are candidates of Kibo utilization research theme, and promising ones are continued. As aims of these studies, not only scientific aspects but also understand of the interface conditions of manned space activities are included.

1. はじめに

有人宇宙活動の究極の目標は、地球から遠く離れた所に人間を送り込み、そこで、地球からの援助を受けずに人間を生活させることである。これを実現するためには人間が排泄するものを完全にリサイクルして、種々の物を供給する生命維持システムの構築を必要であるが、大変複雑なシステムとなるため、直接に実現することは不可能で多くの研究蓄積が必要である。このため、「有人宇宙活動技術の研究」では、生命維持技術に関連する専門家による**生命維持ワーキンググループ**を設置し、宇宙開発における技術の重点化等の議論に生命維持技術を提案した。また、当該システム実現に必須となる要素技術に関して長年の研究実績があり、当該システムのサブシステムを構成する「エネルギー供給」、「空気再生」、「水分解」に関し多大な技術蓄積を有することも勘案して、この究極のシステムを実現するためのステップとして下記を行っている。

- ・まず、二酸化炭素をリサイクルして酸素を得ることに研究テーマを集約
- ・また、特徴付けとしてエネルギーを自前供給する**自立型部分循環生命維持システム**を研究
- ・特に水分解、エネルギー供給、空気再生技術のサブシステムに重点

この他、有人宇宙技術とのインターフェイス習得も加味した**JEM利用技術**の研究を行っている。ここでは、**自立型部分循環生命維持システム**の研究、**JEM利用技術**の研究を簡単に紹介する。なお本来平成16年度成果のみを紹介するべきであるが、説明の都合上他年度の成果も年度を明示して示す。

2. 研究の概要

平成16年度は以下の項目について研究を行った。

(1) 生命維持ワーキンググループ

生命維持技術に関連する専門家による**生命維持ワーキンググループ**を設置した。宇宙開発における技術の重点化等の議論に生命維持技術を提案した。

(2) 自立型部分循環生命維持システムの研究

空気再生・水電解サブシステム；サバチエ反応装置および水電解装置を運転し、種々の操作条件と生成ガスの関係をガス分析により明らかにした。

エネルギー供給サブシステム；スターリングエンジンの実用化を目指したベンチャー企業を立ち上げた。

(3) JEM利用技術の研究

臨界点近傍流体の研究；臨界点近傍流体特有の新しい伝熱現象を直接観察した。

表面・界面制御に関する研究；誘電泳動による流体ハンドリングを試行した。

宇宙機内における大域的対流・拡散現象に関する研究；無人回収カプセル衛星を想定した拡散現象観察実験を検討した。

3. 成果の概要

3. 1 生命維持ワーキンググループ

2004年9月の総合科学技術会議において「20年～30年後における独自の有人宇宙活動着手の可能性を検討する」との発表があった。またJAXAが長期ビジョンの検討に着手したことから、生命維持技術研究開発の今後を綿密に議論する必要が生じた。このため内外の生命維持技術に関連する専門家による非公式の**生命維持ワーキンググループ**を設置した。本WGはボランティアベースで行う情報交換会である。WGでは、

- ① 技術動向、技術レベルの把握
- ② 技術ロードマップの明確化
- ③ 長期ビジョン/技術ロードマップに基づくプロジェクト提案

を行って、今後長期ビジョンに従って行われるであろう、宇宙開発における技術の重点化等の議論に生命維持技術を提案してゆく事を目的としており、ロードマップの明確化を行っている。我が国は現在の技術では米国などの宇宙先進国に遅れを取っているが、次世代ではその差は縮まり、次々世代においては凌駕している事がわかった。この点を考慮し、次世代技術を着実に獲得して次々世代技術を目指すため、地上技術の成果を積極的に取り入れて生命維持技術研究開発を進める事を大まかに表現したロードマップをFig.1に示す。現在の参加組織は以下の通りである。

- ・ JAXA 総合技術研究本部(幹事)
- ・ 環境科学技術研究所
- ・ 三菱重工業
- ・ 川崎重工業
- ・ 未来工学研究所
- ・ JAXA 基幹システム本部

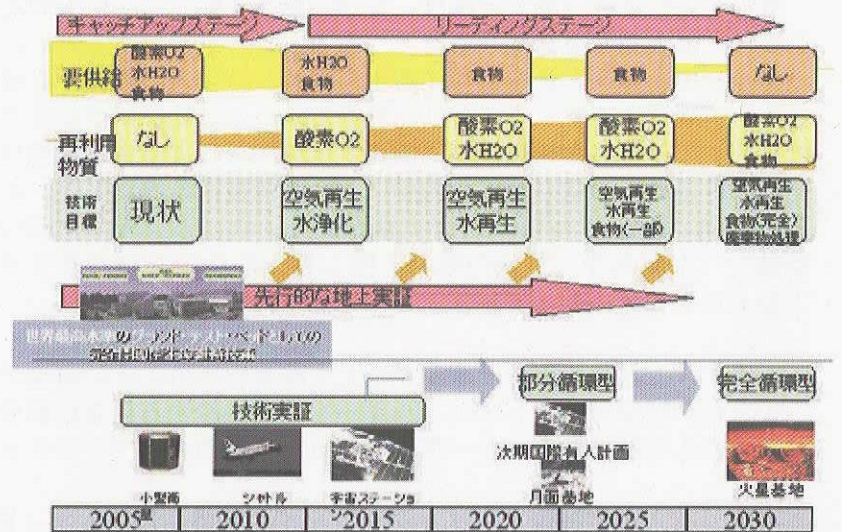


Fig. 1 Research and development road map for advanced life support system technology

3. 2 自立型部分循環生命維持システムの研究

自立型部分循環生命維持システムSEPAL (Self-contained Partially-circulated Life support system)に関して研究を行っている。このシステムは大きくエネルギー供給サブシステム、空気再生サブシステム、水分解サブシステムに分けることができる。この研究が目指すのは、空気を再生して食物だけの供給で生命維持が可能となるシステムの構築である。

3. 2. 1 空気再生サブシステム

空気再生のプロセスをFig.2に示す。まず人間から排出された二酸化炭素は、二酸化炭素分離濃縮装置で濃縮する。次に二酸化炭素を水素と混合しサバチエ第一反応装置に供給する。ここで触媒とともに300℃前後に加熱することにより CH_4 と H_2O を生成する。この H_2O をエネルギー供給サブシステムから提供される電力によって電気分解を行う。

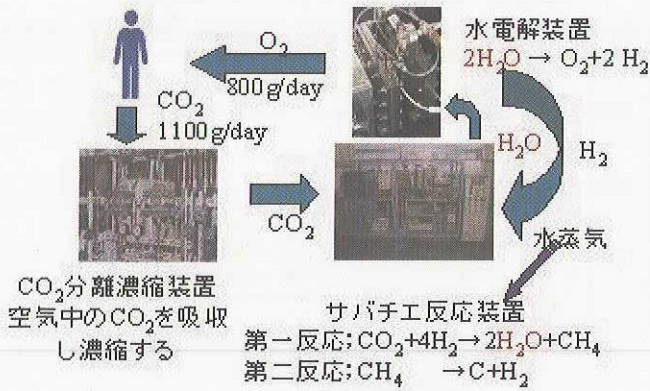


Fig. 2 Air revitalization system

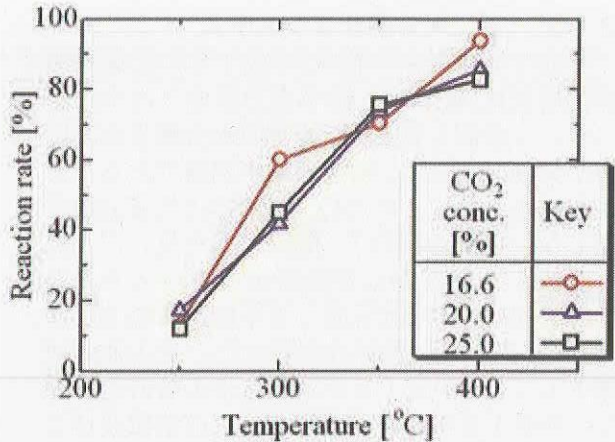


Fig. 4 Sabatier reaction rate depend on temperature

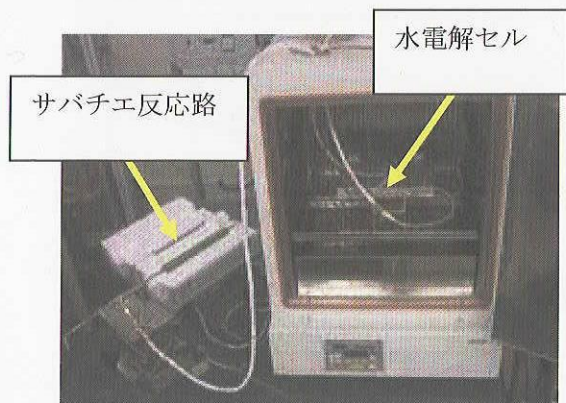


Fig. 3 Sabatier reactor and water electrolysis cell

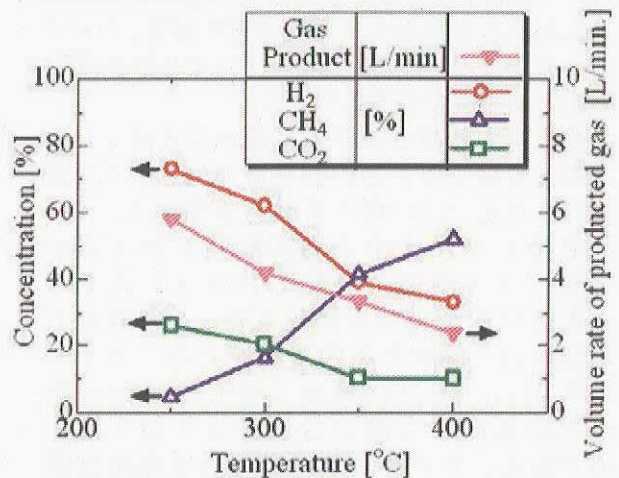
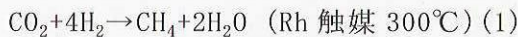


Fig. 5 Connection of Sabatier reactor and Electrolysis

Fig. 3 にサバチエ反応炉と水電解セルの写真を示す。Fig. 3 左側の電気炉の中に配置したパイプの内部に、表面がルテニウムで覆われた直径 4mm 程度のアルミナボールが充填してある。二酸化炭素と水素の混合ガスを一方から供給すると、電気炉で過熱されたパイプの内部において、以下に示すサバチエ第一反応が起こる。



生成されたメタンガスと水蒸気は、反応管の他方から排出される。生成したガスは氷水で冷却した凝縮管に集められた後、生成水の重量を計測する事により反応効率を求めた。その結果を Fig. 4 に示す。温度は熱電対を用いてサバチエ反応炉中央部を計測した。温度上昇とともに反応効率が增加する事がわかった。式(1)に示すように、モル分率は、二酸化炭素：水素 = 1 : 4 で化学量論比となっているが、Fig. 45 に示すとおり、水素をやや多めにすると、400°Cにおいて 96%程の高収率が得られた。文献によると 300°C程で最も収率が高くなるとの報告があるので、今後流入ガスの事前加熱などに注意しながら実験を進めてゆく。

凝縮管を経たガスは、サンプルバックに収集され、単位時間当たりの生成ガス発生量を計測した後、H16 年度に導入したガスクロマトグラフィを用いて成分分析した。その結果を Fig. 5 に示す。収集されたガスの成分は反応温度が高くなるとともに水素(○)と二酸化炭素(□)の成分濃度が減少し、メタンガス(△)の成分濃度が上昇している事がわかった。また、サンプルバックに収集された生成ガスの総体積を逆▼に示した。温度の上昇に従い生成ガスの総体積が減少するのは、生成した水蒸気が凝縮管で収集されるためと考えられる。これらの結果は、温度の上昇とともに反応効率が上昇する Fig. 4 の結果をガスの成分および生成ガスの総体積からも裏付けている。

3. 2. 2 水分解サブシステム

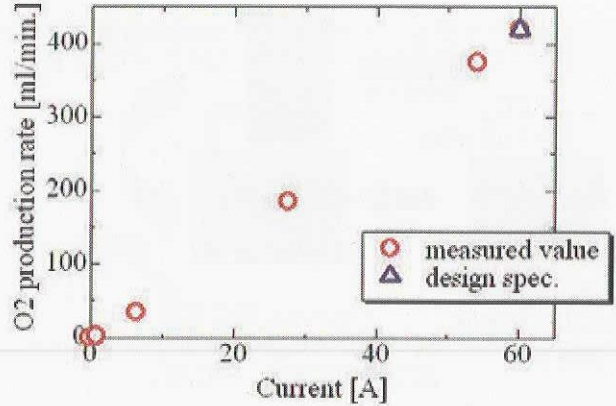
平成13年度から研究(平成13年度採用萌芽的研究)に着手し、微小重力環境下の水分解について検討した結果、通常の水分解手法では微小気泡が発生し、気液分離が困難であることが想定された。このため、原理的に気液分離を要しない手法を検討し、解決方法を見いだした。

平成15年度から空気再生サブシステムとの統合を図る研究(平成15年度採用萌芽的研究)に着手し、一部試作を行った。その他の成果としては、平成15年度に3件の特許を取得し、平成16年度に「サバチエ反応装置及びこれを用いた水蒸気電解装置」の特許を取得した。また、平成15年度に「微小重力場等の極限環境における空気再生水電解装置の研究」のタイトルで第22回サウエザリング技術振興財団技術功労賞を受賞した。

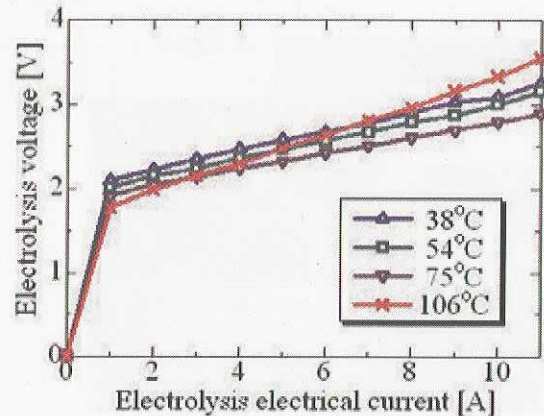
空気再生サブシステムにおいて生成した水を電気分解するための微小重力対応型水電解装置を Fig. 3 右側に示す。水電解セルは、恒温槽の中に水平方向に設置され下面からサバチエ反応で発生したメタンガスと水蒸気の混合ガスを供給した。水平設置した理由は、電解セル内で液滴となった水が導入用のパイプに戻って行くのでセル内が水蒸気のみで満たされるようにするためである。サバチエ反応装置と水電解装置は100℃以上に保温されたパイプで繋がれているため、パイプの中で水分が凝縮することはない。電解セル内の様子を観察した結果、セル内は水蒸気に満たされていることがわかった。水電解セルの大きさは高さ10cm、横19cmで電解面積は190cm²である。Fig. 6 a) に平成15年度に行った電解電流とマスフローメーターによって計測された酸素発生量の関係を示す。酸素発生量は電解電流に直線的に比例する。人間が一人一日に必要な600Lの酸素発生量を三角のプロットに示した。通常型の水電解セルでは2個のセルで一日に600Lの酸素を発生させる事が可能であるが、微小重力対応型では1/3程度の酸素発生量であった。微小重力対応型水電解セルの最大の電流密度は60[mA/cm²]程度であった。これは、一番目の膜を通過した水蒸気が二番目の電解膜に到達するまで拡散律速になるためである。Fig. 6 b) に温度が変化した場合の電解電圧に及ぼす電解電流の影響を示す。同電流条件で比較すると電解電圧は温度の上昇とともに減少した。この事は温度が高いほど電解効率が上昇する事を示している。しかしながら、106℃の場合、電解電圧の上昇は電解電流の上昇に伴ってより低い温度条件の時よりも急激に上昇している。これは沸点よりも高温のため水蒸気になっているためであると考えられる。

3. 3. 3 エネルギー供給サブシステム

太陽エネルギーを利用して、熱、光、電力などのエネルギーを他のサブシステムに供給する。これを全体システムに内在させることでシステムの自立化が可能となる。現在一般に用いられている宇宙用エネルギー源である太陽電池より高効率の発電装置として平成14年度にスターリングエンジンを試作し、フリーピストン型では日本初の自立運転を達成した。これまでの性能試験により、200W級と小型であるにもかかわらず、効率20%を達成している。平成16年度には、松下電器産業株式会社、海上技術安全研究所と共同研究(Fig.7)を実施し、エンジンの高効率化を目指した。なお、この共同研究の成果を元に、松下電器産業株式会社が、スターリングエンジン実用化を目指すベンチャ



a) Oxygen production rate for one electrolysis cell



b) the relationship between electric current and electrolysis voltage

Fig. 6 Water electrolysis test results

一企業「株式会社eスター」を設立した（平成17年4月22日プレスリリース）。

また、「フリーピストン型スターリングエンジン発電機」など3件の特許出願を行った。関連して、平成15年度に特許出願および意匠登録出願を行ったスターリングエンジン模型について、平成16年度に民間企業に実施許諾を与え、商品化された。



Fig. 7 Assigns of collaboration

第1回「きぼう」(船内実験室)利用一次選定テーマとして1993年に全国から選ばれた50テーマ(現在15テーマ)の一つ「マランゴニ対流の定常流からカオス流への遷移過程と流れの内部構造の観察」の準備を進めているとともに、競争的研究資金や他部門支援により下記3件の研究を進めている。従来からの学術的な観点の他「有人宇宙活動」のインターフェイス条件の習得も目指している。

3. 4. 1 臨界点近傍流体の研究

平成13年度より、三菱総合研究所からの受託研究として開始、平成15年下期からは宇宙基幹システム本部からの社内発注として、宇宙科学研究本部とともに研究を実施している。平成14年度には臨界点近傍流体特有の新しい伝熱現象であるピストン効果の直接観察に世界で初めて成功した。報告書は別途。

3. 4. 2 表面・界面制御に関する研究

平成14年度から科学研究費を用いて行っている。平成16年度が最終年度。微小重力場においては、濡れ性、表面張力の効果が支配的に現れる。流体现象はそのスケールが小さくなるにしたがい、それらの力が支配的となることから、微小重力場と微小スケールの相似性に着目し、能動的に濡れ性および表面張力をコントロールすることにより液体を自在に制御することを試行した。平成15年度に「界面を有する二流体に発生する界面張力差対流による流体駆動方法」として日米に特許申請中である。

平成16年度は誘電泳動サイフォンの実験を試みた。Fig.8 a)に示す通り電極、フロリナートを配置し、高速度カメラにより電極の間隔および印加電圧を変えながら各測定を行う。電圧を印加すると誘電泳動で液面がFig.8 b)のように上昇する。Fig.9に電極間電圧をパラメーターとして液面上昇を観察した結果を示す。プロットは実験値、プロットと実線は(2)式より求めた理論上昇値をそれぞれ示す。Fig.9に示すように電圧が増加するに従い液面は電圧の二乗に比例して上昇する事がわかる。電極間間隔が0.2mmの時に実験値は理論値よりかなり大きくなったが、それ以外では理論値と実験値はほぼ等しくなっている。この理論値と実験値のずれに関しては電極とフロリナートとの濡れ角を正確に測定す

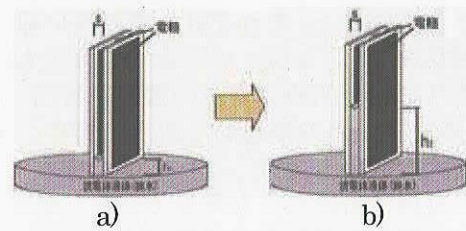


Fig.8 Sketch of Dielectrophoresis setup

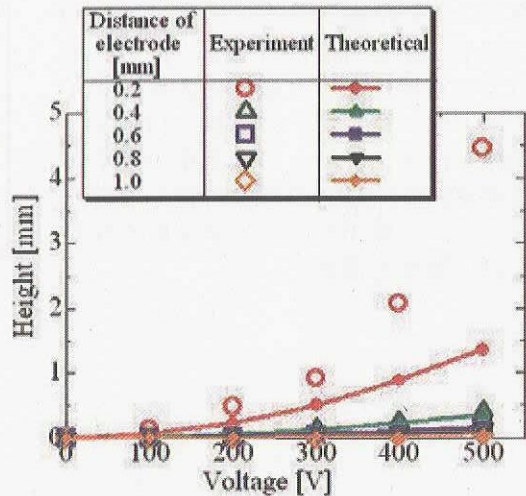


Fig.9 dielectrophoresis siphon depend on Voltage

る必要があると考えられる。また、電極間の平行度や距離について慎重に実験したが、さらに検討の必要もあると考えられる。

3. 4. 3 宇宙機内における大域的対流・拡散現象に関する研究

従来宇宙環境では無重力状態だと考えられていたが、現実には g -ジッターが存在している。本研究では、まず無人回収カプセル衛星の様な極めて静的な状態での精度良い実験を行い、流体現象を正確計測し、次いである程度の g -ジッターが見込める状態で再度流体現象を計測して、無重力環境下と g -ジッター環境下との正確な対比を得る事を目的とする。これにより通常の宇宙機内で普遍的に発生し、宇宙環境利用科学に影響を与えているであろう g -ジッターによる大域的な流体現象の知見を得る事ができると考える

この実験を実現するため、平成 16 年度において実施実験候補および Fig. 10 に示す実験装置概要を検討した。実験装置としては平成 11 年度および平成 14 年度の地上公募研究の成果を最大限に活用し、地上公募研究で製作された実験装置を自身が g -ジッターの発生源とならないよう徹底的に改良して無重力環境下を実現する事とし、以下の 3 実験を実施候補とした。

1. 電解発色法による拡散現象観察実験
2. 温度勾配下での電解発色法による拡散現象観察実験
3. 細線まわりの沸騰現象と電解発色法による拡散現象観察実験

4. まとめ

有人宇宙活動技術の研究を概観した。この技術は大変多岐にわたる分野を背景としている上、それぞれが息の長い研究開発を要している。このため、今後も所内外の競争的研究資金の獲得を目指し、外部機関との積極的な連携に努め、短期的な成果も達成しながら、研究水準の維持に努めたいと考えている。特に自立型部分循環生命維持システムに関わる技術は JAXA 独自技術として実用に近い位置にあり、一部は一般的な製品となる可能性もある。他方、宇宙での実用に向けた最初の大きなマイルストーンとして小型衛星、HTV、国際宇宙ステーション等を用いた宇宙技術実証を Fig. 11 の通り目指しており、宇宙用・一般用のバランスを取りながら研究開発を進めたい。

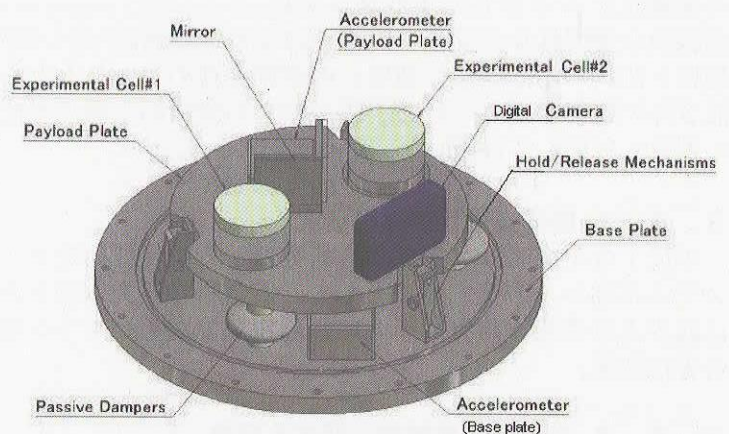


Fig.10 Concept of experimental setup



Fig. 11 Stepwise demonstration for air-revitalization