

## ポピュラーサイエンス (1)

# 宇宙ステーションにおける触媒利用

尾上 薫

早稲田大学理工学部 〒160 新宿区大久保 3-4-1

(1988年2月4日 受理)

## Utilization of Catalysts in Space Station

Kaoru ONOE

School of Science and Engineering, Waseda University  
3-4-1, Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 160

(Received February 4, 1988)

In the space station, maintaining the ecological life is essential. For this purpose the exhausted carbon dioxide gas must be converted into oxygen. The closed recycle system and the catalysts used are described.

## 1. はじめに

16世紀中頃コペルニクスの“地動説”が出現して4世紀半経過した現在でも、宇宙は人類最後のフロンティアとして謎を秘めて君臨しているが、20世紀後半になり宇宙大紀行の夢が一步一步現実へと近づきつつある。印象的なものを列記すると以下の如くである。

- 1957年10月 ソ連が世界初の人工衛星“スプートニク1号”の打上げに成功
- 1958年1月 米国初の人工衛星“エクスプローラ1号”の打上げに成功
- 1961年4月 ソ連が世界初の有人宇宙船“ボストーク1号”の飛行に成功
- 1962年2月 米国人初の有人飛行船“フレンドシップ7号”の打上げに成功
- 1969年7月 米国アポロ宇宙船で月面着陸に成功
- 1983年11月 スペースラブ計画により有人宇宙活動へのヨーロッパ参入

このように、宇宙飛行の歴史は地球の重力場からの脱出に始まり、人類を宇宙や月に送り出す努力を重ねた後、短期間ではあるが実験室を宇宙環境の場に移動するスペースラブ計画<sup>1)</sup>にも成功した。そして、1984年1月レーガン大統領がNASAの宇宙ステーション計画を発表し、各国へ参加を要請したのに伴い、米国、日本、欧州、カナダ各国が協力の下で、高度460kmの地球周回軌道上に科学観測、宇宙通信、無重力下での材料・医薬品の製造等を目的とした有人の実験施設である宇宙ステーションの建設が1996年に予定されている<sup>2)</sup>。この

宇宙ステーションにおいて、触媒はライフサポート(生命維持)システムの中の呼吸用酸素の供給、有害ガスの除去等で重要な役割を果たしている。そこで本稿では、宇宙ステーションにおけるガス循環システムに関し概説するとともに、新分野に挑戦する触媒利用の可能性を探ってみることとする。

## 2. 有人の宇宙実験室計画

### 2.1 宇宙ステーションの概要

恒久的有人宇宙ステーションは非常に幅広い分野の科学研究や商業的用途を展開し、宇宙居住期間は10年程度を目標としている。しかし当初は、スペースシャトルによって数ヶ月ごとに交代する数人の乗組員が常時滞在し、ステーション内部には乗組員用の居住空間と実験スペースを有し、各種実験装置、データ処理装置、姿勢制御装置および電力設備を整えた規模のものを計画中である。わが国では宇宙開発事業団(NASDA)を中心に独自の実験モジュール(Japanese Experimental Module, 略称JEM)を計画中であり、1994年を目標にJEMを米国の宇宙ステーションに取り付ける予定である。JEMはFig. 1に示すように与圧部(材料・ライフサイエンスの実験室)、暴露部(遠隔操作による科学観測、通信実験室)および補給部(材料、食料、消耗品の貯蔵、運搬室)からなる。JEMのスケールをTable 1に示したが、目安としては与圧部が40-50人乗りのバス程度の大きさであると考ええると身近なものとなる。

### 2.2 無重力環境下における宇宙実験の展開

無重力下では、比重の異なるものを混合しても比重差による分離は生じない。この現象は流体において一層顕著となる。また、自重による圧力を受けないため、結晶成長を行わせる際に重力による応力がかからないことや、容器を用いずに溶融することもできるため不純物の混入径路を遮断できるなど完全結晶を作製する上で非常に好都合である。一方、比重差が微小な成分からなる混合溶液から成分を巧みに分離することも考えられている。応用例としては細胞やたんぱく質酵素の分離、雄と雌の精子の分離などが挙げられる。この他にも無重力下における材料実験に関しては多数提案されているが、紙面の都合上、総説<sup>3-5)</sup>を参考にさせていただきたい。

## 3. 宇宙空間での生命維持システム

### 3.1 CELSSとは

実験室をスペースシャトルに搭載し短期間(SL-1では10日)の宇宙実験を行うスペースラブから宇宙ステーションへの展開を図るには、多数の人間が長期の宇宙活動に従事し、月面基地建設や有人火星飛行計画への橋渡

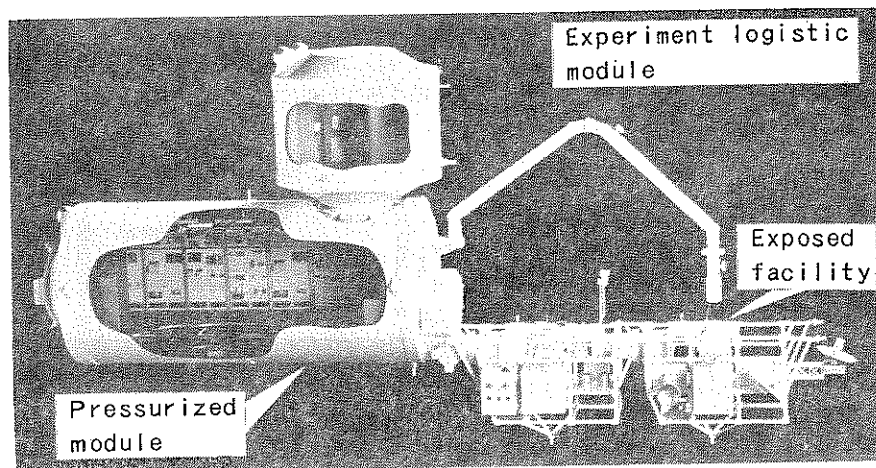


Fig. 1 Japanese experimental module (JEM).

Table 1 JEM primary characteristics.

|                                | Pressurized module | Experimental logistics module |                  | Exposed facility        |
|--------------------------------|--------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------|
|                                |                    | Pressurized section           | Exposed section  |                         |
| Structure type                 | Cylinder           | Cylinder                      | Cylinder         | Box×2 unit              |
| Diameter                       | 4m                 | 4m                            | 4m               | 2m (L), 1.4m (W)        |
| Length                         | 10m                | 4m                            | 1.5m             | 4m×2 unit               |
| Dry weight                     | 11.7 t             | 3.5 t                         | 0.8 t            | each<br>1.3, 1.9 t/unit |
| Payload installation volume    | 17 m <sup>3</sup>  | 14 m <sup>3</sup>             | 9 m <sup>3</sup> | 15 m <sup>3</sup>       |
| Mission/payload storage volume | 7 m <sup>3</sup>   |                               |                  |                         |
| Average power                  | Housekeeping 6 kW  |                               | Mission 9 kW     |                         |

しをするシステムが必要となる。そこで考案されたのが閉鎖生態系生命維持システム (Controlled Ecological Life Support System, 略称 CELSS)<sup>6)</sup> であり、①少ない物資での長期間にわたるライフサイエンス実験のサポート、②実験に必要な物資の貯蔵場所の極小化、③運送コストの低減化、を実現することが不可欠な要素となっている。

### 3.2 地上の生活環境システムと異なる点

宇宙という閉鎖系で生物が長期間生息するには地上の生活環境では問題にならない点で多くの課題をかかえている。まず第一に、呼吸のための酸素は確保されるか、食糧生産をどうするか、排出物をどう分解処理するかといった生活環境の課題がすぐ想像されるであろう。また、生産・処理装置に場所を取らないことも大事な要素である。短期間の宇宙飛行ならばガスボンベを持ち込むことも、廃棄物を持ち帰ることも可能であるが、長期的居住を前提とした場合は、費用や絶対量の面から見ても

物質のリサイクルが不可欠である。そこで、環境制御、食料・水供給、廃棄物処理の各システムを総括して生命維持に影響を与えるすべての物質に対しての収支の詳細な検討が必要となる。

### 3.3 閉鎖系におけるシステム思考の重要性

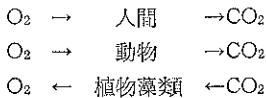
閉鎖系での生命維持システムの基本的な構成は、生物としての人間、動物、植物、魚類と、物質であるガス、水、廃棄物から成る。そこで、循環物質としてガス、水、処理物質として廃棄物を想定し、それぞれの生物種に適した環境設定に基づき生理代謝量のマスバランスをとり全体の最適化を図るシステム思考の導入により、閉鎖系での環境と物質循環の制御が可能となることは容易に想像できることと思う。ここで、スペースラブでの制御システムは温度 295 K、湿度 50% という乗組員にとって快適な環境を保つ目的の他にも、スペースラブ内の実験装置や電子装置を一定温度に保持するための重要な役割も演じていた。特にオービターに発生した余剰熱を

運ぶ冷却媒体としては空気、水およびフロンが使用されており、この熱は放熱板から宇宙へ放出されるが、フロンは人体への有害性を考慮しモジュール内では使用されていない。このように、閉鎖系でのガスや水の循環系の制御方式は一つの要因が加わることにより一層の複雑化を呈するため、トータルシステムとしての柔軟な思考が常に要求される。

#### 4. CELSS における触媒利用技術

##### 4.1 ガス再生循環システムの構成

循環ガスの対象としては、人間・動物・魚類の呼吸から排出される  $\text{CO}_2$  と植物・藻類の光合成で生じる  $\text{O}_2$  が主流となる。生態系を基本としたガスの流れは



であり、ガス再生循環システムの役目としては、これらのガスの分離・濃縮・貯蔵および必要量の供給である。動物系と植物系の排出ガスは独立処理を原則としている。これは、動物系が臭気、有害ガス、 $\text{CO}_2$  の除去を目的とするのに対し、植物系では有害成分と余剰酸素の除去を目的とするためである。水循環系とガス循環系とは除湿器で発生する凝縮水輸送パイプが唯一のインターフェイスとなる。スペースラブの場合は、空気中の  $\text{CO}_2$  濃度の調節や臭気、微量な汚染物を除去するために水素化リチウムが少量の活性炭とともに使用された。しかし、CELSS では、 $\text{CO}_2$  のみを除去する分離器、性質の異なる有害成分除去フィルタ、余剰酸素のみを除去する分離器、除湿器および  $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$  を貯蔵するタンクから

なるものが考案されている。

##### 4.2 $\text{CO}_2$ および $\text{O}_2$ の回収

$\text{CO}_2$  および  $\text{O}_2$  の分離・濃縮法として現在研究の対象となっている例を Table 2 に、これらの仕様をもとに設計したガス循環器を Fig. 2 に示した。 $\text{CO}_2$  のガス分離に際しては、膜は選択性が不十分であり、モレキュラーシーブによる吸脱着は空気中の除湿にかなりの電力が必要であることから、多孔性の高分子ビーズにアミンを含浸固定した固体アミン法が採用されている。また、 $\text{O}_2$  の吸着にはサルミコン法が用いられている。固体アミン法とサルミコン法では吸着特性が類似しているので両者の合体により全体のシステム構成の単純化が可能である。温度スイング方式による吸脱着のための加熱冷却には水を利用し、水の通路とアミン、サルミコンの保持部は直交した積層系をなし、各層の中は熱伝導率を高めるためにプレートフィン構造を採用している。

##### 4.3 触媒を用いた $\text{CO}_2$ 変成反応

$\text{CO}_2$  から  $\text{O}_2$  を得る方法としては、物理化学的手法と生物学的手法がある。後者はガス交換と同時に食糧の生産が可能であるが、生物に必要なガス交換量を植物だけで補うには現状では無理があること、変成速度が遅いため短時間で所定量の  $\text{O}_2$  を必要とする緊急時に対応しきれない点などを考慮し、従来化学工業において広く用いられている前者の異相系接触触媒反応が大きな役割を演じている。触媒反応法では、濃縮後の  $\text{CO}_2$  を Table 3 に示す Bosch 法または Sabatier 法を用いて分解し、生成した水を電気分解で  $\text{H}_2$  と  $\text{O}_2$  に変換する方法が検討されている<sup>7)</sup>。両法の最終的な反応式は

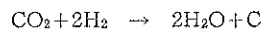
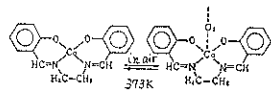


Table 2 Gas separation and enrichment systems.

|                                  | $\text{CO}_2$                                                                                                                             | $\text{O}_2$                                                                         |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Source                           | Human being<br>Primate<br>Animal viarium<br>Fish breeding equipment                                                                       | Plantation facility<br>Algae cultivator                                              |
| Adsorption capacity              | 3-6 wt%                                                                                                                                   | 2-3 wt%                                                                              |
| Adsorbent                        | Amin supported on polymer beads                                                                                                           | Bis (salicylaldehyde) ethylenediiminocobalt (II)                                     |
| Mechanism                        | $\text{RR}'\text{NH} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \xrightleftharpoons[373\text{K}]{\text{in air}} \text{RR}'\text{NH}_2\text{CO}_3$ |  |
| Quantity of treatment            | 1 kg/day                                                                                                                                  | 0.9 kg/day                                                                           |
| Adsorption and desorption system | Temperature swing (290-373K)                                                                                                              |                                                                                      |
| Equipment size                   | 0.45m × 0.7m × 1.5m                                                                                                                       |                                                                                      |

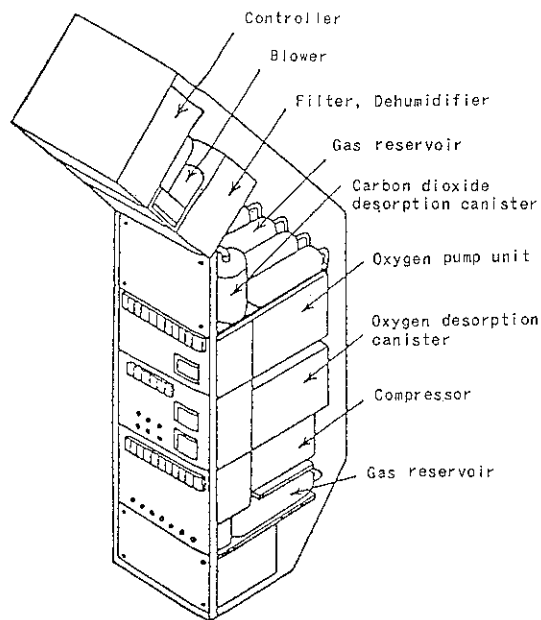


Fig. 2 Gas circulator.

であるが、この反応は1段では進行が遅いため、2段に分けることにより速度論や消費エネルギーの面で有利となる。すなわち、Bosch 法では第1段で  $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}$ 、第2段で  $\text{CO} \rightarrow \text{C}$  の反応を行うのに対し、Sabatier 法では第1段で  $\text{CH}_4$  生成、第2段で  $\text{CH}_4$  の分解を行うのが特徴である。

宇宙空間という場での Bosch 法と Sabatier 法とを比較検討する際には、①総括の  $\text{CO}_2$  転化率がワンパスで理想値である 100% に限りなく近い、②船内での  $\text{H}_2$  欠

損が生じない、③反応時の発熱の有効利用が図れる、④エネルギー効率が良い、⑤系内に危険ガスが充満しない、などの考慮が必要である。特に②、⑤は閉鎖系内での反応として認識を新たにせねばならぬ課題である。これらの諸点を総合的に評価すると、結論として Sabatier 法の方が宇宙ステーションへの適用性に優れていると言える。Sabatier 法での地上実験のワンパスの総括転化率は、第1段に  $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$  触媒、第2段に石英ウールを使用すると 95% 以上を得ており、今後は触媒の信頼性、耐久性をさらに増すことが課題とされている。

#### 4.4 触媒による有害ガスの処理

触媒は変成反応の他にも宇宙ステーション建設に使用される材料・部品、内装材や浄化装置などから揮散する炭化水素、アルコール類、ケトン類、アンモニア、ハロゲン化合物などの有害ガスの処理装置にも応用されている。触媒としては  $\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3$  を使用し、接触酸化法における速度論的因子や寿命に関するデータが蓄積されている。

#### 5. トータルシステムとしての CELSS

水の生態系に対する物質収支を用途別にみると、人間や動物に対するインプットは飲料水が主であり、アウトプットは呼吸、発汗による水分、尿や生活排水（シャワー、洗面）が挙げられる。水循環系は、機能の異なる数種の膜式フィルタ、蒸留器、除臭フィルタ、タンク類の4つの構成要素からなり、高分子機能膜を用いた3段階の処理方式（粗粒子フィルタ、限外フィルタ、逆浸透フィルタ）が考案されている。尿や生活排水を飲料水にリサイクルする方法としては、装置容積を極小化（0.45 m

Table 3 Comparison of  $\text{CO}_2$  transformation processes.

|                  | Mechanism                                                                                                                                                                                                                                     | Catalyst                          | Reaction temperature |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| Bosch process    | (I) $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$                                                                                                                                                                     | Steel wire                        | 1173K                |
|                  | (II) $\text{CO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{C} + \text{H}_2\text{O}$                                                                                                                                                                       | Steel wire                        | 903K                 |
| Sabatier process | $\begin{array}{c} \text{(I) } \text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \\ \text{(II) } \text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2 \\ \text{2H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2 \end{array}$ | $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$ | 598K                 |
|                  |                                                                                                                                                                                                                                               | Ni wire                           | 1173K                |
|                  |                                                                                                                                                                                                                                               | $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ | 1173K                |
|                  |                                                                                                                                                                                                                                               | Silica wool                       | 1373K                |

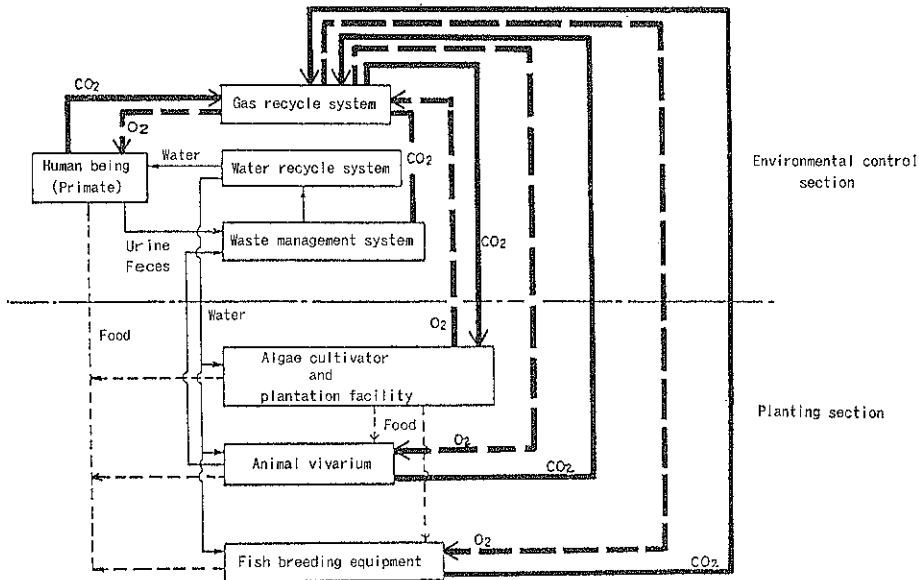


Fig. 3 Controlled ecological life support system (CELSS).

×0.7 m×1.5 m) できるメリットから蒸留器を組み込んだ蒸気圧縮型蒸留器の開発が進められている。

一方、排出物の分解は産業廃棄物処理で使用されている湿式酸化法が有望である。湿式酸化法は食べ残し、大便などの廃棄物をミキサーで粉砕した後、3 MPa, 573 K, O<sub>2</sub> 存在下で燃焼し、処理廃液 (K, P, NH<sub>3</sub> を含む) を植物肥料に転化する方法である。

この他に、栽培面積当りの光合成の能力が非常にすぐれている藻類培養の重要性が叫ばれており、スピルリナがクロレラより優れているとされている。将来的には食糧を化学合成する手法が望ましいが、現状試算ではプラントの設備が膨大で到底実現不可能であることから、簡単に大量生産が可能であり、より光合成の能力の高い高等植物の栽培、宇宙実験用ファイトロンの開発なども検討されている。

これらをまとめると、Fig. 3 に示す CELSS の骨格が出来上がる。図中太く示した直線は CO<sub>2</sub> の、点線は O<sub>2</sub> の流れを表す。

## 6. おわりに

実験ステーションの乗組員は5年毎をめぐりに増員が予定されている。100 人余が長期間生活するためには、システムの見直しを今後も迫られるであろう。しかし、現

段階では最も基礎的である生物の物質代謝のデータの蓄積、動植物の CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> の吸気量や放出量の緻密な計測、データに基づいた生物システムの同定など、足下を早急に固めていかねばならない。100 人が1年間生活するためには物質 1100 t が必要であり、仮にこれを毎回の輸送可能重量である 15 t ずつ運搬したとすれば、1飛行の費用が200 億円であることから、年間1兆5000 億円の費用と膨大な貯蔵庫が必要となる。夢が希望の灯となっている現状を夢で終わらせないためにも、閉鎖系システムにおける触媒や吸着剤の性能向上が今後さらに大きな役割を果たすと考えられる。

## 文 献

- 1) D. J. Shapland and M. J. Rycroft: "Spacelab" 毛利 衛, 魚崎浩平訳 (旺文社, 1986).
- 2) 第7回宇宙ステーション利用計画ワークショップ 予稿集 (1988).
- 3) 高橋仙之助: 日本機械学会誌 82, 456 (1979).
- 4) 澤岡 昭: 固体物理 19, 491 (1984).
- 5) 西永 頌: 応用物理 55, 365 (1985).
- 6) 宇宙ステーションワーキンググループ: 航空宇宙研究所資料, TM-550 (1985); TM-572 (1987).
- 7) 英 修: 化学プラント技術会議要旨集, session 6 (1987).