

ゴミを水に変える

宇宙での自給自足環境構築のために

小 口 美津夫

地球から 350 km 離れた軌道を周回する国際宇宙ステーション (ISS:International Space Station) では、6 人の宇宙飛行士が様々な実験や観測、研究を行っているが、宇宙飛行士の生存に必要な食料、水、酸素は地球から定期的に補給している。しかし、今世紀中に計画されている火星の有人探査では、地球からの補給は時間がかかりすぎるため、生物を使った食料生産と物理化学的な方法による空気や水の再生、廃棄物の処理を行う環境制御を組み合わせた自給自足型となる。特に、水は宇宙でも不可欠な物質の一つで、かつ大量に必要なため、生活から発生する尿や廃水、有機廃棄物 (ゴミ) から飲料水を作る。この技術は宇宙だけではなく、地球環境問題で切迫している水資源の確保や環境汚染のないゴミ処理にも活用できる。

キーワード：有人宇宙活動、閉鎖生態系、環境問題、廃棄物処理、水再生、湿式酸化、逆浸透膜

1. はじめに

人類は、探求心と欲望に満ちた生物である。「地球は青かった」という言葉で、我々に強烈な衝撃を与えたユーリー・ガガーリンが、1961年4月12日に人類で初めて宇宙へ出て以来、これまでに500人以上の人間が宇宙に行っている。その中には、人類初の月面着陸の成功 (1969年7月12日) や438日間という連続宇宙長期滞在記録を樹立した人 (旧ソ連時代から通算すると678日16時間の宇宙滞在実績) もいる。そして、米国を中心として、日本、ヨーロッパ、カナダ、ロシア等15ヶ国の国際協力によって、ISS (写真-1) の建設が1998年11月から始まり、日本の実験棟「きぼう (JEM: Japanese Experiment Module)」も2009年7月19日午前11時23分 (日本時間) に取り付けが完了し、現在、JAXA (宇宙航空研究開発機構) の

古川宇宙飛行士が約5ヶ月半の長期滞在をしている。ISSは、2011年5月16日 (米国中部夏時間) に打ち上げられた米国のスペースシャトル「エンデバー」のミッションで完成した。

そして、30年間続いたスペースシャトルは、2011年7月8日 (米国中部夏時間) に打ち上げられた「アトランティス」で引退したが、米国は民間企業による有人宇宙船の開発を進めており、民間人の宇宙観光旅行や、今世紀中には火星への有人飛行等も計画されており、人類が宇宙で自由に生活する時代を迎える。

しかし、酸素も水も食べる物もない宇宙で、人間はどのようにして生きていくのか。

2. 宇宙での生活を支える自給自足型の環境

人間が宇宙で生活するためには、食料、水、酸素を始めとするいろいろな物資が必要である。NASA (米国航空宇宙局) では、宇宙での人間の必要エネルギーを一日3,000 kcalと考えており、そのために必要な食料、飲料水、酸素の量は、それぞれ618 g, 3,077 g, 836 gとしている。これにシャワーや洗濯などの生活用水を加えると、一日に最低約30 kgの物資が必要となり、一年間の滞在では約11トンにもなる。その他、衣類や日用品類も必要である。

現在の有人宇宙活動では、これらの必要物資はすべて地球から持って行き、滞在が長い場合には、定期的に地球より補給している。その輸送コストは400～

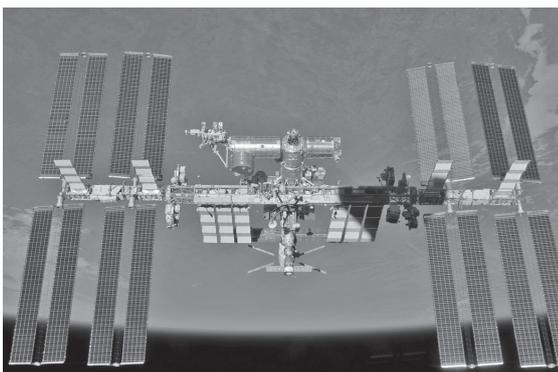


写真-1 2011年5月30日現在のISS (提供: NASA)

700億円もかかり、滞在期間が長くなったり、人数が多くなるにつれてその費用は膨らむ。また、人間が生活すれば必ず廃棄物が出るが、宇宙に捨てることはできず、その処理も問題となる。

そこで、これらの問題を解決するために、「閉鎖生態系生命維持技術 (CELSS: Closed Ecological Life Support Systems: セルス)」と呼ばれる技術開発が進められている。セルスは、人間が生活することによって発生する炭酸ガス、廃水、排泄物、残飯 (生ゴミ) などの廃棄物から、酸素や水、食料などを作り、地球からの物資を補給しない自給自足型の生活環境、すなわち人工的な地球を作る技術である。

3. 人工的な地球づくりへの挑戦

我々が生きている地球は、「バイオスフェア (生物圏-1)」とも呼ばれている。人間の生活できる環境を人工的に作ろうとすると、まず頭に浮かぶのが地球である。宇宙は空気のない真空の世界のため、空気を溜めたり、有害な宇宙線を防御することのできる閉鎖環境を作る必要がある。地球も大気という空気の壁に囲まれた閉鎖環境で、この中では人間や動物が吐き出す炭酸ガスは、植物の光合成によって酸素に変換され、再び呼吸に利用されている。川や海から蒸発した水は、雨として大地にしみ込み、岩や砂によって浄化され、ミネラルを含んだ水として飲み水や植物の生育に利用されている。また、有機廃棄物は微生物によって分解されて植物の肥料となっている。この植物を人間や動物が食べ、さらに、動物も食料となって人間は生きている。

人工的な生態系を作るためには、その生態系の中で

の物質循環がどのように行われるかを一つ一つ調べる必要があり、米国で行われた Biosphere-2 (バイオスフェア-2) の実験概要を紹介する。

「Biosphere-2」は、アリゾナ州ツーソンの砂漠の中に民間企業の資金で建設された大型の閉鎖実験施設で、1991年9月26日から1993年9月26日まで、男女8人による2年間の居住実験が実施された。「Biosphere-2」は総面積が約13,000m²で、その中は居住区域、農業区域、自然区域に分かれている。さらに、自然の環境区域は、熱帯の気候の下で、熱帯雨林、サバンナ、湿地帯、海、砂漠の5つの生物圏から構成されている (写真-2)。

「Biosphere-2」での実験の目的は、人口増加や環境の悪化が地球生態系へどのような影響を与えるのかを解明することと、宇宙で人類が生活するために必要なデータを取ることであった。しかし、8人の人間と約4,000種の生物、150種の農作物で構成される「Biosphere-2」の生態系容積の比率は、地球生態系と比べると非常に小さいため、地球の大気や海洋に相当するバッファに余裕はない。そのため、「Biosphere-2」内を循環する大気成分のアンバランスや、廃棄物の浄化やリサイクルの速度の違いによって、微生物を含めた動物や植物の種に変化が生じた時に、内部の生態系がどの様に対応できるかが問題となった。

一例として「Biosphere-2」内部の酸素および炭酸ガス濃度の変化を紹介すると、実験開始時の炭酸ガス濃度は、2030年頃の予測値とされている660ppmを設定したが、1991年はエルニーニョの影響による日射状態の悪化から植物の生育が悪くなり、光合成機能の低下を招き、閉鎖開始後3ヶ月程で2,000～

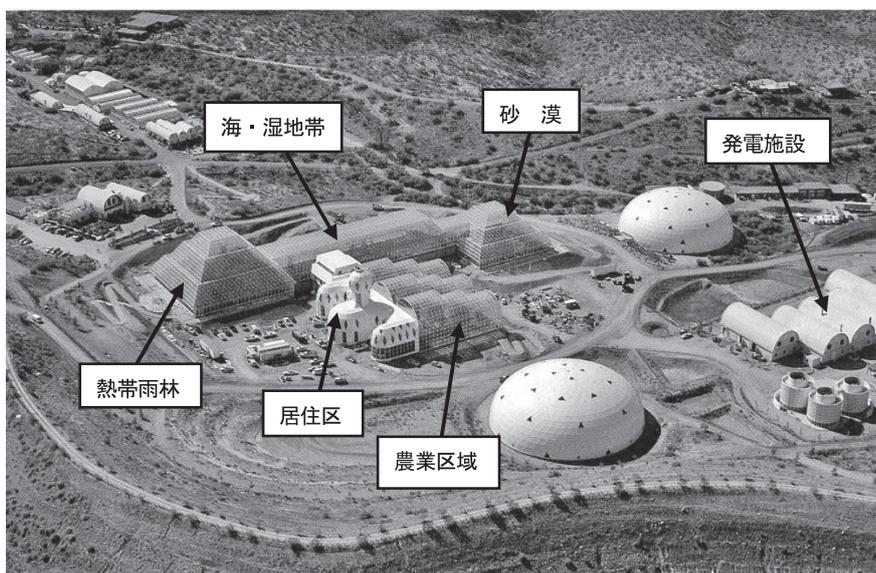


写真-2 Biosphere-2の全景 (提供: Space Biosphere Ventures)

3,000 ppm になり、内部の空気を入れ換えた。さらに酸素も次第に減り、1993年1月には内部の酸素濃度が14%以下になり、外部から酸素補給を行い、実質的な閉鎖実験はこの時点で終わった。

「Biosphere-2」での実験は、炭酸ガスの増加と食料や酸素の不足が生じ、長期の閉鎖実験には失敗したが、その原因の一つとして「生物系のみ依存したため」ということが明確になっただけでも、実験は成功したと評価できる。

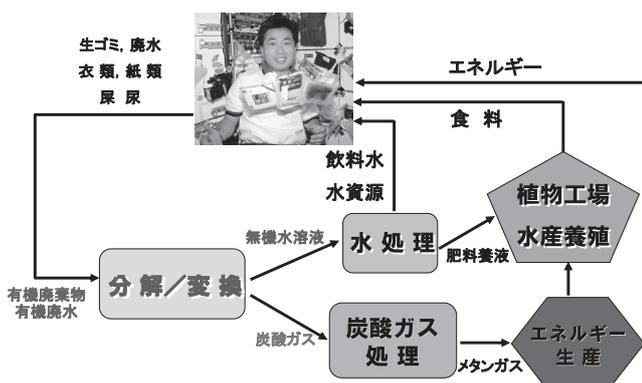
このように、「Biosphere-2」のようなバッファの小さな閉鎖系では、環境の変化によって人間や動植物はダメージを受け易いので、大幅な環境の変動にすぐに対応の取れる人工的な環境制御システムが必要である。

地球と同じしくみ（生態系）を生物だけで宇宙で作ろうとすると、非常に広い空間と膨大な建設費が必要となり、ほとんど不可能である。この地球では、人間を頂点とする動物の活動は、植物の生産性の上に成り立っており、この地球そのままの精巧なミニチュアを作ったとしても、人間や動物、植物までも同じように小さくできないからだ。さらに、生態系が小さければ小さい程、クッションの余裕がないため、生物は環境の変化を受けやすく、すぐに死んでしまう。

そこで、小さな空間で自給自足の環境を作るためには、生物の力を使って効率よく食料を生産すると同時に、地球の大気や海洋の役目を持つ物理化学的な処理装置を組み合わせる必要がある。

4. JAXA の人工的な地球のしくみ

JAXA で研究開発している人工的な地球は、植物栽培や動物および魚類飼育部分から成る食料生産部分と、空気再生、水再生および廃棄物処理などの環境制御部分から構成される。環境制御部分にはシステムの安定性が要求されるため、物理化学的な処理法を用いる（図—1）。本稿では、廃棄物処理と水再生について紹介する。



図—1 JAXA が目指す人工的な地球のしくみ

(1) ゴミを水に変える廃棄物処理

セルスでの廃棄物処理は、「植物生産のための肥料を作る」という役割を有するため、処理した後に出る二次生成物も再利用できる処理方法が不可欠である。地上における生ゴミ、廃水、し尿などの有機廃棄物の再処理方法は、コンポスト化やメタン発酵法があるが、いずれも微生物を使うため、宇宙では処理時間、処理の安定性、残渣、微生物の突然変異等の問題があり、宇宙では湿式酸化技術という物理化学的手法を使う。

湿式酸化とは、水の中に入れた有機物を高温高压の空気（酸素）の下で酸化し、無機物に変えるものである。分解は100℃から水の臨界温度374℃の間で行われ、通常の燃焼と比較するとかなり低い温度である。また、水の気化を防ぐために、分解は密閉式の圧力容器の中で行う。

湿式酸化法は、

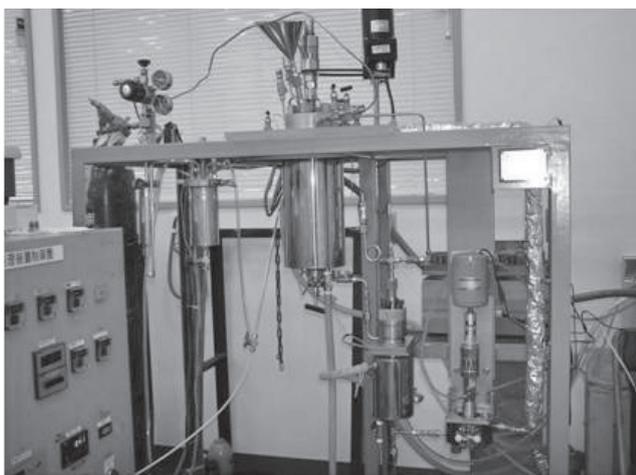
- ①酸化反応のため、有機物から炭酸ガスを得ることができる。この時、 NO_x や SO_x 等が生成しないので、炭酸ガスは植物や藻類の光合成に利用できる他、水素還元によりメタンガスと水が得られる。
 - ②生物処理に比べて分解時間が短く、しかも安定しているため装置を小型化できる。
 - ③固形の廃棄物や水分を大量に含む廃棄物にも対応できる。
 - ④高温で処理が行われるため、反応生成物にバクテリアやウイルスなどが含まれないので、細菌汚染の問題がない。
- という利点を有する。

湿式酸化法は、1930年代に米国でパルプ廃液処理として開発された技術であるが、分解生成物にアンモニアや酢酸などが残り、有機物の分解効率も50%程度であり普及はしていない。

分解生成物にアンモニアや酢酸が残ると植物の肥料としては使えないため、分解を促進する触媒を使うバッチ式の分解装置を開発し、その効果を検証した（写真—3）。

有機廃棄物としてウサギの糞を用いた実験結果を表—1に、また分解サンプルを写真—4に示す。分解条件は、温度は280℃、圧力は9 MPa、一次分解時間は30分、触媒分解時間は30分である。表—1からアンモニアは硝酸イオンに、また、酢酸は炭酸ガスに分解され、有機物濃度も99%以上分解されており、触媒の効果が見える。

触媒を用いた有機廃棄物分解技術の確立に伴い、より実用的な連続処理装置を開発した。本装置の基本フローは、食品残渣や排泄物などの固形有機廃棄物を装置の配管を通る大きさに粉碎・微細化し、尿や廃水な



写真—3 バッチ式有機物分解処理装置



写真—4 ウサギの糞の分解サンプル
(左から原料, 一次分解液, 触媒, 最終分解液)

表—1 改良技術による分解結果

分析成分項目	原料	一次分解	触媒分解
有機物濃度(ppm)	14,400	865	2
有機炭素量(ppm)		435	5
窒素成分(ppm)	340	150	<0.1
アンモニア(ppm)		136	<0.1
カリウム(ppm)		106	90
硝酸イオン(ppm)		8	100
亜硝酸イオン(ppm)		0.3	0.01
酢酸(ppm)		824	検出せず
蟻酸(ppm)		8	検出せず
pH		7.4	7.7
窒素ガス(%)		6.31	6.44
炭酸ガス(%)		28.58	46.79
酸素(%)		65.06	46.68

どの水分と混合してスラリー状態にし、高圧ポンプで連続的に密閉型分解炉に圧送する。続いて空気(酸素)を添加しながら、温度「250～300℃」、圧力「6.86～8.83 MPa」の条件下で無機栄養塩類を含む水溶液と炭酸ガスに完全分解する。

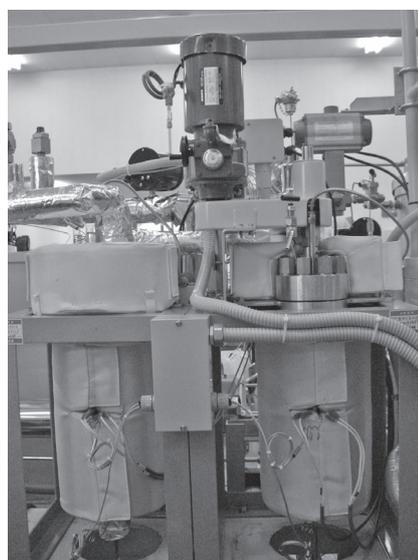
連続処理装置の特徴は、

①水分を含む有機廃棄物を脱水や乾燥などの前処理を

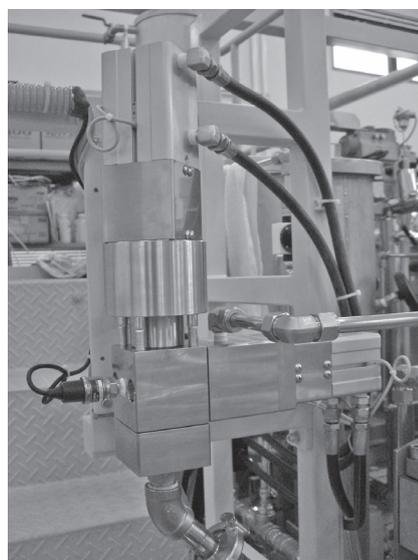
せずにそのまま投入できる。

- ②高濃度有機廃棄物 (COD (Cr) 値で 30 万 ppm 以上) の分解ができる。
- ③ 30 分から 1 時間程度の短時間処理ができる。となっている。

開発した連続処理装置は内容積が各々 1 リットルの分解炉と触媒炉 (写真—5)、高圧スラリーポンプ (写真—6)、熱交換器、制御盤等から構成され、一日 100kg の処理能力を持っている。また、これまで触媒はチタニアベースのルテニウム触媒を使用していたが、触媒重量の軽減と長寿命化を狙い、繊維触媒を開発した。触媒の重量比は、従来のチタニアと比べて約 1/40、触媒金属 (ルテニウム) の担持量比は 1/440 で少ないが、分解率は約 90% を達成した。連続処理装置で処理した焼酎廃液の結果を写真—7 に示す。



写真—5 触媒炉 (左) と分解炉 (右)



写真—6 高圧スラリーポンプ



写真一七 焼酎廃液の分解例

(2) ゴミ処理生成水から飲料水を作る

地球からISSへ運搬する水のコストは、500 mLのペットボトル1本分が約100万円である。なぜ高いのか。NASAの資料¹⁾によると、宇宙飛行士が一日当たり摂取する食料(乾燥状態)と酸素の重量は、それぞれ1.77 kgと0.84 kgで地上でも宇宙でも同じ量である。しかし、飲料水は地上では10 kgであるが、宇宙では1.62 kgと極端に少ない。その理由は、食料は乾燥させることで軽くでき、酸素は液化することで気体の1千倍の量を運ぶことができるが、水はそのままの状態のため重量的に不利で結果的に使用量が制限されている。

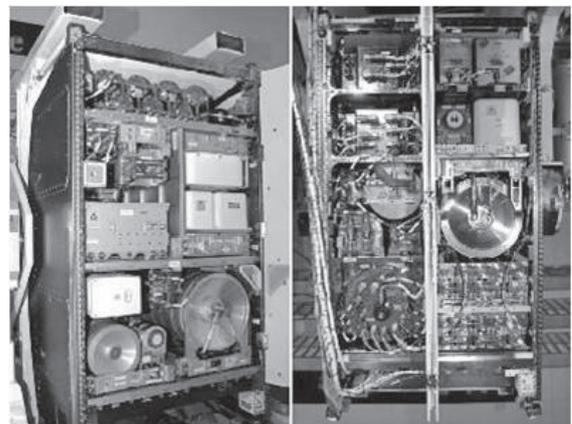
ISSへの飲料水の補給手段は、ロシアのプログレス補給船、NASAのスペースシャトルの燃料電池生成水、日本のHTV(こうのとりのり)、ESA(欧州宇宙機関)のATVがあるが、ロシアの水は有機物濃度が20 mg/Lと高く(日本の水道水基準は3 mg/L)、またシャトルの水は純水のため、健康を考えると長期飲用には不向きである。さらにスペースシャトルは2011年7月で引退したため、シャトルでの補給はなくなった。2011年1月に打ち上げたHTV-2号機では種子島宇宙センターの水道水を80 kg運んだが、この水もNASAの水質基準を満たすため、純水製造装置で精製した純水を運んだ。実際に宇宙で純水を飲んだ宇宙飛行士は、「毎日、純水を飲むのは大変。純水はまずいので、コーヒー、お茶、ジュースなどの香り付けをして飲む。ふんだんに水が使えれば、宇宙での生活がより快適になる」と言う。

地球からの水の補給量を減らすために、ISSにはロシアとNASAの水再生装置が設置されている。宇宙飛行士がISSで一日に使う水の量は一人3.5リットルで、その内の1.5リットルがロシアの装置で、また、1.3リットルがNASAの装置で再生することになっており、地球からの補給量はかなり減少したように思えるが、実際は、2~3ヶ月毎に打ち上げられるロシアの

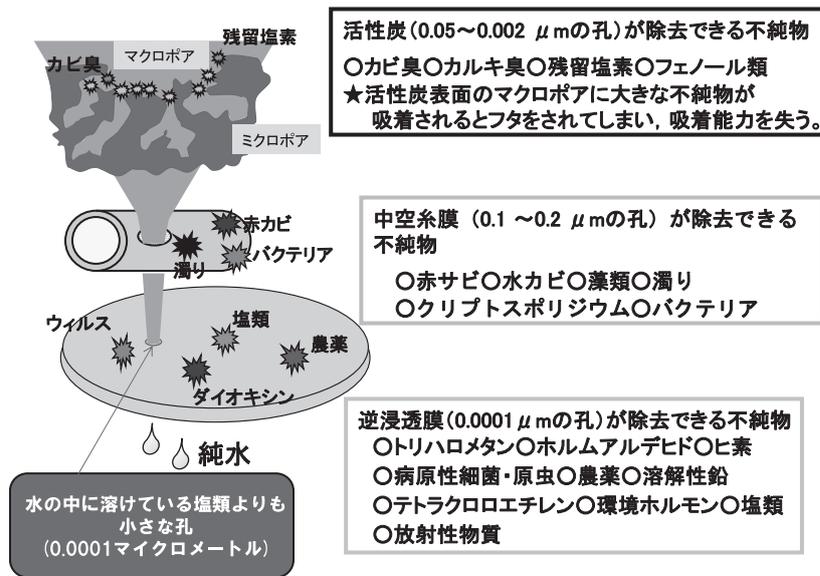
プログレス補給船で飲料水は400~500 kgも運搬されている。

ロシアの装置は、異物除去フィルター、エチレングリコール酸化物除去リアクター、活性炭、イオン交換樹脂から構成され、宇宙船内の空調凝縮水を再生して、酸素製造装置用の電解水として利用している。NASAは、2008年11月に尿や生活廃水(空調凝縮水)を再生する水再生システム(WRS: Water Recovery System)を打ち上げた(写真一八)。尿の再生は回転式蒸気圧縮法と呼ばれる技術を使い、二重式ドラムの内側ドラムを回転させ、その内側に尿の薄い膜を作り、減圧して低温で尿中の水分を蒸発させる。ISS内は微小重力のため、そのままでは気体と液体は分離しないので、ドラムの回転で生じる遠心力を利用して、気化した水蒸気をドラムの中心部に集める。そこには水蒸気を吸い込むファンがあり、その水蒸気を外側のドラムで冷却して凝縮水(蒸留水)を作ると言う原理である。この蒸留水は生活廃水と混合され、粗粒子フィルターを通り、触媒で有機物を分解して膜処理したあと、飲料水や実験水、酸素製造装置の電解水として使用する。しかし、このWRSは尿中のアンモニア成分の混入、カルシウム析出による配管の目詰まり等のトラブルが多い。また水質管理はヨードで殺菌しているが、ヨードの過剰摂取は甲状腺障害や内臓器官の免疫力の低下を引き起こす恐れもある。

一方、JAXAの開発している水再生システムは、ISSのような地球周回軌道での利用では、尿や生活廃水を再利用するために、尿中のアンモニアや有機物を化学的に分解したあと、逆浸透膜(RO膜: Reverse Osmosis membrane)で浄化するコンパクトなシステムと、将来の月面や火星基地などで利用するために、し尿、生ゴミ、高濃度廃水等を分解処理する有機廃棄物処理装置とRO膜を組み合わせたシステムの2種類がある。



写真一八 NASAの水再生装置(写真左が水処理装置で右が尿処理装置)(提供: NASA)



図一 2 逆浸透膜の不純物除去性能

RO膜は海水淡水化で利用されているが、従来のRO膜は不純物を分離するための圧力が5~7MPaと高圧のため、圧力ポンプが大型で消費電力も多く、宇宙利用には不向きであった。しかし近年、RO膜にかかる操作圧力が0.4~0.6MPaの超低圧RO膜が開発され、宇宙での利用に目処が立った。RO膜は0.1ナノメートル(1ナノメートル=100万分の1ミリメートル)という細孔を持つため、ほとんどの不純物の除去ができる(図一2)。しかし、RO膜からの浄化水にはミネラル分がほとんど含まれていないため、天然の鉱物を用いた特殊フィルターでミネラル添加を行い、宇宙でも美味しい水を飲むことができる。

5. おわりに

環境省廃棄物処理技術情報によると、平成21年度のごみ(一般廃棄物)の総排出量は年間約4,625万トン、1人一日当たりの排出量は994gと13年度以降継続的に減少している。処理方法は直接焼却が79.1%、資源化等の中間処理が14.1%、最終処分が1.7%となっており、リサイクル率は20.5%で、古紙、ビン、缶のリサイクル率(50~90%)と比べると低い。

生ゴミなどの有機廃棄物の再利用方法に微生物分解によるコンポスト化があるが、分解時間が長く、有機物の種類、余剰汚泥や廃液処理の問題、微生物の管理・維持に問題が指摘されている。コンポストは肥料として利用されるが、塩分や重金属が混入した場合は利用できない。

また、地球は水の惑星とも言われているが、その97.5%は海水で、飲料や農業に使用できる淡水はわず

か0.007%である。2001年2月に発表された「気候変動に関する政府間パネルの報告」では、地球温暖化による海面の上昇は、海水による冠水や地下水の塩水化をもたらし、約50億人分の水が不足すると共に、農業にも大打撃を与えるものと予測されており、水資源確保のための技術確立が急務となっている。

宇宙でのゴミ処理システムは、我々の生活や産業界から発生する生ゴミ、し尿、有機性産業廃棄物や有機廃水など、すべての有機性廃棄物について、その形状に依存せずに処理し、最終的には、食料、水、エネルギーなど我々の生活に欠かせないものを造り出す。このシステムでは、すべての処理を閉ざされた系の中で行うため、外部に有害なものは一切出ない。また、処理に生物を使っていないため、100%近い分解が無公害的に短時間でできるため、他の処理方法より極めて優位性があり、ゴミが水資源とエネルギー資源になる循環型社会の形成に役立つ。

J|C|M|A

《参考文献》

- 1) http://www.nasa.gov/audience/foreducators/9-12/features/FRecycling_on_the_ISS.html
 Closing the Loop: Recycling Water and Air in Space

【筆者紹介】

小口 美津夫 (おぐち みつお)
 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
 研究開発本部 未踏技術研究センター
 特任担当役

