CELSS 計画における水再生循環システム*

大 坪 孔 治

1. はじめに

宇宙に初めて人類が進出して早くも30年以上が経過した。これまでは選り勝った特別のごく少数の人々のみが比較的短期間の宇宙飛行をしていたが、これからは多人数で長期滞在する第2期宇宙開発時代が始まろうとしている。現在、国際協力のもとで建設が進められている国際宇宙ステーションは最終的には8人が常駐し、ステーションの耐用年数も30年を目標とすることになっており、当初計画よりはかなり遅れているが今世紀末には運用が開始されることになっている。このように常時、宇宙に滞在する人間が増え、かつ長期間になるとすると生命維持のために消費される物資の量は多量となり、これまでのようにこれをすべて地上より補給するとなると、その輸送コストは莫大な額となる。例えば、現在の試算では人間一人当たり、1日に使用される物資の量は食糧、水を含めて最低30kg必要と考えられており、これは月に約1トン、年間で12トンとなり、容器重量も考えると15～16トンとなる。現在の米国のスペースシャトルの1フライトの輸送力が、ほぼその程度であり、打ち上げ経費は400億円以上と推測されているので、8人常駐させるためには年間3,200億円以上かかることになり、財政的に運用維持が困難になる。そこで、この輸送コストの節減をはかるため、1度運んだ物資は再生し、繰り返し再利用をはかる技術の研究が日米欧露でそれぞれ進められている。この技術の究極的レベルが閉鎖生態系生命維持システム、CELSS (Closed Ecological Life Support System)¹⁾と呼ばれており、将来の月面基地、有人火星探査、および火星基地建設等は本技術の確立なくして

は実現できない。ここでは、CELSS 中における水の再生循環システムに関して、とくに宇宙ステーションのような無重力環境下でのシステム構成、問題点等について述べる。

2. CELSS における水の循環

地球には大気圏、地圏、水圏の3つの相があり、それぞれに存在する動物、植物、微生物等の生物系と、太陽エネルギーによる大気および海洋大循環等の物質循環システムとがうまく調和して現在の比較的安定な生態系が構成されている。この中で、水は太陽エネルギーによって植物からの蒸散、水圏からの蒸発等の作用で大気圏に放出され、上空で冷却・凝縮され、雨雪となって再び地上に落下し、生物系の生命維持活動に寄与している。これは1つの大きなCELSSであり、我々が進めているこの研究はそのミニ版を宇宙に作ることを目標にしている。

しかし、ここで考えなくてはならない問題は、地球の場合、大気、海洋、陸地のそれぞれが巨大な貯蔵庫の役割を果たすことによって、ある変動が発生した場合、その影響の波及を時間的にも空間的にも調節する能力が備わっているが、人工システムの場合、これらの機能が大きな制約を受けるという点である。現在検討されている宇宙における人類の長期滞在施設は人間の生活する居住区、動物飼育区、植物栽培区および工学システム区等に大別され、それぞれに対し、必要な物資の補給および環境調節が行われるようになって²⁾。この中で、水の循環する概念を示すと図1のようになる。ここで動物系および植物系が生物系に属し、環境制御システムは空気の温湿度、ガス成分濃度、気圧等の制御を、水再生処理システムはもろもろの排水の再生浄化を行う。また排水処理後の濃縮廃液、固形排泄物、植物等の不可食部に含まれる水分は排泄廃棄物処理システムにおいて処理回収される。排水の処理レベルは無駄なエネルギー消費を避けるため、再使用の目的に応じて決められる。排泄廃棄物処理システムとしては高圧酸素雰囲気下で150～300℃で加熱し、固形有機物の分解を行う湿式酸化法³⁾の研究開発が進められている。本方式の特徴は反応条件の選定がうまくいけば、処理後の溶液はそのまま植物の肥料養液とし

Koji Otsubo

昭和37年 東京都立大学理学部卒業
同年 国立航空技術研究所就職
46年 MIT 客員研究員
51年 航空宇宙技術研究所第5研究グループリーダー
53年 同第9研究グループリーダー

〔趣味〕 囲碁、テニス

* Water Recycling System in CELSS, 1991年9月18日受理

図1 CELSS における水循環

て使用できることで、各種微量成分の再循環には有効と考えられている。

水再生循環システムの主要構成要素として、各種高分子機能膜フィルターおよび蒸留器等があるが、これらに関し、その分離能力、寿命、使用エネルギー等について採用の可能性を探るための実験的評価を進めている。

3. 無重力環境下での水再生循環システムの構成

CELSS 技術の利用を考える場合、重力環境下と無重力環境下での使用が考えられる。前者では将来の地下都市や海底都市、都市における大型ビル等が考えられており、また、宇宙においては月面基地や火星基地なども小さいとはいえ重力があるので、これらには地上で実証できる技術を多少改良することで、そのまま利用することができる。しかし、軌道上の宇宙ステーションや惑星有人探査機のような無重力環境下にあるものについては、その特性を考慮したシステム構成をとることが必要である。これまでに検討してきたシステム構成の一例を示すと図2のようになる。

重力環境システムに比べ、無重力環境システムの大きな特徴は人工的な物質分離機能を必要とするという点である。すなわち、地上と異なって、物質の比重差による分離運動が存在しないため、例えば液体を取扱う場合には何らかの形で液中の気泡を積極的に分離してやる事が必要となる。図2中においては原排水中に含まれる気泡除去用の気液分離器のみを示したが、この他にも第1次および第2次処理後にも気泡が混入する事が予想されるため、そこにも気液分離器が必要になると思われるが、宇宙での技術実証実験機会が少ない現時点ではまだはっきりしないので、取りあえず省略してある。

一般に宇宙システムに対する要求条件として常にあ

げられることは小型軽量、省エネルギー型で、かつ、高信頼性ということである。これらの条件を考えた場合、システムはできるだけ単純化したほうが良いということになるので、第1次処理系に入れる原排水はすべてまとめて処理する方法を選んでいる。処理のレベルとして考えた場合、飲料水等には高純度水が必要であるが、植物の肥料養液作製等の用途についてはいわゆる中水レベルでも差しつかえないと考えられている。これらの事をふまえ、処理系は中水レベルを目標とした第1次処理系とさらに高純度処理を目的とした第2次処理系の2段階処理法で構成している。以下、順に各処理系の構成および機能等について説明する。

3.1 第1次処理系

排水の種類としては、シャワー、手洗い水、洗濯水、調理水、トイレ排水、動植物飼育栽培装置からの洗浄排水を含む排液および除湿器によって大気中から回収される蒸気凝縮水がある。この最後の凝縮水は比較的純度は高いが、空気中の有害ガス成分、例えばアンモニアや硫化ガスが溶解している恐れがあるので、やはり処理する必要があるが、高分子有機物等は含まないので、第1次処理系はパスさせている。

この凝縮水を除いた他の排水中には細菌を含む高分子有機物や塩類および無機イオン等が含まれるので、これらの除去に適した高分子機能膜フィルターの使用を考え、現在市販されている各種膜フィルターの特性調査のため、写真1に示すような試験装置を試作し、評価試験を進めている。この第1次処理系では膜フィルターの長寿命化をはかるため、分画分子量20,000程度の限外膜フィルター(UF)と逆浸透膜フィルター(RO)の2段階処理構成を考えており、写真1に示す試作試験装置はこれらのフィルターの組み合わせによる試験ができるようになっている。これまで行った試験の内、処理が最も難しいと思われる尿について、ほ

図2 無重力環境における水再生循環システム

写真1 膜フィルター評価試験装置

ば同一成分を持つ人工尿を用いた実験結果を中心に、処理上の問題点について述べる。まず、もっとも大きな問題は回収率とフィルター寿命の関係である。水の完全リサイクルを考える場合、回収率は100%でなければならず、これを水処理システムのみで行うとすると、最終濃縮水からの水分回収のための晶析器が必要になり、無重力環境下で機能する晶析器を開発しなく

てはならないが、これは非常に難しい問題である。CELSSではこの問題を避けるため、図2の破線で示すように排泄物処理システムの導入を計画している。この排泄物処理システムとしては高圧酸素雰囲気中150～300℃の温度条件下で、固形物を含むすべての有機物分解を行う通称湿式酸化法と呼ばれている方法の研究を進めている。処理後に残る溶液中には植物に必要な各種無機成分が多量に含まれているため、一部追加処理を行って、植物の肥料養液として再利用をはかる。このシステムと組み合わせれば、水処理システムで高濃縮をはかる必要はないので、膜フィルターの寿命延長が可能となる。周知のごとく、濃縮率を高めると、原水の浸透圧が上がるため、透過水量は反比例して減少していく。これを繰返し行くと膜面の汚れがひどくなり、洗浄しても機能回復しなくなるため、長期使用の観点から考えた場合、本問題については十分な検討が必要である。つぎに膜フィルターの分離能力について述べる。

試験用原水として人工尿を用い、それに含まれる無機物除去を行うために、各種市販逆浸透膜フィルターの中から非常に高い分離性能が表示されている製品を選び試験を行った結果を示すと表1のようになった。残念ながら非常に低い分離性能しか得られなかった。この違いの原因は各成分の除去性能に関するメーカーの表示値は多くの場合、その成分が単一成分として含まれている原水に対する試験データのものであり、ここで行ったような多成分が混在する場合には一般に性能

表1 逆浸透膜フィルター分離性能試験結果

成分	除去率 (%)	
	メーカー公称値	実験値
Na	99.3—99.9	50.3
K	99.2—99.9	54.9
Ca	99.9	52.2
Mg	99.9	53.3
Cl	98.5—99.9	46.2
HCO ₃	99.5	38.0
SO ₄	99.7—99.9	44.9
PO ₄	99.4	41.7
NH ₄	97.3—99.79	51.9
成分(%)	0.5	人工尿 2 倍希釈

が低下するようである。こういう現象に対する理論的な説明も試みられているようであるが、こういう現象がある以上、工学的立場からシステムを構築するためには、実証実験的に性能をよく確認しなくてはならないようである。

3.2 第2次処理系

飲料水または特殊高純度実験用水を作るには、さらに純度を高める必要があり、このために蒸留法の採用を検討している。月面基地等の重力環境下でのCELSSに対しては地上用システムが基本的には使用できるが、無重力環境下では沸騰型蒸留器は使用できない。このため、無重力用として現在、膜式および回転式の2種類の蒸留器の研究開発を進めている。

膜式蒸留器は膜の持つ気化透過性 (Thermoper-vaporation) を利用して蒸留を行う方法⁴⁾で、その原理を示すと図3のようになる。すなわち特殊な疎水性多孔質膜を介して左側に高温の原排水を流し、右側を低

温低圧に保つと温度および圧力差によって原水から蒸気が発生し、膜を透過して右側に流れ込むので、それを凝縮させて回収する。この場合、凝縮させる所は低温低圧にした方が蒸発効果が高くなるので造水効率は高くなるが、気液の分離を行わなければならない、システムが複雑になるため、現在は冷却した蒸留水を直接流す方法を用いている。写真2は製作した実験装置を示したものである。膜としてはテフロン系の平膜を利用しており、人工尿に対する分離性能実験データの一例を表2に示すが、非常に良好な結果が得られている。

本方式は機械的駆動部が送水ポンプのみゆえ、信頼性が高いという長所があるが、反面、薄膜を介して高

写真2 気化透過膜式蒸留 (TPV) 実験装置

図3 気化透過膜式蒸留法実験システムの構成

表2 気化透過膜式蒸留器評価試験結果

膜	汚 水							
	除 去 率							
	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺	NO ₃ -N	T-N	PO ₄ ³⁻	C ₁ ⁻	SO ₄ ²⁻
A	99.78	99.85	99.71	99.89	98.19	99.37	99.76	
B	99.95	99.97	>99.93	99.92	99.94	>99.86	99.98	
C	99.97	~100	>99.92	~100	99.83	>99.95	~100	~100

温水と低温水が流れるため、熱伝導によるエネルギー損失が大きく、いかにして効率の良い熱回収をはかるかという点にまだ問題が残されている。この他、膜の疎水性を破るような物質、例えば界面活性剤等が含まれる排水の処理には適さないという問題がある。つぎに回転式蒸留器 VCD (Vapor Compression Distiller)⁵⁾について紹介する。

本方式は重力のかわりに遠心力を利用して蒸留を行わせようとするもので、実験システムの概要を示すと図4のようになる。本体は内径の異なる2重になった円筒ドラムとそれを回転させるモーターおよび蒸気の吸引、圧縮用ブロアーから構成される。内部ドラムの小内径側壁上に滴下された原水は遠心力によってフィルム状に引き伸され、壁面上を大内径側へと流れていく。原排水温度が高ければ、ここで蒸発が起こるので、ブロアーによってこの蒸気を吸引圧縮して、内外ドラムの間隔部へ放出し、凝縮させる。このとき、内側ドラム上で凝縮した水滴は遠心力によって外側ドラムへとはじき飛ばされ、その表面上を大内径側へと流れていくので、その端部で回収する事によって気泡を含まない水が得られる。ドラム内部の蒸発室はブロアーによって低圧に保たれるので、比較的低温で蒸発を行わせることができる他、ドラム上で凝縮させることによって、凝縮潜熱を回収できるので、省エネルギー化をはかれる点で優れている。しかし、回転部があるため、シールド、信頼性等の面でやや難点があるといえる。写真3は1 l・h⁻¹の造水能力を目標に設計試作した実験用装置の概観を示したもので、ブロアー回転数に対する造水量の関係の1例を示すと図5のようになる。10,000rpmで目標の造水量が得られているが、そのときの蒸発室内圧力は約30mmHg位である。蒸発凝縮が定常運転状態になればドラム温度は約30℃位で一定に保たれる。したがって、原水の温度は原水タンクから滴下されるまでの間の温度低下を考慮して33~35℃程度に保持できればよいので、温度制御の面からは非常に有利なシステムといえる。本蒸留器については基礎的な実験が完了したので、それらの試験

図4 回転式蒸留法実験システムの構成

写真3 回転式蒸留器実験装置

図5 回転式蒸留器造水性能評価試験結果

データをもとに現在、第2次モデルの試作を進めている。

4. 宇宙システムにおける課題

宇宙ステーションや将来のスペースコロニーのような閉じられた小空間内に多人数で長期滞在するためには、物資の完全リサイクルが必要になる。初めにも述べたように、このシステムが完全であるためには食糧生産を含まねばならないだけでなく、食品加工、調理システムも必要となる。そして、これらのシステムから排出される不可食物の物質還元処理も行わなくてはならない。水は気相、液相としてこれらを含む各システム内を循環するだけでなく、生物体内において新たに作られたり、成長に伴って蓄積されたり、物理化学的処理過程内で分解されたりするため、量の増減という問題も考えなくてはならない。これは CELSS という観点から、水という物質の循環問題を考える場合には、つねに全体システムの中での循環物として分析し、システム構築をはからねばならないという事を意味する。また、システムにパラメーター変動の大きい生物が含まれるので、システム制御の許容量、貯水タンク容量の設定には、実際に地上において生物を組み込んだ CELSS 実験を長期間行い、発生するあらゆるパターンに対応できるようにする必要がある。空調系と異なり、水処理系は排水がある一定量貯ったら処理が開始される、いわゆるバッチ処理方式をとることになる。これは連続処理方式に比べ、装置稼働の面においての負担は軽い、反面、停止中のシステム内残留濃縮水による付着沈殿物の発生や有害細菌の繁殖等の問題が生じるため、その対策を講じなくてはならない。システムがクローズド系のため、特殊な殺菌物質はたとえ微量であっても循環によって蓄積されるため、人体に対し、完全に無毒性が実証されない限り使用できない。したがって、1 回の処理が終了すると、ただちにシステムの洗浄を行うことが長寿化のために必要と思われる。月面には酸素、火星には水が存在するので、これらに作られた基地では資源の現地調達が可能のため、水の完全リサイクル条件はかなりゆめられる可能性がある。

5. おわりに

閉鎖された小空間内における物質のリサイクルによる生命維持システムに関する研究はわが国を含む米欧露等の国において進められているが、目標からいえばまだ途についたばかりといえる。とくに宇宙用として考えた場合、栽培すべき植物種も単に栄養面だけでな

く味の面も考慮して選択しなければならないが、なによりもまず宇宙で栽培および収穫が可能かどうかの実験を行う必要がある。とくに米、小麦等の主食種は栽培期間が長いので、本格的実験は国際宇宙ステーションが完成する今世紀末まで待たなくてはならない。しかし、地上における閉鎖環境下での実験的研究はかなり進められており、日本においても、平成2年度に新しく発足した環境科学技術研究所(財団法人)において、本格的な CELSS 研究設備整備計画が進められている。完成すれば世界でも最先端の設備であり、研究の飛躍的發展が期待される。国際宇宙ステーションにおいてはガスおよび水については再生循環システムを導入する予定で研究開発が進められているが、水処理関係はまだ最終的な方式が決まっていない。これは、単にシステムの効率性、信頼性等の面だけで方式選定ができる他のシステムと異なり、例えば尿の入った排水はいかに高度処理されても飲む気になれないというような心理的要求も無視できず、かといって処理系を分割するとそれだけ容積、重量、開発および運用コストの面で負担が増えるという問題があるため、決定が遅れていると推測している。この問題には我々も悩まされている。現在の研究レベルからいえば水再生循環システムの主要要素技術についてはほぼ見通しが得られているので、今後の無重力環境下での使用を考慮したシステム構築のための周辺技術の研究開発を進める予定である。なお、本研究は日立製作所および笹倉機械のご協力を得て進めていることを付記し、感謝の意を表したい。

文 献

- 1) 新田慶治 (1986) 小地球を作る、丸善。
- 2) 新田慶治, 大坪孔治, 小口美津夫, 大矢晴彦, 神部征一郎, 芦田章, 佐野謙介 (1990) 月面構築シナリオと構築上の重要課題, *CELSS J.*, 2 (1)。
- 3) Oguchi, M., Nitta, K., Otsubo, K., Takahashi, Y., Nishi, I., Terai, K., Tsuji, K., Sato, K. and Mochizuki, Y. (1988) Wet-oxidation waste management using catalyst in CELSS, *Proc. of 16th International Symposium on Space Technology & Science.*
- 4) Tanemura, T., Otsubo, K., Nitta, K., Oguchi, M., Ashida, A. and Mitani, K. (1990) Evaluation for waste water purification using thermopervaporation method, *Proc. of 17th International Symposium on Space Technology & Science.*
- 5) Otsubo, K., Tanemura, T., Nitta, K., Oguchi, M., Kashiwagi, H. and Sawada, Y., (1990) Waste water purification method using vapor compression distiller, *Proc. of 17th International Symposium on Space Technology & Science.*