CELSS における水再生循環システムの開発

齋藤 高弘¹・大坪 孔治・種村 利春・小口美津夫・多胡 靖宏
 芦田 章*・新田 慶治*・浜野 亘男**・三谷 健司**

航空宇宙技術研究所・*(財)環境科学技術研究所・**(株)日立製作所・¹現在, 宇都宮大学農学部

Development of Water Recycling System for CELSS

Takahiro SAITO,[†] Koji OTSUBO, Toshiharu TANEMURA, Mitsuo OGUCHI,
 Yasuhiro TAKO, Akira ASHIDA,* Keiji NITTA,* Nobuo HAMANO**
 and Kenji MITANI**

National Aerospace Laboratory, Chofu, Tokyo 182, Japan

**Institute for Environmental Science, Aomori 039-32, Japan*

***Hitachi Co., Ltd., Yokohama 244, Japan*

[†]Present address: Faculty of Agriculture, Utsunomiya University, Utsunomiya 321, Japan

CELSS (Controlled Ecological Life Support Systems) is to be considered to construct the closed environment for sustaining the life including human beings without any material supply from outside. The water recycling system is a key subsystem of the integrated material recycling system which must be developed to obtain long-term, manned space activity. This paper presents the results of system study for designing water recycling system in which three kinds of membrane filters (UF, RO and TPV) are introduced to purify waste water discharged from men, animals and plants. In addition, the long duration processing tests utilizing artificial urine waste water were conducted to evaluate the appropriateness to adopt these membrane filters.

The following results were obtained: 1) The prototype water recycling system could be controlled and working smoothly. However, the system needed some maintenance of several parts of the equipments for it to operate completely in the given desired period. 2) The removable rate of water from artificial urine was below 60%. 3) The crystal materials namely $\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ and $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ which shortened the life time of each filter were found in tank, pipe and filter. 4) The urine removable rate of RO filter was lower than that of commercially sold filters which extracted only NaCl water. In the special case of ammonia which could not be extracted completely even using TPV filter after RO system, it is necessary to develop a new filter that can remove ammonia for a further suitable process.

(Received July 2, 1993)

1993年7月2日受付

緒 言

1. CELSS の概念

月面基地や有人火星探査のような地球からの物資の輸送の困難な領域における, 長期間にわたる有人活動を実現するためには, 外部からの物資補給なしでも長期間運

用できる総合的な生命維持システムが必要となる。このシステムは当然のことながら, 食料生産システムを含み, かつ, すべての物質は閉じた系内で再生, 循環されねばならない。このようなシステムは CELSS (制御生態系生命維持システム: Controlled Ecological Life Support Systems) と呼ばれ, 次世代の新技术として世界各国で研究が進められている¹⁾。この CELSS のシステムは,

Fig. 1 Concept of CELSS components.

Fig. 1 に示すように人間、動物、植物を含む人工の生態系と、それらの物質循環のバランスを維持するための物理化学的処理システム^{2,3)}(水、ガス、排泄物循環再生装置)から構成されるものである。

2. CELSS における水再生の概念

水再生処理システムは系内での水の循環と再生機能を分担するものである。動物から放出される汗および呼吸中の蒸気や植物の葉からの蒸散水などは除湿器によって凝縮水として回収され、水処理系に回される。各種排水は、水再生システムで処理されるが、最終に残る高濃縮排水は排泄廃棄物処理システムに回され、そこで他の有機固形物と一緒に処理される。植物系から放出される廃液は、古くなった肥料養液と栽培装置の洗浄排水の2種と考えられる。また、人間を中心とする動物系からはキッチン、トイレ、シャワーなどの排水がある。これらの排水はその含有成分が異なるので、別々にその含有成分除去に適した方法で処理したほうが効率および処理部の性能劣化などによる寿命低下を避けられるという点でよいが、反面、システムが多重になるため、信頼性、容積などの面で問題が残る。とくに宇宙用として考えた場合、容積などの低減化は重要な要求事項であるので処理方法の選択はこれらの問題を考慮せねばならない。

本報では、この CELSS における重要な要素技術であ

る水の再生循環システムに関し、排水処理を行うのに適したシステム構成の検討、水再生循環装置の開発、および長期間の基礎的性能試験を行ったので、ここに報告する。

材料および方法

1. システム構成

1.1 第一次処理系システム

今回の検討では、システムをできるだけ単純化するために、対象排水の含有成分に適した方法で個々に処理するのではなく、新しく Fig. 2 に示すような排水の集中処理型の方式を考えた。各種排水は気液混合体で搬送されてくるが、地上と異なり無重力環境では気体は自然に分離しないので、水処理系に入れる前に気液分離器を用いて、気体を除去することが必要である。なお、キッチンやトイレなどからは液体と一緒に固形物が排出されるが、これは固液分離器によって取り除かれる。各装置から排出された排水はまとめて原排水貯蔵タンクに貯えられ、一定量たまったら、Fig. 3 に示す第一次処理装置(高さ 178 cm, 幅 90 cm, 奥行 70 cm)へ回される。第一次処理系は中水レベルの水を得ることを目的として構成されており、そのために必要な粗フィルター、限外ろ過フィルター(以下、UF と呼ぶ)、逆浸透膜フィルター

Fig. 2 Prototype water recycling system in CELSS.

(以下, RO と呼ぶ) から構成されるシステムを考えた。本システムでこの 3 種類のフィルターを用いた目的は、

Fig. 3 Experimental apparatus for first water management system (UF and RO membrane filters).

固液分離で除去できなかった微細な固形物、結晶成分があればそれを粗フィルターによって取り除き、次に UF によって分解腐敗しやすいタンパク質や細菌、ウイルスなどを除去し、それよりあとのシステムの無菌化を図る。そして、海水の淡水化などに使われている RO を用いて用水中の無機イオン成分の除去を行い、植物栽培に利用できる用水をつくるほか、次の高度処理システムへ渡す原水の純度を高めることを図るものである。

1.2 第二次処理システム

Fig. 4 に示す第二次処理装置 (高さ 178 cm, 幅 90 cm, 奥行 70 cm) は、人間の飲料水や特殊な実験用水としてさらに純度の高い水を得るために、蒸留法を用いるシステムを考えた。本システムで用いた蒸留法⁴⁾は、気化透過膜式蒸留法 (以下, TPV と呼ぶ) と呼ばれる方法で、これは気体は通すが液体は通さない性質を持つ疎水性の高分子多孔質膜を利用するもので Fig. 5 にその動作原理を示す。膜の左側に高温水を流し、膜の右側に低温にしておけば、高温側で発生した蒸気は膜両面の蒸気圧差によって高温側から低温側へ膜を透過していく。この蒸気を集め、凝縮すれば蒸留水が得られる。膜の右

Fig. 4 Experimental apparatus for second water management system (TPV distiller).

側を低圧にしておけば、圧力差も利用できるため、造水率は高くできるが、宇宙の無重力環境下での使用を考えた場合、地上と異なって自然に気体と液体が分離できないため、気液分離器が必要となり、システム構成が複雑となる。このため、本システムでは蒸留水タンクにあらかじめ一定量の蒸留水を保持しておき、冷却器によって低温にした状態で、システム運転開始と同時に膜の右側に流す方法を開発し用いた。こうすることによって、膜を透過してきた水蒸気はこの低温水に触れて凝縮し、そのまま液中に溶け込むので気液分離の必要がないという特長がある。

2. システムの運転制御

本システムを制御するためのダイアグラムを Fig. 6 に示す。排液タンクに貯蔵された原排水はポンプ (1) によってプレフィルタに送られ固形成分が除去される。循環水タンク (1) に一定量たまるとポンプ (2) が起動し、排水は UF に送られ処理される。UF を透過した用水は循環水タンク (2) にためられ、やはり一定量たった時点でポンプ (3) が起動し、RO に送られることによってさらに高純度処理が行われる。RO を透過した用水は臭気成分などを除去するために活性炭フィルター (AC) を通過させ植物用水タンクに貯蔵される。なお、UF、RO を透過しなかった排水はそれぞれ循環水タンク (1)、(2) に戻され、設定された濃縮率に到達するまでこのループを循環する。なお、各ポンプの作動はタンク内の液面レベル計による検出信号により、リリーススイッチが作動することによって行われる。ここまでの処理が第一次処理系である。

第二次処理系では、まず植物用水タンクより用水をポンプ (4) で循環水タンク (3) に送り、必要量が貯まると液面レベル計でこれを検出し、ポンプが停止される。また、タンク (3) の水量が制限値まで減少するとポンプ (4) より用水が補給される。ポンプ (4) は植物用水タンクの液面レベル計と結合しており、植物用水タンクの水量が設定値まで減少するとポンプ (4) は停止され、空運転状態を防止する。循環タンク (3) の水量が設定値を超えた時点で、ポンプ (5)、(6) が起動され蒸留器が運転状態に入り、処理水が供給される限り、このループを循環して蒸留が続けられる。また、ポンプ (5) の起動・停止信号はヒーターおよびクーラーにも同時に伝達される。

Fig. 5 Principle of thermoper-vaporation distiller equipment.

Table 1 Components of artificial urine.

Component	Concentration (g/liter)
Creatine	1.239
Glucose	0.589
Urea	20.769
Uric acid	0.470
NaCl	7.949
(NH ₄) ₂ HPO ₄	1.879
CaSO ₄	0.581
MgSO ₄	0.856
K ₂ SO ₄	0.803
K ₃ PO ₄	0.592
KOH	0.856

205, 310 時間経過した時点で、残水を捨て、配管を外し、タンク、配管、膜を洗浄した。なお、試料中の creatine, glucose, urea, ammonia の定量には液体クロマトグラフ (LC-S-II: 島津理化器械(株)) を、Cl⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻ はイオンクロマトグラフ (DX-100: 日本ダイオネクス(株) 製) を、Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ は ICP 発光分光分析計 (JICP-PS: 日本電子(株) 製) を用いた。

結果および考察

1. システムにおける回収率の設定

水再生処理システムを考えた場合、排水から水の回収率が高いほど効率のよいシステムといえるが、回収率を上げることは、同時に高濃縮を意味し、フィルターの目づまりなどの性能劣化を招くことを意味する。そこで、システムの運転制御に重要である回収率設定の目安として人工尿の加熱による蒸発実験を行った。なお加熱温度は 45°C に設定し、徐々に蒸発を促した。その結果、Table 2 に示すように回収率 (体積換算) 47% で溶液が白濁し、60% の時点で沈殿物が発生した。また、リン酸を除いた人工尿では回収率 90% の時点で沈殿物が

確認された。よって、本人工尿では 60% 以上の水の回収が困難であることが判明した。

一般に尿は洗浄水とともに排出され、家庭では尿の量に対して 5 倍以上の洗浄水が使われている。しかし、宇宙では水に対してより厳しい使用条件が想定されるので、本実験では Table 1 に示す人工尿を 2 倍に薄めて原排水を作製し、回収率を 80% と設定し試験を行うこととした。

2. 水再生循環システムの諸性能

2.1 システムの運転耐久特性

本システムの試運転を行ったところ、第一次処理系、第二次処理系、両システムとも設計どおりの運転制御が行われることが確認された。よって、それ以後 60 日間にわたり各フィルターの性能試験を継続して行った。

UF や TPV は常圧近傍で使用されるので、送水ポンプとして難しい問題はないが、RO は 20~50 kgf/cm² の高圧が必要とされる。そこで、人工尿での送水圧力と透過水量の関係を調べた。Fig. 7 に示すように、10 kgf/cm² 以下の低圧力では若干ばらつきがあるが、本試験圧力範囲では、両者の関係は一次式に回帰された。よって、RO の送水圧力はポンプの性能を考慮し、30 kgf/

Fig. 7 Relation between pump pressure and permeated water in RO filter.**Table 2** Changes in artificial urine during heating treatment.

	Volume (ml)	Removable rate of water (%)	Color	Precipitate
Artificial urine				
	100	0	Transparent	None
	53	47	White	None
	40	60	White	Appearance
Artificial urine (remove (NH ₄) ₂ HPO ₄ and K ₃ PO ₄)				
	100	0	Transparent	None
	50	50	Transparent	None
	20	80	Transparent	None
	10	90	Transparent	Appearance

cm² とした。

UF は積算で 330 時間経過したところで、フィルターのバックリングが突発的に破損した。この原因は、タンクまたは流路内の析出物がはがれて、圧力調整弁をふさぎ、圧力の異常上昇を招いたためと考えられた。RO は積算で 540 時間運転したが、その運転は良好であった。TPV は計 380 時間の時点で膜シールの一部が破損し、水漏れが確認された。これは、洗浄時などに混入した細菌により尿素などが分解されてアンモニアが生じたことによって、原水側が pH 9.0~9.6 の強いアルカリ性となる状態が確認され、接着部分が腐食されたためと考えられた。

このように、当所の目標設定時間以前に UF と TPV では、装置の破損が確認され、試料水に適した形のシステムの信頼性の向上が重要と考えられた。

2.2 造水（透過水）能力の特性

透過水量の経時的変化は、各膜の使用による劣化の度合いを示す重要な尺度となる。Fig. 8 に各膜の透過流量の経時の変化を示す。UF は運転開始状態からの能力の低下が著しいが、100 時間を過ぎると安定し、透過流量は 0.4~0.8 liter/hr であった。

RO も試験時間の増加に伴い、透過流量が減少したが、洗浄後は処理能力の回復が確認された。これは、排水の高濃縮を図ったために膜面上に有機物や結晶が徐々に析出し、有効膜面積を減少させたことによると考えられる。実験終了時に、これら膜に析出している結晶および各タンク底面にみられる沈殿物を、ICP を用いて元素組成を分析し、その後 X 線回折装置 (JDX-3500: 日本電子(株)製) を用いて結晶構造を同定した結果、MgKPO₄·6H₂O, Mg₃(PO₄)₂·4H₂O, CaHPO₄·2H₂O などが検出された。本結果および加熱蒸発実験より、透過水量の確保および膜の寿命延長を図るためには、とくに、いずれか

の方法でリン酸イオンをあらかじめ除去することも重要と考えられた。同時に、これら結晶の析出により、実際の運転では回収率を 60% (人工尿に対して) にすることは困難であり、より低く回収率を設定することが望ましいと考えられた。また、透過流量が安定しない状態が観察されたが、これは当初の電源電圧にゆらぎがあり、それがポンプに変動を生じさせ、圧力変動が発生したためであった (Fig. 7 参照)。この圧力変動により、ポンプの安全スイッチが働きポンプが停止する状態が発生し、脈流の小さいポンプの選定、電源の安定化対策が今後必要と考えられた。

TPV の造水能力は、試験期間中ほとんど変動がなく安定しており、常時約 0.2 liter/hr であった。ただし、試作 TPV 膜が平膜型であるため、流入口付近で溶液の流れが乱れる現象が観察され、中空糸型の構造に改良することが望ましいと考えられた。

2.3 ろ過能力（除去率）の特性

各フィルターの人工尿中の含有成分の除去率を Table 3 に示す。なお実験期間中各フィルターの除去率の変動は、少なかったもので、各値は平均値をもって表した。UF の分画分子量は 20000 であり、人工尿中の各成分はすべてこれより小さいため、UF の除去率はほとんど 0 であった。ただし、UF 処理後の排水には細菌の存在が確認されず、UF 処理の目的は達成されたと考えられた。また、RO においては供試膜の NaCl 公称除去率は 99% 以上であったが、実験結果はすべての成分でこれよりもかなり低い値となった。とくに、尿素では約 17% と低い値となった。一般に、RO 膜の公称除去率は NaCl の単一成分に対するものであり、今回の供試水

Table 3 Characteristics of removable rate for components using artificial urine in UF, RO and TPV filters.

Component	UF removable rate (%)	RO removable rate (%)	TPV removable rate (%)
Creatine	1.3	62.0	100
Glucose	0	76.1	100
Urea	1.4	17.4	100
Ammonia	1.3	53.1	59.8
Na ⁺	2.1	67.7	100
Cl ⁻	0.2	62.3	100
PO ₄ ³⁻	1.0	70.1	100
SO ₄ ²⁻	1.2	72.8	98.8
K ⁺	0.2	66.8	99.9
Ca ²⁺	0.5	79.3	100
Mg ²⁺	0.3	75.3	100

Fig. 8 Change of permeated water in UF, RO and TPV filters during accumulated time.

のように多成分高濃度の溶液では、各成分の複合的効果が発生し、除去率が低かったものと推測された。TPVはアンモニアを除いて、ほぼ100%の除去率が得られた。アンモニアは水よりも沸点が低いので、蒸留する場合、透過水側に混入してしまうので、システム構成上蒸留器にかける前段で確実に除去するか、アンモニアをイオン化し、気化を防止するなどの対策が必要であることがわかった。これらの対策を用いれば、本システムでの処理後の用水は植物栽培用水および飲料水としての再利用に適する水質であると推察された。

摘 要

宇宙での運用状況を想定し、その第1段階として、CELSS 用水再生循環システム構成の検討および装置の開発・運転試験を行い、以下の知見を得た。

- 1) CELSS 用水再生循環装置を試作し、その運転操作状況などからみて、設計どおりの運転制御が行われたが、耐久性の面では装置上改善すべき必要性が認められた。
- 2) 加熱蒸発および運転実験より、本人工尿では、60%以上の水の回収は困難であることが明らかになった。

3) 用水処理性能低下を招く析出物は、主としてリン酸とカルシウム、マグネシウムによる化合物であることが判明した。

4) RO 膜の本供試水での除去率は、公称除去率と比べ、20~80% 低いことが認められた。とくにアンモニアは除去率が低く、その後の TPV でも処理が難しいので対策が必要と考えられた。

文 献

- 1) 新田慶治. 1986. 「小地球を作る」1-3, 丸善, 東京.
- 2) RAY, R. 1985. Membrane based water and energy recovery systems for the manned space station. SAE Tech. Paper, No. 851345.
- 3) MARTIN, C. E. and A. S. BACSKAY. 1991. Hydraulic model of the proposed water recovery and management system for space station freedom. SAE Tech. Paper, No. 911472.
- 4) TANEMURA, T., K. OTSUBO, K. NITTA, and M. OGUCHI. 1990. Evaluation for waste water purification using thermoper vaporation method. Proc. of 17th ISTS: 1555-1560.
- 5) 大坪孔治. 1985. ライフサイエンス用実験用水ガス循環装置. 航空宇宙技術研究所資料 TM-550: 51-62.
- 6) RYN, D. V. 1980. 「トイレットからの発想 (ブルーバックス)」74-76, 講談社, 東京.