

IIII 特集：生態工学 IIIII
(解説)

次期有人宇宙システム開発に向けた不要ガス除去装置の研究状況

立原 悟¹・佐藤 直樹¹・青木 伊知郎¹
大西 充²・桜井 誠人²

Status of Study of the CO₂/Trace Gas Contaminant Remover for Future Human Space Systems

Satoru TACHIYARA¹, Naoki SATOH¹, Ichiro AOKI¹,
Mitsuru OHNISHI² and Masato SAKURAI²

Abstract

In March 2005, the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) announced the JAXA Vision, and formed an internal working group for Environment Control and Life Support (ECLS) systems to prepare for future human space missions.

This paper shows the status of a study of the CO₂/Trace Gas Contaminant Remover for the Human Space Transportation System (HSTS) that was performed in 2010 by the ECLS working group.

Keyword(s): human space system, CO₂/trace gas contaminant remover

1. はじめに

宇宙航空研究開発機構（JAXA：Japan Aerospace Exploration Agency）有人宇宙環境利用ミッション本部では、JAXA 研究開発本部未踏技術研究センターの協力の下、2005年に発行された JAXA 長期ビジョン¹⁾や2009年及び2013年に決定された宇宙基本計画²⁾に基づき、次期有人宇宙システムの開発に備えるため、2005年度以降環境制御・生命維持（ECLS：Environment Control and Life Support）技術に係る研究を実施している。

2005年度の研究開始にあたり、月面有人拠点開発を対象としてケーススタディを行い、月面有人拠点に必要な ECLS システムの構成装置を識別し、それに対して国際宇宙ステーション計画において開発した日本実験モジュール「きぼう」で獲得した技術と未獲得技術の識別を行った。更に「きぼう」での未獲得技術については研究要素を識別し、2007年度以降要素研究を実施している。

本書は、研究要素の抽出に係る概要と、2007年度以降実施している ECLS 技術の要素研究のうち、機体で使用

する材料及び人体から発生する微量有害ガスの除去と、人の代謝によって発生する二酸化炭素の回収を行うための不要ガス除去装置の研究状況を解説するものである。

2. 開発要素の抽出

2.1 月面有人拠点用 ECLS システム検討

月面有人拠点開発を対象として必要な ECLS 機器を識別するにあたり、前提条件として搭乗員は2名とし、2週間の短期滞在が可能で、かつ実験装置や船外活動を行うためにエアロックを備えた「実験モジュール」と、6か月間の長期滞在を可能とするために「実験モジュール」の後に打上げる「居住モジュール」の2つのモジュールで構成することとした。

上記に対する ECLS 機能の検討結果として、「実験モジュール」には短期滞在用として空気や水の供給装置、モジュール内圧を制御する圧力制御装置、モジュール内の温湿度を制御する温湿度制御装置、不要ガス除去装置等を装備することとした。また「居住モジュール」には長

1 宇宙航空研究開発機構 有人宇宙環境利用ミッション本部 有人宇宙環境利用プログラム・システムズエンジニアリング室
〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1
Human Space Program Systems Engineering Office, Human Space Systems and Utilization Mission Directorate, JAXA
2-1-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505, Japan

2 宇宙航空研究開発機構 研究開発本部 未踏技術研究センター 〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1
Innovative Technology Research Center, Aerospace Research and Development Directorate, JAXA 7-44-1, Jindaijihigashi-
machi, Chofu, Tokyo 182-8522, Japan
(E-mail: tachihara.satoru@jaxa.jp)

期滞在時の補給を低減するため、水の再生装置や不要ガス除去装置で回収した二酸化炭素を還元して水を生成する二酸化炭素還元装置、水を電気分解することで呼吸に必要な酸素を製造する酸素製造装置等の再生式のシステムを装備することとした。

詳細を Table 1 に示す。表中“○”はそのモジュールに装備する装置，“△”は“○”に依存するもの，“-”はそのモジュールには装備しないものを表している。

Table 1 ECLS System for the Lunar Manned Base

系統	必要機能	モジュール		
		実験		居住
		AL*		
空気水供給系	N ₂ /O ₂ タンク	-	○	-
	水タンク	-	○	-
環境モニタ系	環境計測	△	○	△
空気調和系	圧力制御	△	○	△
	空気循環	○	○	○
	微粒子除去	○	○	○
	温湿度制御	△	○	○
	不要ガス除去	△	○	△
再生系	CO ₂ 還元	-	-	○
	酸素製造	-	-	○
	水再生	-	-	○

* : AL(エアロック)

2.2 研究要素の抽出

「きぼう」は 1984 年の米国レーガン大統領の要請に応じて参加した、国際宇宙ステーション計画に対して日本が開発した実験モジュールであり、Fig. 1 に示すように「船内実験室」、「船内保管室」、「ロボットアーム」、「船外実験プラットフォーム」、「船外パレット」で構成されている。

国際宇宙ステーションの ECLS システムは基本的に米

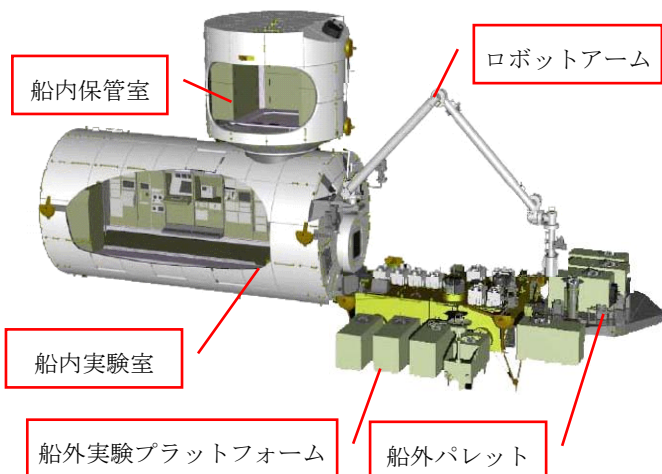


Fig 1 Japanese Experiment Module 「Kibo」

国及びロシアのモジュールに依存しており、「船内実験室」には 2 名の搭乗員が実験ができるように ECLS システムを装備しているが、その機能は Table 1 における「空気循環」、「微粒子除去」、「温湿度制御」に限定されている。

このため、「きぼう」開発における未獲得技術としては Table 1 の必要機能の内、地上の技術を転用できると思われる「N₂/O₂タンク」、「水タンク」、「環境計測」、「圧力制御」を除いた「不要ガス除去」、「二酸化炭素還元」、「酸素製造」、「水再生」の 4 項目が識別された。

更にこれら 4 つの未獲得技術に対し、国際宇宙ステーションで使用されている装置に対して優位性を生み出すことを目的として、Table 2 のように研究要素を抽出した。

Table 2 Study Theme of the ECLS System

必要機能	研究要素
不要ガス除去	微量有害ガス吸着剤
	酸化触媒
	二酸化炭素吸着剤
CO ₂ 還元	二酸化炭素還元触媒
	気液分離器
酸素製造	水電解セル
	気液分離器
水再生	逆浸透膜
	アンモニア分解

3. 不要ガス除去装置の研究状況

3.1 要素研究

3.1.1 有害ガス負荷モデルの設定

2.2 項で識別した「きぼう」での未獲得技術のうち、不要ガス除去装置に係る研究を開始するにあたり、新たな検討条件として 50m³の内容積を持ち搭乗員 2 名が 2 週間運用する宇宙船を想定し、運用期間中に処理が必要となる有害ガス負荷モデルを検討した。

有害ガス負荷モデルは「きぼう」開発当初に NASA から提供された約 220 種のガスについて機体及び人体からの発生量が設定された負荷モデルをベースとし、機体からの発生ガスについては「きぼう」及び宇宙ステーション補給機「こうのとり」の開発時に取得した内部空気のガス分析データを反映し、人体からの発生ガスについては 1993 年から 1998 年にかけて旧宇宙開発事業団内で計測したデータを反映した。更に、国際宇宙ステーションで適用されている 7 日間の曝露に対する許容濃度 (SMAC : Spacecraft Maximum Allowable Concentration) を適用し、2 週間の運用期間中に SMAC を超える 23 種のガスを処理対象として識別し、最終的な有害ガス負荷モデルとして設定した。

結果を Table 3 に示す。

Table 3 Trace Contaminant Gas Load Model

No.	ガス名	SMAC (mg/m ³)	発生量 (mg/day)
1	1-butanol	80	734.8
2	Nonanol	0.1	0.69
3	1-octanol	0.1	1.26
4	Butanal	17.7	155.72
5	Acetone	50	446.46
6	Methyl ethyl ketone	30	398.33
7	Toluene	15	143.33
8	m-Xylene	73	374.91
9	3-Chloro-propylene	0.1	3.6
10	Dichloro-methane	49	184.96
11	1, 2-Dichloro-benzene	0.1	1.17
12	2-Ethoxy-ethanol	3	109.64
13	Allyl acetate	0.1	0.53
14	Butyl acetate	0.1	100.42
15	Tetradecamethylcycloheptasiloxane	0.1	58.79
16	Hexadecamethylcyclooctasiloxane	0.1	13.35
17	Mono-methyl hydrazine	0.004	0.25
18	Indole	0.25	50
19	Epichlorohydrin	0.1	0.53
20	Ammonia	7	950.64
21	Carbon monoxide	63	239.75
22	Hydrazine	0.05	0.18
23	Carbon Dioxide	13750	2×10 ⁶

3.1.2 微量有害ガス吸着剤

微量有害ガスの吸着には通常活性炭が用いられるが、本研究では既存の装置に対する優位性を確保するため、比表面積が大きくなることが知られているもみ殻を用いた活性炭に着目し、2007年度から研究を開始した。

2007年度の研究では、もみ殻活性炭の比表面積を確認するためにもみ殻活性炭の試作を行い、一般的なヤシ殻活性炭の比表面積(約 1,000m²/g)を大幅に上回る 2,500 m²/g を達成できることを確認した。また、2008年度に圧力損失低減及び取扱性向上のためにペレット化の研究を実施するとともに、2009年度には吸着対象ガスの大きさに合わせて活性炭上の細孔サイズの分布が 0.4nm 付近に集まるように賦活方法の見直すことで性能向上を行い、ベンゼン、メチルアルコール及び n-ブチルアルコールに対する吸着特性を評価した結果、Fig. 2~Fig. 4 に示すようにもみ殻活性炭は性能的に市販のヤシ殻活性炭と同等以上で、質量的には約 1 割軽量となることが確認できた。

更に、2010年度に活性炭表面上の細孔を利用した物理吸着では除去が困難なアンモニアについても同時に除去可能にするため、もみ殻活性炭に対してリン酸及びヨウ素酸をそれぞれ 5%wt 添着した活性炭を試作・評価し、Fig. 5 に示すようにヨウ素酸添着炭が有効であることを確認した。

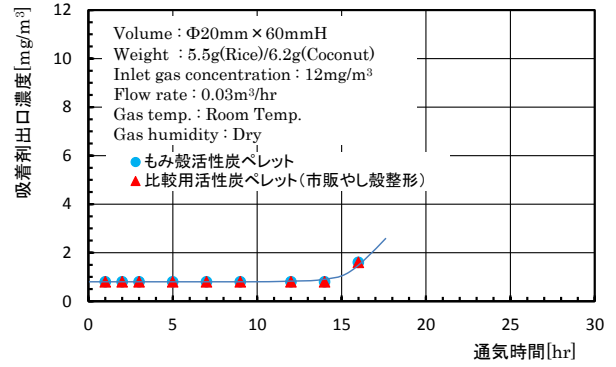


Fig. 2 Adsorption of Benzene

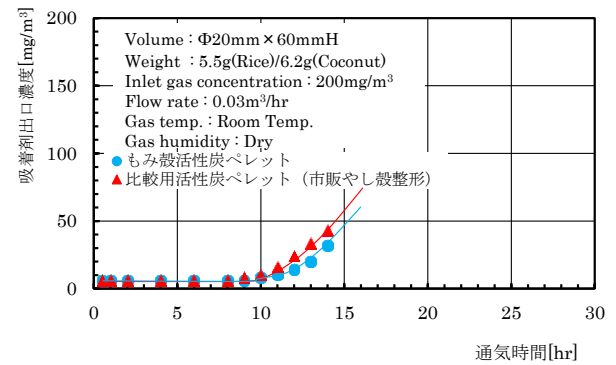


Fig. 3 Adsorption of Methyl Alcohol

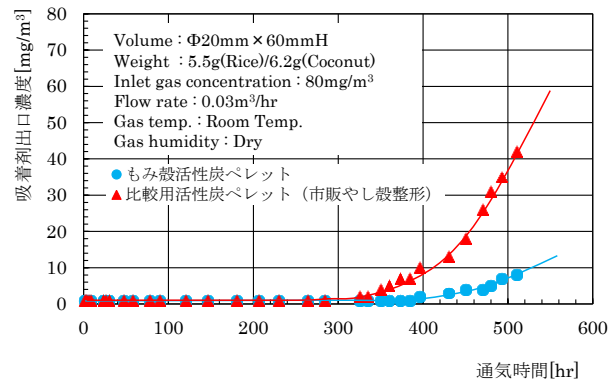


Fig. 4 Adsorption of n-Butyl Alcohol

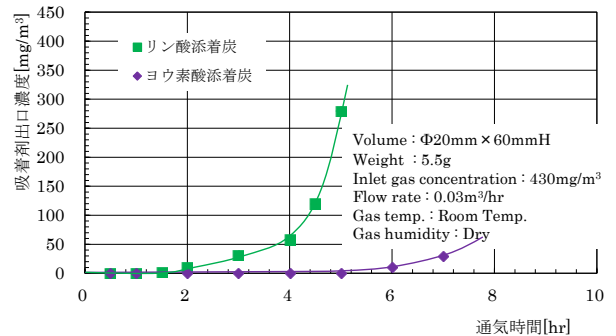


Fig. 5 Adsorption of Ammonia

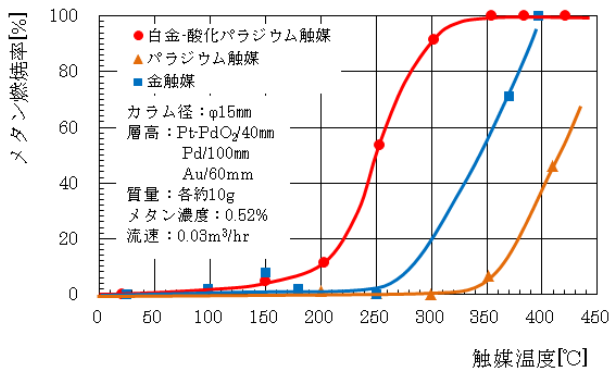


Fig. 6 Oxidation of Methane by Catalyst

3.1.2 酸化触媒

活性炭やヨウ素酸添着炭では除去が困難な一酸化炭素を酸化処理して二酸化炭素にするため、酸化触媒についても研究を実施した。研究を行うにあたっては、国際宇宙ステーションに搭載されている有害ガス処理装置との比較を行うため、Table 3の一酸化炭素に加えてメタンを処理対象として追加した。

2009年度及び2010年度に金、パラジウム、白金-酸化パラジウムの3つの触媒を試作してメタンの燃焼率を比較した結果、Fig. 6に示すように金及びパラジウム触媒ではメタンを完全に酸化させるためには触媒温度を400°C以上にする必要があるのに対し、白金-酸化パラジウムについては350°Cで可能なことが確認できた。このことから、白金-酸化パラジウム触媒を使用することで450°Cで酸化処理している国際宇宙ステーションの装置に対して優位性を生み出せることがわかった。

また、一酸化炭素については白金-酸化パラジウム触媒を使って一酸化炭素供給条件として濃度70mg/m³、流量0.03m³/hr、触媒の条件としてカラム内径φ15mm層高4mm、質量10.55gで評価を行い、25°C以下で酸化処理できることを確認している。

3.1.3 二酸化炭素吸着剤

二酸化炭素の発生量は搭乗員一人あたり1日に1kgといわれており、2人が2週間活動するミッションでは28kgの二酸化炭素をキャビン内から除去することが必要となる。これを非再生式の二酸化炭素吸着剤である水酸化リチウムを用いて処理するとした場合、その吸着能力は0.56g/g³程度と考えられ、必要となる水酸化リチウムの質量は約50kgとなって大きな質量インパクトとなる。

一方、長期連続運用を行う国際宇宙ステーションでは、吸着剤としてゼオライトを使った再生式の二酸化炭素除去装置が用いられており、ゼオライトを搭載した筒を2つ用意して一方が二酸化炭素を吸着している間に他方を加熱・減圧することにより吸着した二酸化炭素を脱着して

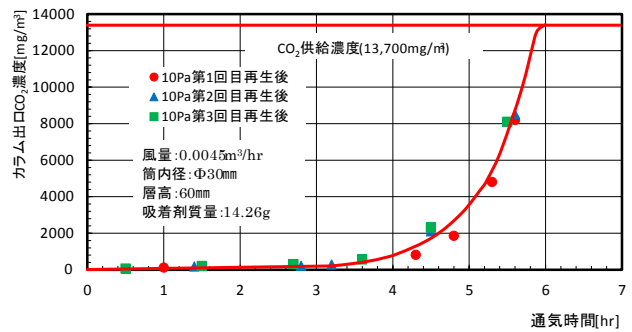


Fig. 7 Adsorption of Carbon Dioxide

船外に放出している。この装置ではゼオライトからの二酸化炭素の脱着のために250°C以上に加熱する必要があり、加熱やその後の冷却、高温部分の断熱のために電力や質量が必要になるというデメリットがある。

このため、JAXAでは2007年度から常温下で真空引きすることにより吸着した二酸化炭素を脱着可能な吸着剤の研究を実施している。研究開始当初にいくつかの吸着剤を評価し、2010年度からはシリカにアミンを担持させた吸着剤に着目して改善研究やペレット化の研究を実施しており、2012年度の研究において常温下で真空引きすることで吸着した二酸化炭素を脱着して再生が可能な吸着剤を試作することができた。Fig. 7はその吸着剤を常に25°Cに保った状態で、最初に二酸化炭素を飽和するまで吸着させた後、10Pa-absまで減圧(1時間で到達)することにより吸着剤から二酸化炭素を脱着した後に再度二酸化炭素を供給して吸着させる操作を3回繰り返した際のカラム出口の二酸化炭素濃度の変化を示している。図からもわかるように、1回目から3回目までの吸着特性に大きな差異はないことから、常温下での真空引きで吸着剤の再生が可能となったことを示している。

3.2 不要ガス除去装置の検討

3.1項では吸着剤や触媒の要素研究の状況を示したが、それと並行してそれらの成果を用いた不要ガス除去装置についても検討を実施している。

検討にあたっては3.1.1項に示した有害ガス負荷モデルの条件と同様に、50m³の内容積を持ち搭乗員2名が2週間運用する宇宙船を想定した。また、国際宇宙ステーションのように有害ガス除去装置と二酸化炭素除去装置を別々に装備するのではなく、両方の装置を一体式にして吸引ファンや制御装置の台数を減らすことを考慮した。更に、Table 3の有害ガス負荷モデルにはメタンが含まれておらず、酸化処理が必要なガスは一酸化炭素に限られることから酸化触媒は常温での運用とし、3.1.3項に示した二酸化炭素吸着剤の研究成果に従って二酸化炭素吸着剤からの二酸化炭素脱着も常温とすることでヒータや冷

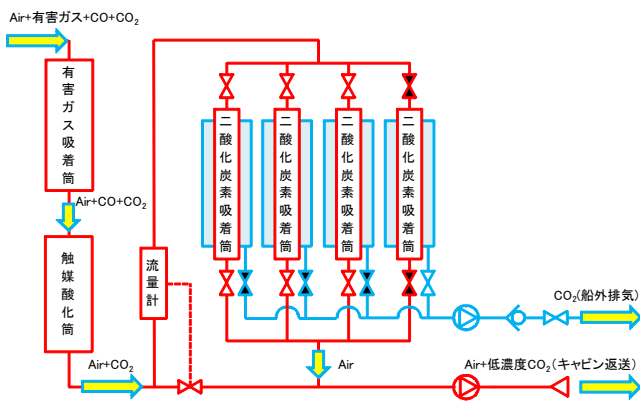


Fig. 8 Schematic of the JAXA CO₂/Trace Gas Contaminant Remover (Concept)

却装置を不要とした。これらを反映した系統図を Fig. 8 に示す。

不要ガス処理のプロセスとしては、前段に設けた有害ガス吸着筒に搭載したもみ殻活性炭及びヨウ素酸添着炭で一酸化炭素及び二酸化炭素を除く有害ガスを除去し、次に触媒酸化筒に搭載した白金・酸化パラジウム触媒で一酸化炭素を酸化することで二酸化炭素にし、最後に二酸化炭素吸着筒で二酸化炭素を吸着・除去して、空気と微量の二酸化炭素をキャビンに返送する流れ（図中赤い系統）となっている。一方、二酸化炭素吸着筒で吸着した二酸化炭素については、宇宙空間の極低圧を利用して船外に廃棄する流れ（図中青い系統）とした。

尚、本検討では 3.1.3 項に示した二酸化炭素の研究の成果として、10Pa-abs（1 時間）の減圧で 3 時間以上の二酸化炭素吸着できるという特性を利用し、吸着筒を 4 筒装備して 1 時間毎に減圧する筒を切替える運用とすることで二酸化炭素吸着剤の総量を削減し、二酸化炭素吸着筒が小型・軽量化となるように考慮している。

また、二酸化炭素吸着筒の更なる小型化のアイデアとして、従来は二酸化炭素を脱着する際には二酸化炭素排気ポート 1 か所からしか減圧（脱着）していないのに対し、二酸化炭素通気ポートや二酸化炭素吸着筒の側面（計 3 か所）から等、できるだけ多くの箇所から減圧（脱着）することによって減圧（脱着）ポートあたりの二酸化炭素吸着剤の層高を減らすことにより、減圧（脱着）時間の短縮化を図ることについても検討を実施している。

Fig. 9 に本アイデアの有効性を確認するために試作した二酸化炭素吸着筒の外観（内径φ 70mm, 吸着剤充填部 60mm×2 か所）を示す。本吸着筒に層高 30mm×2 か所で吸着剤を充填し、二酸化炭素を飽和吸着させた状態から減圧ポートを CO₂ 排気口（1 か所）、CO₂ 通気/CO₂ 排気口（2 か所）、CO₂ 通気/吸着筒中間部/CO₂ 排気側（3 か所）に変え、二酸化炭素吸着剤から二酸化炭素を脱着

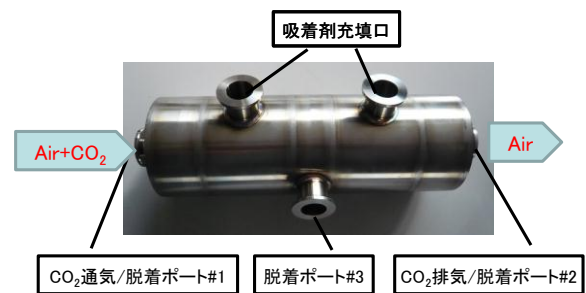


Fig. 9 CO₂ Remover Canister for Rapid Re-generation (Concept Study Model)

するために十分と考えられる 15Pa-abs に減圧できる時間を計測した結果、減圧ポートが 1 か所の場合が 120 分を要したのに対し、減圧ポートが 2 か所の場合には 67 分、3 か所の場合には 42 分となり、本アイデアの有効性が確認ができた。

4. おわりに

2 章及び 3 章で示したように、2005 年度の開発から 7 年をかけて開発要素の抽出、有害ガス吸着剤（もみ殻活性炭）や酸化触媒、二酸化炭素吸着剤といった開発要素の研究、更に吸着剤等の研究成果を反映した不要ガス除去装置の検討を実施してきた。

その結果、有害ガス吸着剤、酸化触媒及び二酸化炭素吸着剤については従来品に比べて優位性を持つものの開発を行うことができ、これらの吸着特性等を用いることで国際宇宙ステーションで運用されている装置に比べて軽量で省電力となる装置の開発に目処がついたものと考えている。

今後は、要素研究として 3.2 項に示した二酸化炭素吸着筒の小型化に係る研究を進めるとともに、更に本研究で試作した有害ガス吸着剤や酸化触媒、二酸化炭素吸着剤を搭載した不要ガス除去装置全体の試作を行い、Table 3 に示した有害ガス負荷モデルを供給して連続運転を行うことで、不要ガス除去の機能・性能及び運用性の実証を行いたいと考えている。

参考文献

- 1) JAXAVision
http://www.jaxa.jp/2025/index_j.html
- 2) Basic Plan for Space Policy,
<http://www8.cao.go.jp/space/plan/plan.pdf>
- 3) S. Tachihara, N. Satoh, M. Ohnishi and M. Sakurai:
Study Status of the ECLSS for Next Manned Space Mission in JAXA, 40th ICES, Barcelona, 2010

(2013 年 3 月 7 日受理, 2013 年 3 月 25 日採録)