第58回宇宙科学技術連合講演会講演集
2014年11月12日～14日 長崎ブリックホール
JSASS-2014-4389

2D02　有人宇宙探査のための酸素製造に関する研究

○桜井 誠人、島 明日香、大西 充(JAXA)

Study of Oxygen Generation for Manned Space Exploration

Masato Sakurai, Asuka Shima, Mitsuru Ohnishi (JAXA)

Key Words: Space exploration, Air re-vitalization, Life support system, CO_2, Water electrolysis

Abstract

To support long-duration manned space missions beyond Earth orbit, recycling life support systems will be necessary to reduce the mass of consumables required. JAXA is therefore developing life support technologies for future manned space missions such as water purification, CO_2 reduction and oxygen generation. JAXA is currently studying an air revitalization system for an on-orbit demonstration on the International Space Station (ISS) early in the extended ISS operation period (2015–2020) to support proposed post-ISS missions such as manned lunar or asteroid exploration and an Earth-Moon Lagrange point (EML1) space station. Regenerative functions include oxygen recovery from carbon dioxide using a combination of CO_2 reduction by the Sabatier process and O_2 generation by electrolysis. Water electrolysis is a key technology because the hydrogen it produces is used for CO_2 reduction and the oxygen is essential for human respiration. A simple method for obtaining dry oxygen from electrolysis is also important. This paper presents the air re-vitalization system for the demonstrator and gives details of water electrolysis in microgravity. In this paper, we investigate SPE (solid polymer electrolyte) water electrolysis and discuss the ‘Cathode Feed’ operation of an electrolyzer. Although water is usually supplied to the anode side of ground-based electrolysis cells (anode feed), we adopt cathode feed to obtain dry oxygen. The performance of the cathode feed cell can achieve its design target by flushing the gas bubbles that adhere to the electrode. A membrane type water/gas separator consisting of hydrophilic and hydrophobic membranes was used.

1.　はじめに

各国の宇宙開発組織で構成された国際宇宙探査協働グループ(ISECG)が 2013 年 8 月に発表した工程表において、2030 年以降に火星有人探査を行うと記している。長期滞在技術の開発に国際宇宙ステーション ISS を活用し、月の有人探査や火星の無人探査などを段階的に進めていくとしている。年単位のミッション期間が想定されており、それに対応して水再生・空気再生の研究も進められている。ISS では尿(1.2kg/person/day)と凝縮水(1.95kg/person/day)から得られる(3.15kg/person/day)程度の水を処理している。火星有人探査などの更に長期のミッションでは、加えて衛生水(手洗い、シャワー、髭剃り、うがい、洗濯)などの水が必要になると考えられている。1 人分の必要量で算出すると 15(kg/person/day)程度の水が処理対象となる。

一方、空気再生に関しては、ISS では二酸化炭素分離濃縮→二酸化炭素還元(サバチエ反応)→酸素製造(水電解)のプロセスを用い、酸素を半分程度回収可能なプロセスが試験的に立ち上がりつつある。年を越える有人探査では、サバチエ反応で生成され宇宙に排気されているメタンから水素を回収するべく、ボッシュ反応やメタンを加熱することにより炭素を生成する方法が検討されている。炭素の粉末の取り扱いが微小重力場において特に問題となるためメタンからアセチレンを生成し、水素の一部を回収する方式なども検討されている。

図 1 に示すように JAXA においても火星有人探査の際に不可欠になる空気再生装置の要素試作を行っている。本報告では、酸素製造のための水電解を軌道上実証するための研究に関して報告する。

2.　国際宇宙ステーション内における空気の供給

ISS は、各国がそれぞれに開発した構成要素で成り立っている。基本的には各構成要素の開発を担当した国が責任を持って運用し、全体のとりまとめを米国が行っている。日本では空気循環と温湿度管理については「きぼう」の開発・運用で実績はあるが、空気再生技術開発の実績は現時点ではない。ただし、空気再生技術については、日本の得意とする環境技

ⓒ日本航空宇宙学会

This document is provided by JAXA.

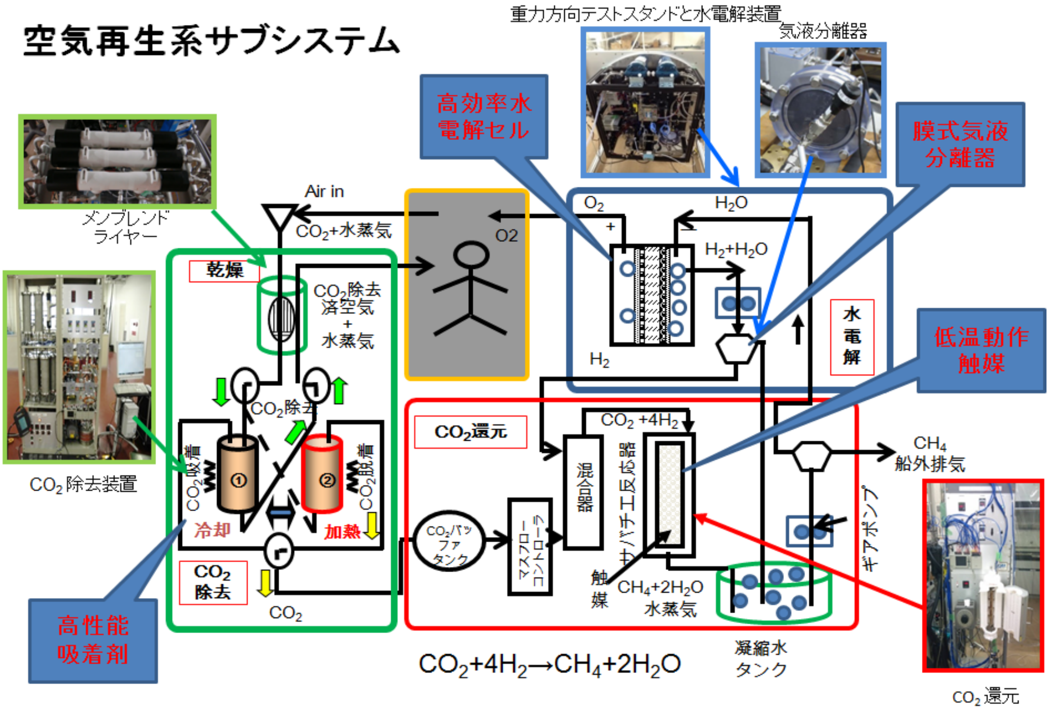


図 1 空気再生の概要

術をベースとして、既存技術より低温での CO_2 還元技術に関する研究、省エネルギーでコンパクトな水電解に関する研究を進めている。今後、軌道上での技術実証を早期に実現して行く事が肝要である。

(1) 酸素の供給

ISSには米露の2台の酸素生成装置が設置されている。ロシアの装置は、ズヴェズダ内に設置されている「エレクトロン」である。NASA の酸素生成装置 OGS(Oxygen Generation System) はデスティニー内に設置されている。どちらも水を電気分解する事で酸素と水素を発生させて、酸素を供給する。副生成物となる水素は船外排気もしくは CO_2 還元反応に用いられる。

ISS を訪問する宇宙機にも酸素と空気を搭載して補給を行っている。ロシアのプログレス補給船と、欧州宇宙機関の欧州補給機(ATV)によって酸素や空気が供給される。これらはタンクのバルブを開いてガスを船内に放出するだけの単純な方法が使われている。

以前運用されていたシャトルの場合は、ISS の「クエスト」エアロックの外部に設置されている高圧酸素タンクと窒素タンクにガスを補給する事が出来た。酸素生成装置で酸素が十分生成できないトラブル発生時には、これらの酸素を使用する事が出来る。また、ロシアは固体燃料を使う使い捨ての酸素発生装置(SFOG)を有しており、非常時にはこれを使用する事が出来る。

(2) 二酸化炭素の除去

ISS 内には米露の二酸化炭素除去装置が装備されている。ロシア側の装置は、Vozdukh「ヴォズドーク」と呼ばれており、NASA の装置は CDRA(Carbon Dioxide Removal Assembly)「シードラ」と呼ばれている。どちらもゼオライトを用いて CO_2 を吸着し、吸着した CO_2 は宇宙空間に排出する方法で連続的な処理を行う。

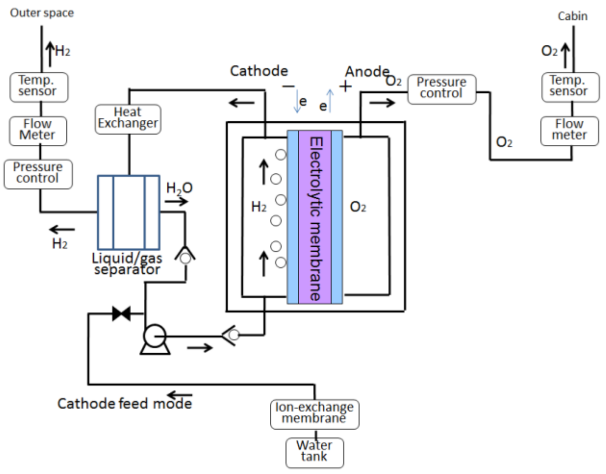
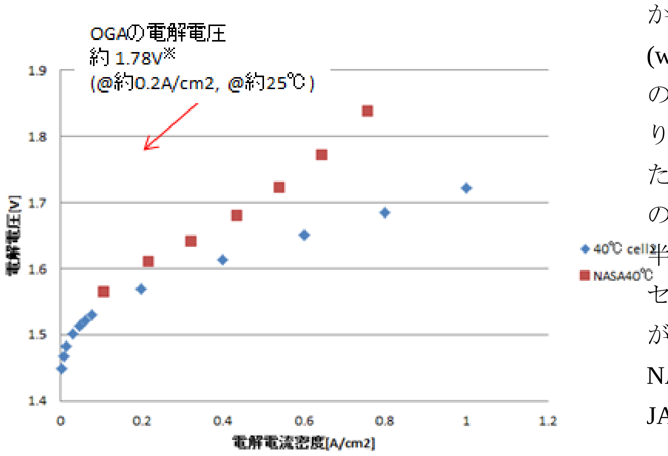


図 2 カソードフィード水電解の概要

This document is provided by JAXA.



■[1), ※2)] 参照

図 3 カソードフィードにおける比較

3. 微小重力対応

一般に水電解を行う際に供給される水は，アノード（酸素極）側にのみ供給される手法（アノードフィード方式）か，もしくはアノード（酸素極）／カソード（水素極）の両方に水を供給する手法がとられるが，アノードに水が供給された場合には，生成される酸素と水が混合された状態で系内に存在することになる．有人宇宙活動までを想定した場合には水をカソード側に供給しすることにより乾燥した酸素を取り出す手法（図 2 : カソードフィード方式）がとられる．このような水電解においては，水とガスが混入した状態での気水分離が必要になる. JAXA はJEM の設計建設に関して、キャビンエア中からの水分除去を遠心分離で行い(air rich の条件)、冷却循環水からの気泡除去に関して膜を用いた気液分離の経験(water rich の条件)がある。いずれも air もしくは water の比率が極端に大きな混相流を対象としたものであり、気体中の液体も液体中の期待も意図して混入したものでなく不純物の除去的な要素が有る。本論文の対象の水電解からの気液分離は、気液の比率が半々程度の条件であり、気体と液体は水電解のプロセスにより意図的に混入している。今までに JAXA が経験したことの無い領域での気液分離である。NASA は遠心力を利用して気液分離をしているが、JAXA では膜式気液分離を選択している。

4. 水電解セルの仕様検討

a ）水電解セルのコンパクト化

JAXA が使用している水電解セルは、図 3 に示す通り電解電流密度が上昇しても既存の水電解セルと異なり、電解電圧の急上昇を示さない。この事から電解電流密度を高くとることができる。

OGA に関する I-V カーブに関する報告は公開されていないが、各種の発表内容から推測すると電解電流密度が 0.2A/cm^2 程度の時、電解電圧 1.78V 程度である事が推測される。JAXA が使用している水電解セルは電解電流密度が 1A/cm^2 の時にも電解電圧は 1.72V 程度と低く抑えられている。既存の水電解セルよりも電解密度を大きく取れるため、原理上 OGA の 1/5 程度のサイズ・質量となる可能性が有る。(実際は膜に負担がかかるため 1/2 程度のコンパクト化が可能になると思われる。

表 1 水電解における電解電圧に関する諸データ

項目	値	単位		参考文献
酸素量	0.835	Kg/CM/day		
電解に必要な水量	0.939	Kg/CM/day		
クルー数	11	CM		
11 人分の酸素量	9.185	Kg/day	9.2Kg/day	3)
11 人分の電解に必要な水量	10.333	Kg/day		
水の電解理論電圧	1.4572	V	@25℃	
水蒸気の電解理論電圧	1.2292	V	@25℃	
電解運用電圧 OGA	1.78	V	@0.2A/cm^2, @30℃(仮定)	2)
電解運用電力 OGA	2281	W		
電解運用電圧 JAXA	1.58	V	@0.2A/cm^2, @30℃	
電解運用電力 JAXA	2025	W		

This document is provided by JAXA.

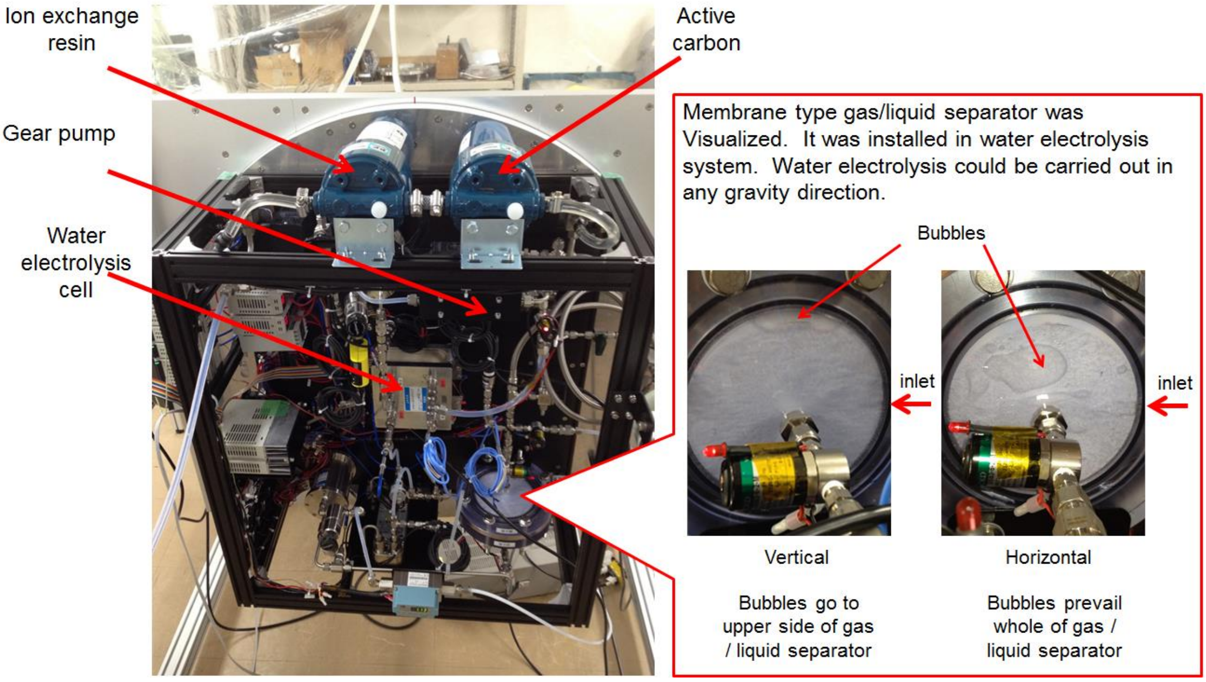


図 4 重力方向テストスタンドの上に設置された気液分離器と水電解装置

ｂ）消費電力

各文献に OGA の仕様が掲載されているが、比較の条件を統一して扱うために OGA の最大能力(11 人分の酸素発生)の条件で比較する。通常の水電解は $1A/cm^2$ 以上の電解電流密度で行われているが、カソードフィード方式である OGA では $0.2A/cm^2$ 程度の電解電流密度であるようである。表 1 に示す通り、電解運用電力で比較すると 2281W(NASA)→2025W(JAXA)と 1 割程度の低減効果が期待できる。

ｃ）電解効率

図 3 を参考に電解効率を算出する。但し OGA は I-V カーブを公開していないため約 0.2A/cm2、25℃(推測)の条件で推測する。$0.2A/cm^2$ の時に比較すると

OGA: 1.78V,　82%　→　JAXA: 1.58V,　92%

となる。

ｄ）循環水量

OGA は 6531kg/day 程度の循環水量である [4)]。JAXA は以下の 2 条件を設定し検討した。

・電解に必要な水量の 100 倍を循環→1033kg/day

・入口を出口の温度差を 10℃以内→323kg/day

以上の検討より、限界水量 1033kg/day = 0.717kg/min を見出した。この結果は OGA と比較して 1/6 程度の循環水量に削減可能である。

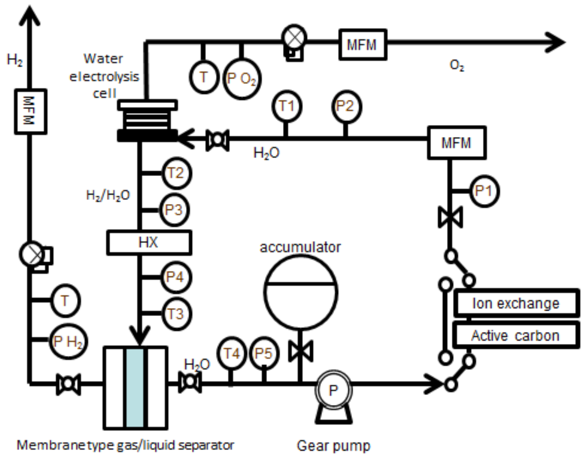


図 5 気液分離器と水電解装置の概要

5.　要素試験

図 4,5 に水電解セルと気液分離器をはじめ、イオン交換樹脂、活性炭、熱交換器、流量計など主要な要素で構成された試作要素試験装置を示す。図 4 左側の写真に写る黒いフレームは 80cm×80cm×30cm ほどの大きさで ISS 実証の際の装置大きさをイメージしている。フレーム内に組み込まれた試作要素試験装置は重力方向テストスタンド上にセットされている。気液分離機に対して重力方向の気水分離機能にあたえる影響評価を実施している様子を示した．こ

This document is provided by JAXA.

のような試験を通じて，搭載状態を想定したシステム構築と運用手法への反映が進められている．図 6 に重力方向を変化させた場合の水電解装置における各場所における圧力を示す。重力方向を変えた場合においても水電解可能であることがわかると共に 180 度反転させた場合に圧力が上昇することが分かった。

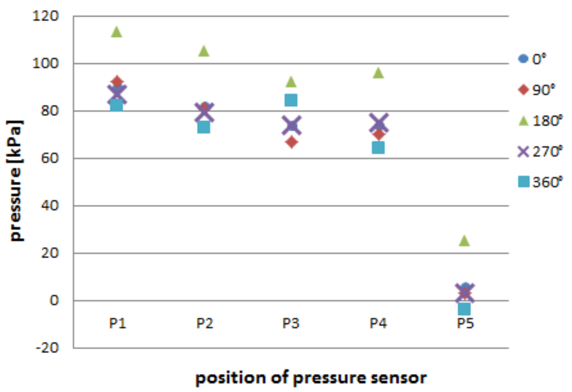


図 6 重力方向を変化させた場合の水電解装置における各場所における圧力

6. まとめ

文部科学省は火星の有人探査をめざし、国際プロジェクトへの参加を各国に呼びかける方針を明らかにした。宇宙探査のあり方を検討する有識者会合で示した。

小惑星や月探査に於いても人間の有する高度な能力により高い質の探査が可能であり、人類の活動領域拡大、最先端科学技術の進化の観点からも有人活動は重要である。今後 10 年程度をかけ我が国の自立性を確保し、国際協力に於いてパートナーシップを発揮するための鍵となる有人活動に必要となる要素技術等は独自に確立する。その第 1 ステップとして 2020 年頃までに図 7 に示すような生命・環境維持技術の鍵となる要素技術の実現の見通しを得ることが望ましいと考える。

CO_2 除去装置および O_2 製造装置に関しては、大人ひとりに対応できる規模のものができている。CO_2 還元装置 [5]に関してもスケールアップを図っている。今年度中に各要素をつないだ全体システムを製作し、地上実証実験を実施することを検討している。また、宇宙実証が必要な CO_2 還元装置と O_2 製造装置については、宇宙ステーション補給機「こうのとり」で ISS へ運び、「きぼう」にて実証試験 [6]を予定している。この実証により、コンパクトで省エネかつ信頼性の高い空気再生システムの開発技術を実証し、将来の宇宙開発に貢献しようと考えている。将来行われる有人ミッションでは、日本得意の環境技術を駆使した生命維持システムが搭載される事を目指して努力している。

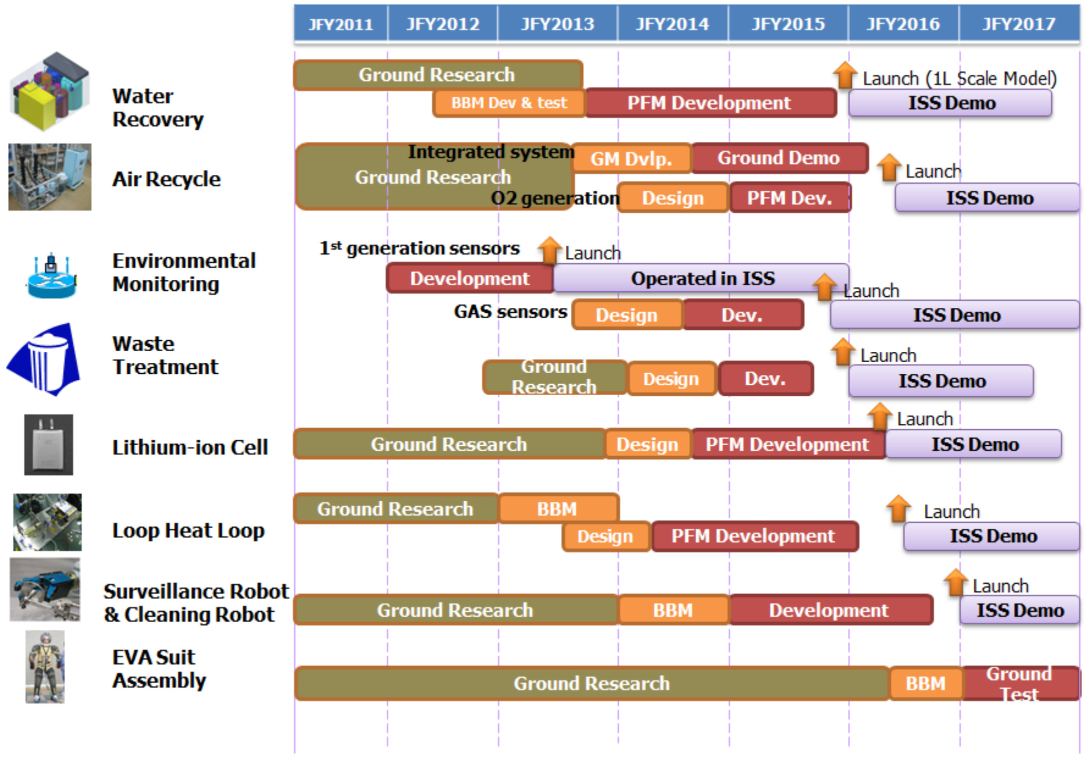


図 7 技術デモンストレーションの計画

This document is provided by JAXA.

参考文献

1) Edwin W. Schmitt, et.al “Development Testing of High - Pressure Cathode Feed Water Electrolysis Cell Stacks for Microgravity Environments” AIAA 2011-5058 (2011)
2) Joyce E. Carpenter, et. al. “Investigation into the High-Voltage Shutdown of the Oxygen Generation System Aboard the International Space Station” AIAA 2012-3613 (2012)
3) Robert M. Bagdigian, Dale Cloud and John Bedard “Status of the Regenerative ECLSS Water Recovery and Oxygen Generation Systems” ICES-2006-01-2057 (2006)
4) Darren Samplatsky and John Bedard “Status of ISS Oxygen Generation and Water Processor Assemblies” ICES-2003-01-2691 (2003)
5) 島 明日香、桜井 誠人、曽根 理嗣、大西 充、米田 晶子、阿部 孝之「実証に向けたサバチエ反応器の開発」2K08, JSASS-2013-4442 (2013)
6) Masato Sakurai, Asuka Shima, Yoshitsugu Sone, Mitsuru Ohnishi, Satoru Tachihara, Tsuyoshi Ito “Development of Oxygen Generation Demonstration on JEM (KIBO) for Manned Space Exploration” Proc. of 44th ICES [CD-ROM] ICES 2014-125

This document is provided by JAXA.