

月以遠有人ミッションを見越した水推進剤直接利用 タイプの新型 DC アークジェットスラスタ研究開発

○野川 雄一郎(スプリージュ)・田原弘一(大阪工業大学)

○Yuichiro Nogawa (Splije L.L.C.)・Hirokazu Tahara(Osaka Institute of Technology)

Abstract

Since 2011, we have been studying for new advanced type of electric propulsion system what we call WEPS (Water Electric Propulsion System) by using “waste water” produced in ISS or future manned space vehicles.

Our basic concept for this new advanced electric propulsion system is that modification with existing electric propulsion (DC Arc jet) system by changing its fuel. Regarding “the direct usage of water” as a propellant, we are planning to use the reclaimed waste water from Water Recovery System (WRS) in ISS Environmental Control and Life Support System (ECLSS) currently on orbit.

The first major step of this study is to develop a new gas generator to provide H₂O gas to Arc jet thruster. Per our experiment results so far, we found that our exiting mass flow controller could not produce enough water flow to ignite firing continuously due to H₂O liquid state. Osaka Institute of Technology (OIT) is developing a new type of gas generator which could provide sufficient H₂O gas with high flowrate to Arc jet. Recently, we succeeded in making new gas generator in firing by “H₂O only fuel” for a short period. Optimization for stable firing is still required.

1. はじめに

スプリージュは大阪工業大学との共同研究として WEPS (Water Electric Propulsion System)という水を直接推進剤とする新たな電気推進システム開発を継続中である。

水を推進剤とするメリットとしては、従来の毒性に強いヒドラジンなどに比べ格段に環境に配慮されたシステムになり得るという点、及び水を循環させた再利用システムの一環として機能させられるため、推進剤のための補給コスト削減に寄与できる点が挙げられる。さらに構造の単純化＝システム全体の軽量化を追求する上では水を電気分解して酸素と水素を生成し各々を推進剤とした推進システム、つまり従来型化学推進システムよりは軽量化及びシステム単純化が見込まれるため利点が多い。

数多くの電気推進スラスタシステムが存在するが、それらの中でも軽量化・低電力化達成が見込まれる DC アークジェットスラスタを採用することとした。構造的には既存の DC アークジェットスラスタをベースにし推進剤について従来のヒドラジン (N₂H₄) やアンモニア (NH₃) の代わりに”水”に置き換えるという方針で進めている。

2. 現時点 (2015 年) での研究開発計画

現時点での共同研究進捗状況を考慮した最新ロードマップについて図 1 に示す。

本システムについては軌道上宇宙機に既に存在する水を再利用する前提（つまり地上から衛星を打ち上げる際には水=推進剤の充填は実施しない）で運用シーケンスを検討している。

ISS の運用継続時期については日本や欧州含め 2024 年までの国際間協調運用継続は確定しているものの、現時点で確定している 2020 年までの ISS 運用期間中に WEPS 搭載型小型衛星の開発を達成する前提でスケジュールを検討している。2016 年前半でスラスタの開発過程を完了し、基礎的な設計フェーズ (BBM 製作) へと移行する予定である。

WEPS Roadmap in 2015

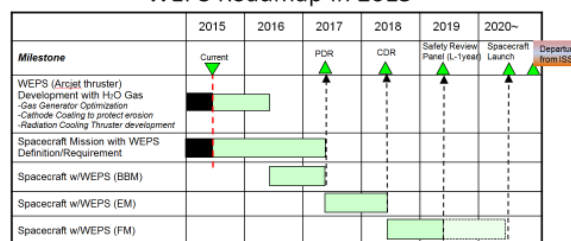


図 1 WEPS ロードマップ

3. ISS/JEM での衛星放出シナリオ詳細

ISS まで衛星を運ぶ手段として検討しているのがいわゆる Visiting Vehicle と呼ばれる無人補給船のうち JAXA/HTV(このとり)、Space X/Dragon、Orbital ATK/Cygnus のいずれかに与圧カーゴとして搭載させる案である。ここ数

年で頻繁に ISS から放出されるようになった Cubesat と同様の扱いである。ISS の与圧区画内に移動された WEPS 搭載小型衛星には推進剤未充填の燃料タンクが搭載されており、ISS 内にて再生処理をした水をタンクに充填した後に ISS 日本実験棟「きぼう」(Japanese Experiment Module: JEM) 内に装備されている曝露ペイロード船外搬出用のエアロックに装着される(図2参照)。

水は ISS クルーによって飲み水として消費された後、尿として排泄したり、エクササイズにより排出された汗などにより湿度が上がったりする。ISS の ECLSS システムの一部である水再生システム WRS(Water Recovery System)は尿をろ過・蒸留させて精製した水や上がった湿度を空調により凝縮水を精製させることで再利用できるよう再生処理している。この他には船外活動では冷却水が使用されるがその排水などもこの水再生システムで処理される。その他、CO₂除去や O₂生成と WRS は密接に関係している。

エアロックにより船外に搬出された衛星はその放出機器とともに ISS ロボットアームを使用して ISS から放出され、高度約 400km/軌道傾斜角 51.6 度の LEO 軌道に投入される(図2参照)。図3は Cubesat タイプより大きい衛星を直接放出可能な”Cyclops(サイクロプス)”と呼ばれる NASA 開発の放出機構を使用した例であり既に軌道上実績もある(図3参照)。我々も同様に~50kg クラスの衛星放出を予定しているため同様のシーケンスを想定している。



図3 NASA/Cyclops での ISS から球形小型衛星放出

3. WEPS デザインコンセプト詳細及び最新状況

DC アークジェットは人工衛星搭載実績豊富でかつ信頼度の高い電気推進システムである。ただしその典型的な燃料としては従来のヒドラジン (N₂H₄) やアンモニア (NH₃) と異なり酸素原子に対する腐食耐性を要求される水を使用するため、単純に注入する推進剤を置き換えるだけでは既存の DC アークジェットを拡張型に改良する必要がある。今回我々は WEPS 専用スラスタの独自設計開発を開始し、まずは水冷型のスラスタで新たに実験を開始した。

大阪工業大学で開発中の輻射冷却(部分水冷)式 DC アークジェットスラスタの断面図を図4に、DC アークジェットスラスタ外観を図5に示す。新型 DC アークジェットは、ノズル形状でカーボン製陽極、純タングステン製陰極、カソードフォルダは銅、外側は PBT またはボロンナイトライド製絶縁材を使用している。ノズル部は従来の銅からカーボンに変更した。水は酸素原子を含むため酸素によるエロージョンに対して抗力のある素材の陰極が望ましいため素材をカーボンに変更した。アークジェットの主放電電源も当初使用していた直流定電流電源装置からより安定した動作を可能にする PWM 方式の電源装置を用いた。

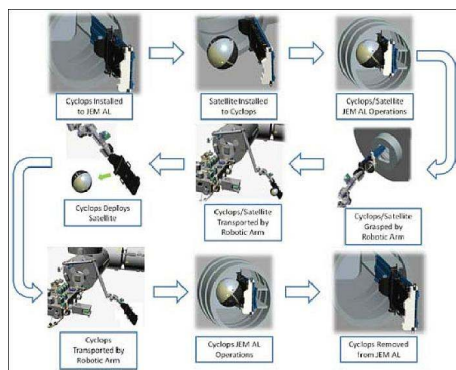
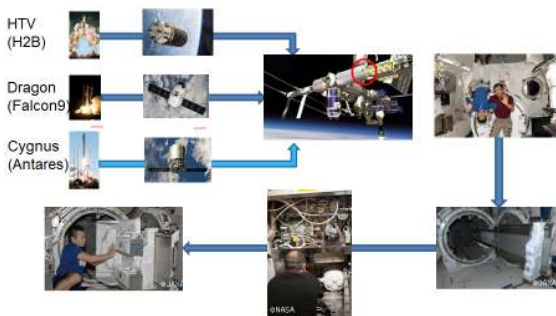


図2 ISS を利用した小型衛星放出構想

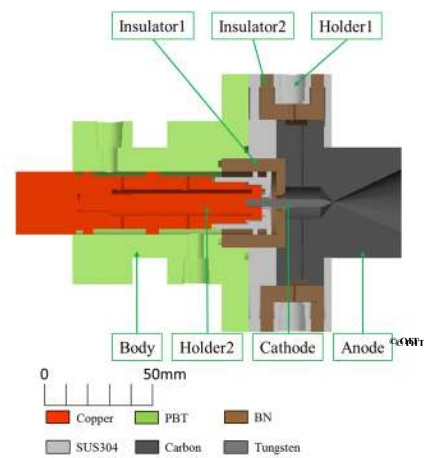


図4 新型 DC アークジェット断面図

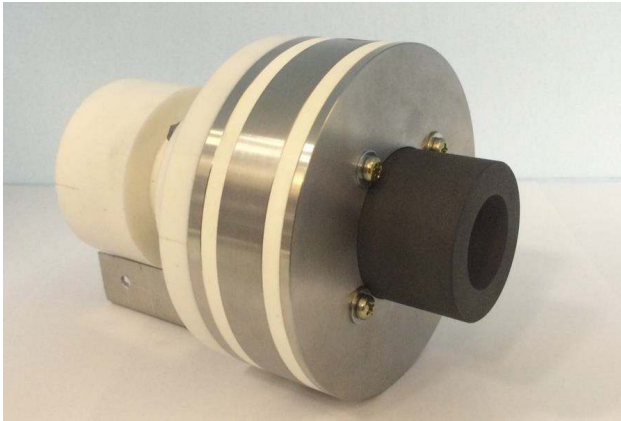


図5 新型DC アークジェットスラスタ外観

4. 実験設備

大阪工業大学では推進システムの実験設備としては国内屈指の規模を有しており、数多くの実験用真空チャンバを保有している。本研究で用いた真空チャンバは内径1.2m、長さ2mの円筒形で材質はステンレスである。真空チャンバの写真は図6参照。チャンバ内の圧力は約1Pa程度まで下げられる。

これまでの噴射実験の結果から、水単体で噴射させるためには水を液体のままスラスタに供給しても十分な噴射が実施できないことが確認されており、既にガス化した状態でスラスタに注入する。そして N_2 と H_2O の混合ガスからスタートして徐々に H_2O の比率を上げていくというアプローチで噴射実験を行っている。

ガスジェネレータの新規開発が必要となり、考案されたのが自動車エンジンのイグナイターに使用されるグロープラグを使用したガスジェネレータである。まだまだ安定した高速流量ガス供給化させるためには課題があるがこういった H_2O ガスをスラスタに安定した高速流量で注入できるシステム構築を目指している。



図6 真空チャンバ設備（大阪工大）

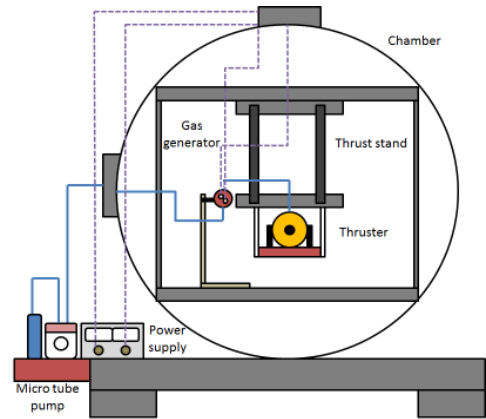


図7 チャンバ断面図

4. 実験設備

前項で述べた通り水単体を推進剤とするにはガス化が必要であるが最初から最後まで水単体のみでの噴射はまだ実現できていない。図8に示す通り混合比を限りなく H_2O のみで噴射させると独特の青色のプルームが見られた。2014年に初めて10秒間程度 H_2O 単体での噴射に成功して以降、より長時間で安定した単体噴射を目指して最適化を実施中である。

H_2O 単体噴射の後、陰極・陽極ともに損耗が激しくそれが原因で長時間噴射を困難としている。宇宙で長時間安定噴射を必須とする実ミッションに向けて克服すべき課題となっている。



図8 DC アークジェット噴射(H_2O 単体)

5. 今後の課題

WEPSに関する共同研究を進めていくうえでの現時点で識別している短期的・長期的の両側面での課題を以下に示す。

- 高速流量でかつ安定した H_2O ガスを供給できるガスジェネレータの開発
- 長時間 H_2O 単体での安定噴射可能な DC アークジェットスラスタの開発、特に陰極と陽極（特にコンストリク部）の酸素耐性の強い素材、加工技術の確立
- ISS から放出するために要求される 50kg クラス衛星の仕様及び ISS から提供される水の成分等条件についての調査及び検討（水燃料タンクの保温方法等）
- 衛星とスラスタとの I/F 及び衛星ミッション検討

6. 今後の課題

スプリージュと大阪工業大学は水を電気分解することなく直接推進剤とする新たな電気推進システム“WEPS”について共同研究を進めている。今まで単体噴射実績のない水を燃料にする場合の課題を識別し連続噴射による腐食耐性を要求されるため、既存 DC アークジェットスラスタに比べてエロージョン耐性のより強い陰極と陽極を作製すべく材料選定及びコーティング等で最適化を試みている。

今後ガスジェネレータを最適化し高速流量で H₂O ガスをスラスタに供給させるよう性能を向上させる予定である。

参考文献

1. Yuki Fukutome, “Performance Characteristics of Low-Performance Arcjet Thrusters using Low-Toxicity Propellants of HAN” 34th IEPC, Osaka Institute of Technology, July, 2015
2. Suguru Shiraki, “Performance Characteristics of Low-Power Arcjet Thruster Systems with Gas Generators for Water” 34th IEPC, Osaka Institute of Technology, July, 2015
3. Daniel R. Newswander, “Space Station Integrated Kinetic Launcher for Orbital Payload Systems(SSIKLOPS)- Cyclops” 27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2013
4. Y.Nogawa, “Water Electrical Propulsion System Combined with Manned Space Mission” 34th IEPC, Splije L.L.C, July, 2015