

# 次世代イオンエンジンの研究

The Research on the Next-Generation Ion Engine

宇宙先進技術研究グループ 早川 幸男、大川 恭志、宮崎 勝弘、吉田 英樹、北村 正治

Advanced Space Technology Research Group

Yukio Hayakawa, Yasushi Ohkawa, Katsuhiro Miyazaki, Hideki Yoshida, and Shoji Kitamura

## Abstract

This paper describes the status of the next-generation xenon-ion-engine research at IAT (The Institute of Aerospace Technology). A set of ion extraction grids, which had been pressed improperly in FY2004, was pressed again to obtain the designed shapes after reviewing the pressing process. Another set of ion extraction grids, whose peripheral regions were masked, was manufactured after this. Both results were unsatisfactory and it was finally found that important knowledge had been lost in the pressing process. However, each grid set was tested as a part of an ion thruster. A main cathode continuous operation to confirm the life of an impregnated cathode has begun and is continuing without any symptom of degradation in the cathode. Four neutralizers including two graphite-orifice-plate types were evaluated individually as a part of an ion thruster. One of the graphite-orifice-plate types showed satisfactory characteristics.

## 1. はじめに

これまでに打ち上げられた、あるいは計画中のイオンエンジンを搭載する衛星と探査機を Fig. 1 に示す。ETS-VIは南北位置保持用スラスタとしてイオンエンジンを採用した世界初の衛星として世界的によく知られている。ETS-VIII用エンジンは ETS-VIのそれに改良を加え、設計寿命を 16,000h 以上に伸ばしたものである。これらの他

に我が国には HAYABUSA に搭載された ECR 放電式イオンエンジンもあるが、この中で最大推力を発生するのは ETS-VI用のそれである。このクラスのエンジンについて、米国は HS601HP(BSS601HP) シリーズで、欧州は ARTEMIS でそれぞれ実現しており、日米欧の技術レベルに大差はない。

他方最大推力が 100mN クラスのものについてみ

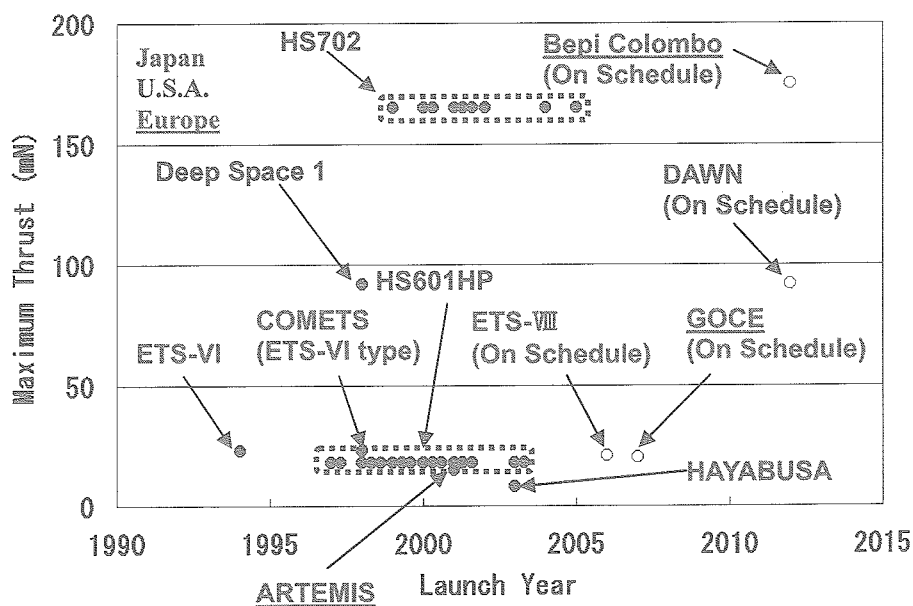


Fig. 1 Ion-Thruster Equipped GEO Satellites and Space Probes

ると、米国は 1998 年に 92mN のエンジンを Deep Space 1 で、1999 年に 165mN のエンジンを HS702(BSS702)で使用している。欧州は 2012 年打ち上げ予定の Bepi Colombo で使用する 175mN のエンジンを開発中である。我が国において現在開発計画は全くないが、宇宙開発において主要な役割を果たすことを目標とする以上、いずれ開発をせざるを得ない状況にある。

我が国には推力 30mN 以下のエンジンの開発経験はあるが、100mN クラス以上の経験はない。このクラス以上のエンジンの完成までには解決すべき特有の難題があり、いきなり開発を始めて資金と人材を大量投入しても直ちに解決できるものではない。予め問題となりそうな部分について研究し、解決の目処を付けておく必要がある。このような観点からこれまで本研究を独自に実施してきた。具体的な目標は、衛星や大型探査機に要求される大推力・長寿命のスラスタ製造技術並びにイオンエンジン試験技術の確立である。

次世代イオンエンジンの研究は、スラスタの性能に関しては平成 16 年度末までに中和器を除いて終了し、現在長寿命化と高信頼性確保が主なテーマとなっている。一方諸事情で一部の既確立技術が散失してしまっており、これらの再確立をする必要に迫られている。

## 2. 研究の概要

平成 17 年度は以下の項目について研究を実施した。

### (1) 200mN 専用イオン抽出電極(平成 16 年度未完了)

一般にイオン抽出電極は厚さ 1mm 未満の板状である。仮にこれを平板とすると、ある程度口径が大きくなった場合、予測不能の熱変形により電極間隔を一定に保つことが困難となる。そこで熱変形は避けられないとしてもそれを予測できるものとするために、その形状を平板のままとせず、皿状にする。当該電極は、製造工程の一部である皿状に成形する工程に問題があったために目的の形状に仕上がらず、昨年度の報告会までに試験を実施できなかった。平成 17 年度に問題の工程を見直して再成形し、スラスタに組み込んで試験を実施した。

### (2) 中空陰極(主陰極)

従来オリフィス板は金属製であり、そのままで 30,000h 以上の寿命を見込めた。にも拘わらず摩耗によるオリフィス径の拡大が抑制できれば、性能の大きな変化が避けられるという望ましい効果が期待できるので、金属製から黒鉛製に変更した。これにより、その寿命は半永久的と言っても差し支えないレベルにまで摩耗を抑えられるようになった。既に十分高い性能が得られ、平成 16 年度にヒータの断線問題も解決し、残る課題はインサートの寿命確認のみとなっていた。そのためには主陰極を長時間運転する必要があり、これを簡便に行なうための単体試験装置を設計製作して連続運転を開始しようとしたが、この装置の真空槽がクライオポンプによって励振されることが判明した。振動が中空陰極を損傷する可能性が高いので、これを抑制する策を講じ、長時間運転を開始した。

### (3) 中空陰極(中和器)

中和器はエンジンを接地した地上試験でも必要となるので、これまでにいくつか製作した。この限りにおいては性能は極めて劣悪なものでも足りるので、これまでは研究資源を他に振り向け、性能も特に評価してこなかった。黒鉛製主陰極の研究で確立した技術を利用して平成 16 年度に初めて中和器を製作したことを受けて、中和器の性能を正確に評価することになった。この結果を参考にしてより高性能の獲得を目指し、平成 16 年度製作の中和器の設計を見直して新たな中和器を設計製作した。

### (4) 口径 30cm イオン抽出電極

平成 16 年度のターゲット改良によって試験装置の一部であるヘリウム冷却装置への熱入力が大きくなり、推力 150mN で連続運転をするとクライオパネルの温度が規定値以下に維持できなくなりました。仮に連続運転で長時間試験を実施することを前提とすると、推力を下げる必要がある。口径を従来の 35cm に維持したまま推力を低下させて運転することも当然可能であるが、イオン抽出の条件が変わるので電極の耐久性を評価するのに適当でないだけでなく、イオンビームの発散角が大きくなり、地上試験ではターゲット以外の部分へ当たるイオンの割合が増えるので望ましくない。そこで口径 35cm の電極の周辺から 2.5cm の範囲の孔を塞いだ形となる実効口径 30cm の電極を製作し、スラスタに組み込んで試験を実施した。

尚この電極製作は、平成 16 年度に成形不良電極を発生させた製造工程の一部についての改良策の妥当性確認作業として行なわれた。

### 3. 成果の概要

#### (1) 200mN 専用イオン抽出電極

再成形作業自体は問題なく実施できたが、その結果は十分に満足できるものではなかった。これについては以下の (4) で述べる。それでも最初の成形後よりは若干改善されていたのと、更なる再成形は無意味と判断したのでそのままスラスタに組み込んで試験を実施した。結果は一応推力 200mN の発生には成功したものの、やはり成形不良のため当初の目的であったエイジング時間の短縮は実現できず、それどころかむしろ時間が増加してしまった。

#### (2) 中空陰極(主陰極)

主陰極(試験中のものと同一形状)の写真を Fig. 2 に、試験装置の概略を Fig. 3 に示す。当初真空槽の振動はひどく、他の機器はもとより、中空陰極を無用な振動で破損することは絶対に避けなくてはならないので、振動抑制策をいくつか試した。結局最後に採った策により振動は十分に抑制され、試験を開始することができた。

流量制御器は温度制御器でその温度を一定に保つようにし、気温の変化による流量の変化を抑制している。推進剤の消費量を減らすため、模擬電極の大部分にはマスクが施されている。これは実際のスラスタの放電室同様の磁石の設置と相まって、通常の推進剤流量の 10%以

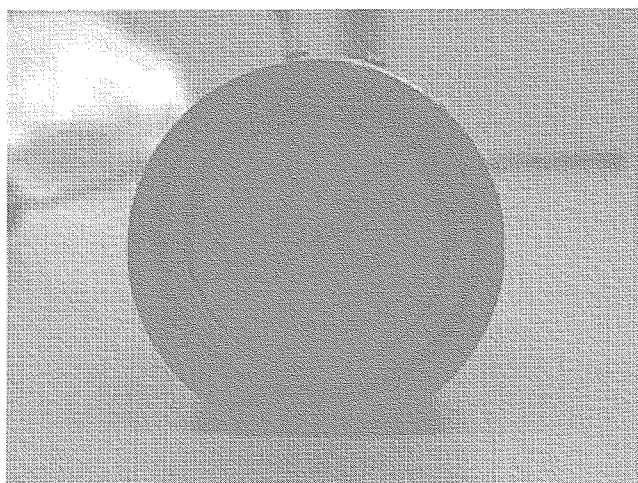


Fig. 2 Photo of Main Hollow Cathode with Metal Orifice Plate and Graphite Keeper Disc

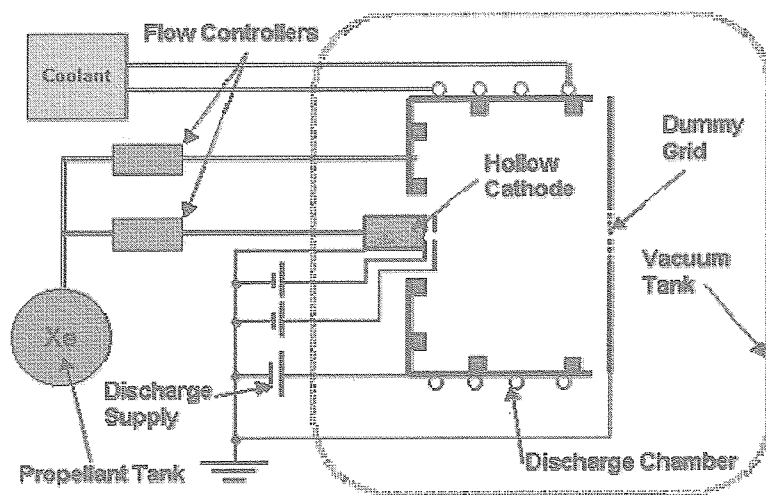


Fig. 3 Schematic of Main Hollow Cathode Testing

下の放電室流量で放電電圧(30 V)・電流(15 A)、陰極流量(250 mAeq.)の3つを同時にほぼ目標値とすることが可能となっている。実際のイオンエンジンと異なって放電室には何の輻射促進策も講じられていないので、磁石を保護するために水冷をしている。

試験結果を Fig.4 に示す。2006/03/03 に長時間試験を開始し、2006/10/03 時点で累積作動時間が4,220h に達し、尚試験続行中である。放電電圧は緩やかに上昇したが、これは模擬電極の孔の摩耗によりコンダクタンスが大きくなったことが原因で放電室内の圧力が低下したことによるものである。これは後に電極を未使用品

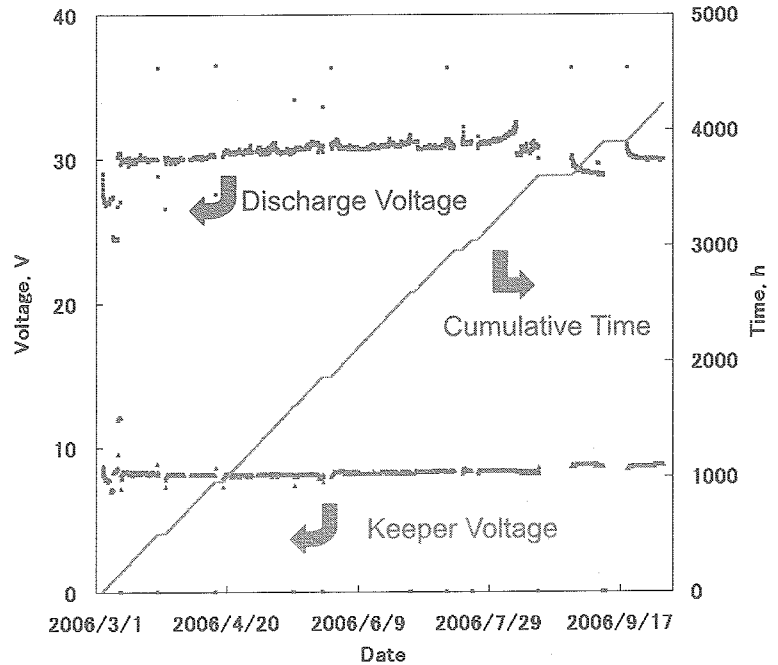


Fig. 4 Cumulative Time and Voltage Variation

と交換したら電圧が戻ったことで確認できた。試験対象であるインサートの劣化は放電電圧や特にキープ電圧の上昇として現れるが、これまでのところ劣化の兆候は全くない。尚、Fig. 4の放電電圧を示す点で37V付近のものは、電源の開放電圧に相当し、放電が停止していたことを示す。

これまでに突発停電により試験装置が停止したり、データ収集用コンピュータがハングアップしたりする等のトラブルに見舞われたが、主陰極に損傷を与えるような事態は発生していない。

### (3) 中空陰極(中和器)

中和器の写真を Fig. 5 に、試験装置の概略を Fig. 6 に示す。推進剤供給系は省略しているが、中和器にも推進剤を供給する必要がある。ビーム電源等は入力側トランスにより接地電位から直流的に絶縁されており、エンジンの対地電位は不定である。この状態でエンジンを運転すると、中和器の能力と推進剤流量によって対地電位が決まり、これを電圧計で読むことができる。宇宙ではエンジンの電位は衛星のそれに対応し、これが低下した分だけビーム電圧が低下したことに相当し、結果的に推力損失となる。さらに中和器に供給した推進剤は推力の発生に直接的に寄与するわけではないので、より少ない中和器流量でより小さい電位低下となる中和器がより優秀であると結論できる。尚、保安上中和器が突発的に停止した場合でもエンジン電位が約 100V 以上低下しないように保護回路を設置してある。

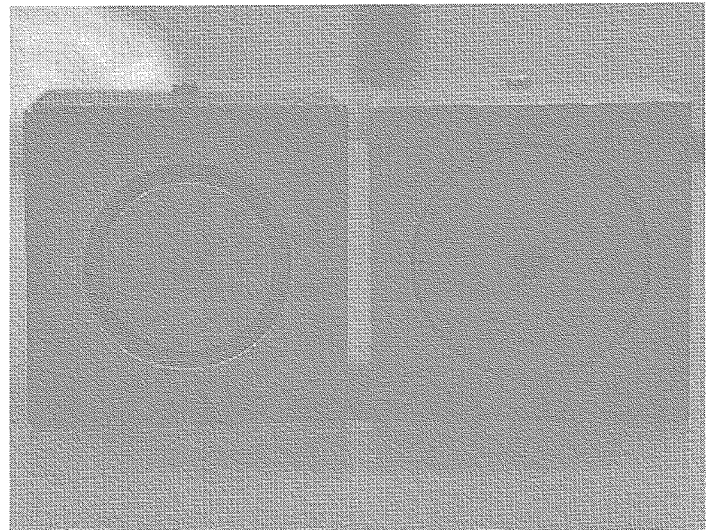


Fig. 5 Photos of Neutralizers: #2(Left) and #3(Right)

これまでにイオンエンジンに組み込んで評価した4本の中和器の性能を Fig. 7 に示す。#1と#2は以

前に製作した金属製オリフィス板使用、#3 と#4 は黒鉛製オリフィス板使用でそれぞれ平成 16 年度と 17 年度の製作である。特に#3 と#4 は耐久性を考慮し、インサートを大型化している。ビーム電流が 2.88A と 1.92A の 2 ケースについて測定を実施した。それぞれ推力約 150mN と 100mN に相当する。同一の中和器で、2.88A の場合の方が 1.92A の場合よりエンジン電位低下が小さいことがある。これは印加電圧が高い方が引き出し電流が小さいという、負性抵抗のような特性を意味しているが、原因は放電のモードが異なることによる。従って中和器の評価の際には、使用ビーム電流の全域に渡って特性を取得する必要がある。

どちらのビーム電流においても#2 が最高の成績を記録している。#2 の最小エンジン電位低下はどちらも約 16V であった。また電位低下の許容値を 30V とすると、必要流量は  $J_b=2.88A$  に対して約 70mAeq.、 $J_b=1.92A$  に対して約 30mAeq. であった。最小エンジン電位低下についてのみならば、#1 も#2 とほぼ同様、#4 は  $J_b=2.88A$  時のみ#2 とほぼ同様の成績を取めた。中和器はオリフィス板の摩耗については主陰極ほど深刻な状況に置かれてはいないので、インサートを大型化しても性能が高ければ金属製を選択することもありうる。

黒鉛製オリフィス板のものに限れば、#4 はあらゆる場合に#3 より性能が高く、#3 を採用する理由はない。#4 の必要流量は  $J_b=2.88A$  に対して約 130mAeq.、 $J_b=1.92A$  に対して約 110mAeq. であり、#2 と比べれば見劣りするものの、ビーム電流の 5~6%となっており、十分に満足

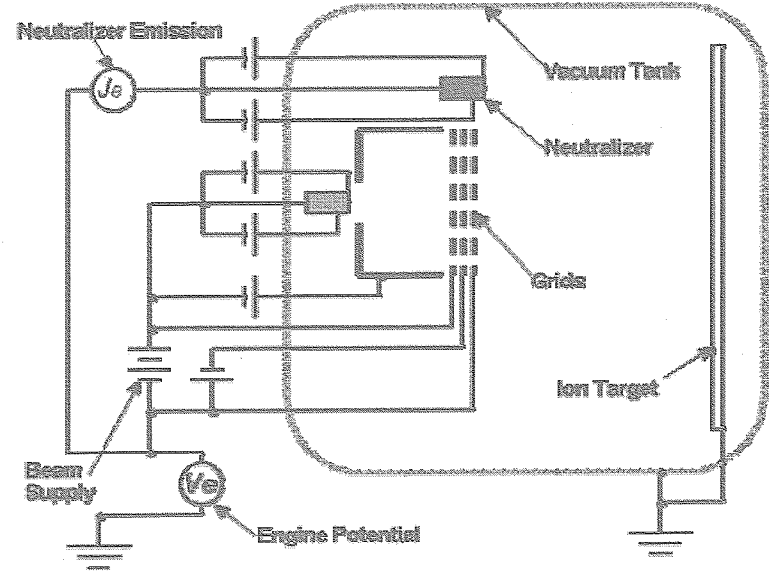


Fig. 6 Schematic of Neutralizer Testing

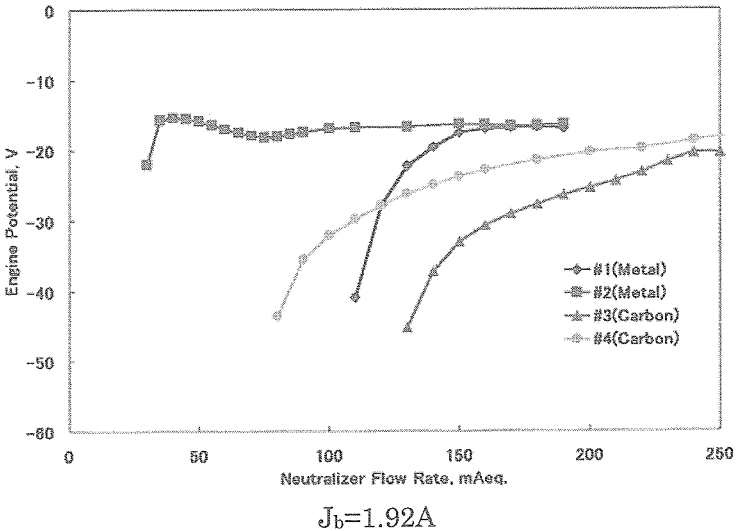
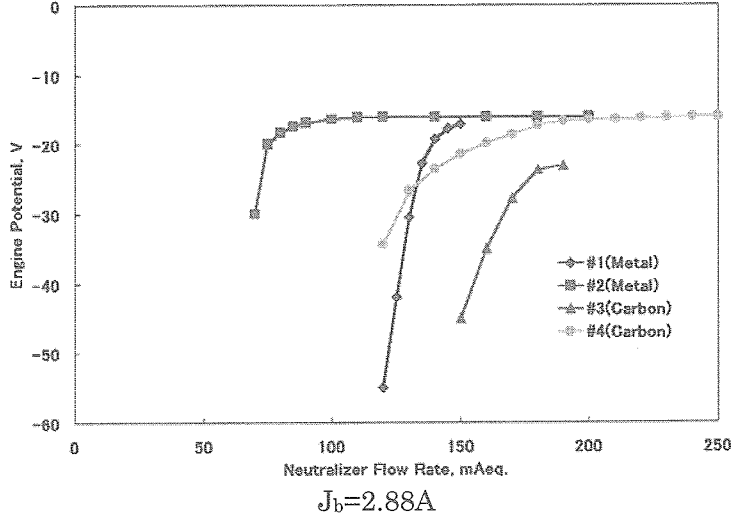


Fig. 7 Neutralizer Performance

できる性能である。

#4 はヒータ電流 9A において 5 分以内に放電開始可能であることを繰り返し確認した。尚、更に性能向上の可能性があるので、現在も改良を続けている。

#### (4) 口径 30cm イオン抽出電極

調査の末、平成 16 年度に電極の成形が不十分であった要因は、成形作業に不適切な部品が使用されたことであることが判明した。そこでこれを正規の部品とし、成形不十分な電極の再成形を試みたものの、その作業自体には問題はなかったが、結果は満足できるものではなかった。その要因は、成形前の状態が平板ではなく既に曲率の付いた板であったことであると推測できたので、再々成形は無駄と考えて断念し、口径 30cm 電極の製造で成型作業の妥当性を確認することにした。その結果、問題の正規部品が破損し、それが原因で成形が不十分なものとなってしまった。つまり、既に曲率の付いた板からの成形では問題とならなかったが、平板からの成形でこの部品に加わる力が過大になってしまったのである。結論は、この部品の使用法にノウハウがあり、以前の熟練作業者が退職してしまったために、適切な使用法が分からなくなってしまっていたということである。そのノウハウを再獲得する以外にも対策を既に考えてはあるものの、実際に試してみなければうまくいくかどうかは不明である。

電極の成型は不十分であったものの、減速電極を外した 2 枚電極としてならば動作する程度であったので、スラストに組み込んで試験を実施した。予想通り電極のエイジングには通常以上の時間を要した。性能の点では予想以上にイオン生成コストが高く(約 170W/A)、口径に合わせて放電室径を小さくする必要があることを確認した。

#### 4. まとめ

平成 16 年度内に成形不良のため試験を実施できなかった 200mN 専用イオン抽出電極について、成形工程の調査によって問題点を発見し、処置後に再成形を実施した。その後試験を実施したが、再成形も十分ではなかったため、当初のエイジング時間の短縮という目的は達せられなかった。

主陰極の単体試験装置の振動問題を解決し、長時間試験を開始し、2006/10/03 時点で 4,220h に達した。これまでにインサートの劣化は観測されず、順調に運転時間を更新している。

4 本の中和器の性能を評価した。平成 17 年度製作品は既に十分な性能を有しているが、更なる性能向上を目指す。中和器のインサートは主陰極のそれと異なるので、独立してインサートの寿命確認のための長時間試験がいずれは必要となる。

イオン抽出電極の製造工程の内、成型工程の技術が散失してしまった。これを速やかに再確立するための R&D が必要である。

#### [参考文献]

平成 16 年度総研本部・科学本部合同成果報告会前刷り集「次世代イオンエンジンの研究」、早川、大川、宮崎、吉田、北村、2005