高密度ヘリコンプラズマを用いた無電極電気推進計画 －HEAT プロジェクト

篠原俊二郎,[1] 西田 浩之,[1] 谷川 隆夫,[2] 羽田 亨[3] 船木一幸[4]
[1]*TUAT, Japan* 東京農工大学・工学研究院
[2]*Tokai U., Japan* 東海大学・総合科学技術研究所
[3]*Kyushu U., Japan* 九州大学・総合理工学研究院
[4]*JAXA/ISAS, Japan* 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

1. 目的および背景

高比推力を持つ電気推進機 (プラズマスラスタ) は長時間に及ぶ宇宙ミッションに適した推進システムであるが，従来型の電気推進システムではプラズマ生成・加速に用いる電極の損耗により寿命が制限されるという問題も未だ残されている．

無電極プラズマスラスタは，上記の電極損耗による寿命制限を打開する新しい電気推進の形の一つである．ここで無電極とは，放電電極 (アンテナ)が直接プラズマと接触しないことを指す．無電極プラズマスラスタの開発は，次世代型の宇宙探査において重要な研究トピックスであり, VASIMR, [1)] HDLT [2)] といった代表的な例以外にも, 様々なコンセプト [3-6)] が世界的にも研究されている．これら無電極プラズマスラスタのコンセプトにおいて，ヘリコンプラズマ源 [7,8)] が多く採用されていることが特徴である．このヘリコンプラズマ源は高密度 (~ 10^{13} cm^{-3}) で高電離 (> 数 10 %) のプラズマを，無電極において柔軟な運転パラメータで得ることができ，無電極プラズマスラスタに適したプラズマ源である．

無電極プラズマ加速方法としては様々なものが提案されているが，熱加速型 [1)] と静電加速型 [2)] が主である．一方で，無電極電磁加速型についてはほとんど研究例がなく, 確立された方法はない．電磁加速型のプラズマスラスタは高い推力密度を実現でき，また，ネックである推進効率も大電力運転 (高磁気レイノルズ数運転) 時には高い値を期待できる．有人火星探査などの次世代型宇宙探査に求められる高推力・高比推力な宇宙推進機，その有力な候補の一つである大型大電力電気推進機に適したプラズマ加速方式であるといえる．

我々はこれまでに HEAT (Helicon Electrodeless Advanced Thruster) Project を立ち上げ，電磁加速型無電極プラズマスラスタの実用化に向けた研究を行ってきている.[9)] 我々のスラスタコンセプトはヘリコンプラズマ源 (最大密度 10^{13} cm^{-3} 以上) を利用しており，それに合わせる無電極プラズマ加速方法として RF 波を用いた複数の方法について検討中である．

本稿では，まずヘリコンプラズマ源の開発について述べ，次に我々が提案している中で 3 つのプラズマ加速方式にフォーカスし，実施してきた理論的・数値的・実験的研究の現況について概要を述べる (但しそれぞれの詳細は他の原稿に譲る)：主として回転磁場 Rotating Electric Field (RMF), [9,10)] 回転電場 Rotating Electric Field (REF), [9-13)] イオンサイクロトロン/ポンデロモーティブ力 Ion Cyclotron Resonance/ Ponderomotive Acceleration (ICR/PA)[10)] を利用した方法である．ここでは、どの方法でも電極は直接プラズマに接触していないため，長寿命の運転が期待できる．前記 2 者では，発散磁場下で径方向磁場 B_r がある場合に，高周波を印加して周方向電流 j_θ を誘起して，$j_\theta \cdot B_r$ の軸方向の電磁力を用いるものである．

2. 高密度ヘリコンプラズマ源開発

初めに，装置内径 (i.d.) 74 cm で軸長 L_p が 最長 486 cm である世界最大の装置 Large Helicon Plasma Device (LHPD) [9,10,14-18)] について述べる. 高周波パワー P_{inp} の増加と共に，電子密度 n_e (アルゴンプラズマ) が，L_p によらず上昇した：放電は一般的に容量性結合型プラズマ (CCP) から，誘導性結合型プラズマ (ICP) を経て，数 kW 程度の P_{inp} で n_e が 10^{12}-10^{13} cm^{-3} 程度のヘリコンプラズマが得られた．L_p が 5.5 cm と小さくしても，$n_e \sim 10^{12}$ cm^{-3} 程度が維持できた．ここで A は 0.075 と世界最小であり，これはプラズマプロセスや推進分野で重要である．

次に小ヘリコンプラズマについて述べる．最近完成した Small Helicon Device (SHD) と名付けた装置で i.d. 1 cm の世界最小サイズでプラズマを生成した. i.d. 2 cm では $n_e \sim 8\times10^{12}$ cm^{-3} を既に得ている.[18)]

粒子生成効率について議論する．長い円柱型のプラズマで小口径，弱磁場の場合，N_e/P_{inp} は半径 a の 2 乗に比例する事が古典拡散による理論で予想される

This document is provided by JAXA

(N_e : 全電子数). [17] ここで、拡散は主として径方向である事から導かれる．図 1 より実験値は理論スケーリングと一致し，非常に高い粒子生成効率 (古典拡散に近い低損失) である事がわかる (赤丸は我々のデータ，破線は理論スケーリング). 右上のデータは LHPD (最大 2.1 m^3 の容積)，左下の 2 つは i.d. 2.5 cm (世界最小容積 23 cm^3) と i.d. 2 cm の SHD の結果である．

一方，短い円柱型のプラズマで，大口径，強磁場の場合，N_e/P_{inp} は L_p に比例する事が理論的 (古典拡散) に予想される.[17] ここで，拡散は主として軸方向である事から導かれる．N_e/P_{inp} と L_p の関係を LHPD と Large Diameter Device (LDD) [15] で実験的に調べ，(図はないが) 理論と一致し，これも高い生成効率である事がわかる．

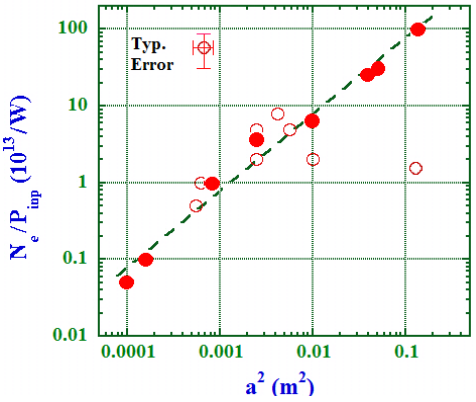


図 1　種々の装置での粒子生成効率 N_e/P_{inp} と半径 a との関係 (破線の理論スケーリングも示す)

3.　無電極電磁プラズマ加速法

ここでは，我々が提案している 3 つのプラズマ加速法について述べる：回転磁場 (RMF)，回転電場 Rotating Electric Field (REF)，イオンサイクロトロン/ポンデロモーティブ力 (ICR/PA) を利用した方法である．

3.1.　回転磁場型加速 (RMF 加速)

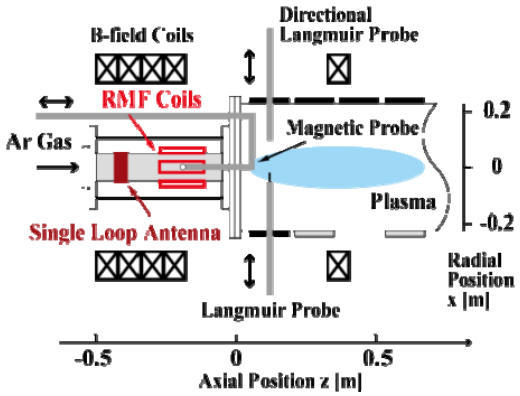


図 2　LMD における RMF 実験図

RMF による初期実験を Large Mirror Device (LMD)[19] を用いて行った (図 2 参照)．この RMF による周方向電流駆動機構は，磁場配位が異なるが核融合分野での Field Reversed Configuration (FRC)[20] での研究によって実証されている．本実験では SUS の真空容器に取り付けた i.d. 5 cm，長さ 50 cm の石英管に RMF コイルを 10 ターン巻いた．またヘリコンプラズマを生成するために，幅 4 cm のシングルターンのアンテナを取り付けた．

ここで，RMF のプラズマ内への浸透を調べるのは重要であり，この条件は γ (RMF を用いたホールパラメータ) と λ (スキン長で規格化したプラズマ半径) で表される．[20] 十分な浸透を得るには，高い γ/λ の値が必要である．即ち大きい RMF と小さい n_e，f_{RMF} (RMF 印加周波数)，a，アルゴン圧力，プラズマ抵抗が求められる．一方推力は，n_e，f_{RMF}，径方向磁場，a^3 に比例するので，上記条件と上手くマッチするようパラメータを決める必要がある．

RMF 浸透の初期実験結果は以下である．1) プラズマ無しでの磁気プローブを用いた径方向分布は，プラズマ有り [但し理論的に浸透する条件 [20]] での結果と良く一致した (図 3 参照)．理論的に浸透しない条件でも，RMF が浸透する場合もあった．2) RMF コイル電流の増加と共に，プラズマ中の RMF 強度は大きくなった．現在この方法によるプラズマ流とプラズマパラメータの変化について調べている．

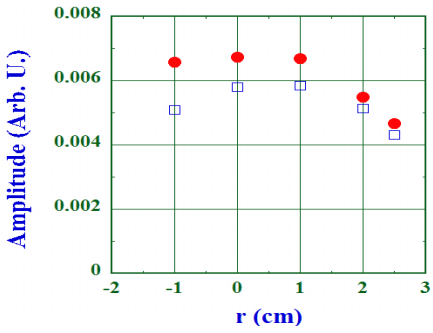


図 3　RMF の径方向分布 (丸はプラズマ有り、ボックスはプラズマ無し)

プラズマと壁の相互作用の低減、より大きな推力，及び計測の容易さを考慮して，図 4 に示すように，内径 5 cm の石英管を広げ内径 10 cm から 17 cm となるようなテーパー状の石英管放電部を作製した．また電磁力に必要な径方向磁場を更に上げるため，永久磁石を設計・設置 (石英管テーパー部) し高密度放電に成功した (図 5)．なお RMF 実験結果と種々のプラズマ計測の詳細は他の稿で述べる．

This document is provided by JAXA

今後この加速法においては，流体論や運動論を用いて以下のプロセスを考慮する必要がある．1) RMF の浸透と誘起された周方向電流，2) プラズマが回転するまでの時間スケール，3) 電子の軸方向流と 1 / f_{RMF} で規格化した加速領域での電子の通過時間，4) 発散磁場下での電子電流によるプラズマ加速，5) プラズマ・デタッチメント．

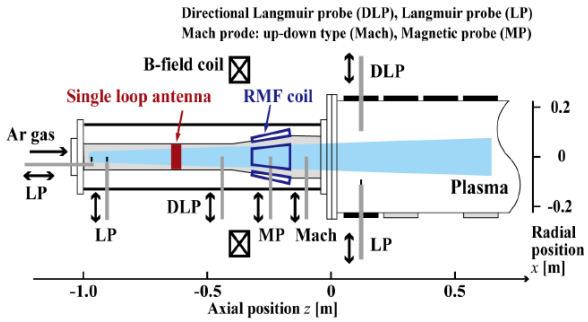


図 4　新規のテーパー部を用いた石英管 (放電部)

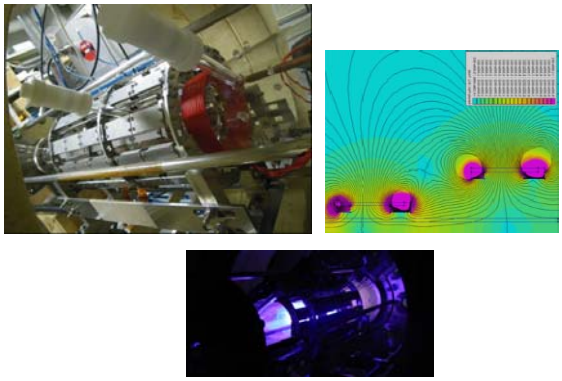


図 5　(上左) テーパー石英管上に設けた永久磁石類，(上右) 設置した永久磁石による磁場配位，(下中央) テーパー石英管と永久磁石下での高密度放電写真

3.2.　回転電場型加速 (リサージュ加速)

回転電場型プラズマ加速を用いたヘリコンプラズマスラスタの概念図を図 6 に示す．発散磁場中において周方向に回転する径方向電場を，2 対の対向平板型アンテナより印加する．イオンと電子のサイクロトロン周波数の間に設定された周波数の回転電場は電子のみを駆動し，E×B ドリフトによって磁場の周りを回転運動する．径方向に密度勾配が存在する場合，全電子の E×B ドリフト回転運動を足し合わせることで定常な周方向の電流を取り出すことができ (図 7 参照)，この電子周方向電流と発散磁場の径方向成分によるローレンツ力によってプラズマを軸方向に加速する．この回転電場による加速方式をリサージュ加速と呼んでいる．

これまで，加速法の実証を目的とした研究を進めてきた．2 次元 PIC (Particle-In-Cell) シミュレーションでは，周方向電流生成が確認できており，[11] また松岡らによる理論推力モデルでは，大電力・大型化によりリサージュ加速が有利になることが示唆されている．[12] しかしながら，スラブでなく円柱での電場浸透についても考慮する必要がある．

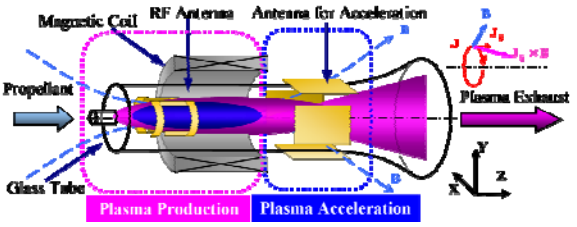


図 6　回転電場 (リサージュ加速) 型ヘリコンプラズマスラスタの模式図

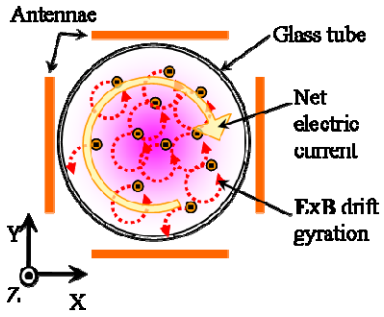


図 7　E×B ドリフト運動の重ね合わせによる周方向電流生成

実験室モデルを用いたプラズマ加速の実証実験を行っている例で，図 8 にマッハプローブによる流速の軸方向分布計測結果を示す．回転電場 (REF) の印加により，プラズマ加速領域 (-25 mm < z < 25 mm) において流速が増加している．しかしながら，z = 40 mm の位置では加速効果がほぼ失われており，また，プルームの計測結果から推算される推力は推力モデルが予測する値よりはるかに低い．[13] これは流速の遅い中性粒子との衝突や壁面へのプラズマロスなどが原因として考えられる．

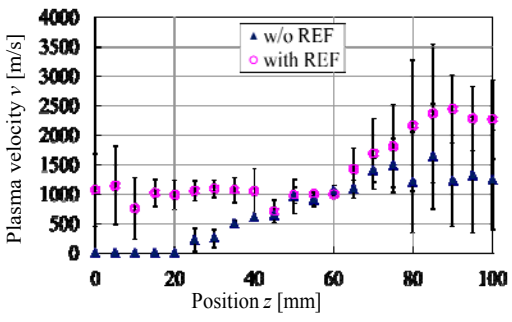


図 8　流速の軸方向分布

This document is provided by JAXA

プローブによる計測では，中性粒子との衝突によるプルームの減速の影響や壁へのロスによる密度減少の影響 (S/N 比の悪化) が免れえない．そこで，振子型スラストスタンド (全推力と電磁力測定と 2 方法) の開発も行っている. 回転電場を印加しない状態において， 推進剤 (Ar) 流量，軸方向磁場強度，スラスタ内径 (26，50，100 mm) を変えて推力計測を行った．パワーと共に電子密度 n_e，プラズマ光強度 I は上がり，あるパワーを境に急激な n_e と I の増加が見られた。また，より大きなスラスタ径 (100 mm) が有効であり，全推力は 11 mN，比推力は最大で 830 秒となった (図 9)．今後，より条件を最適化してゆくための実験を行う必要がある．

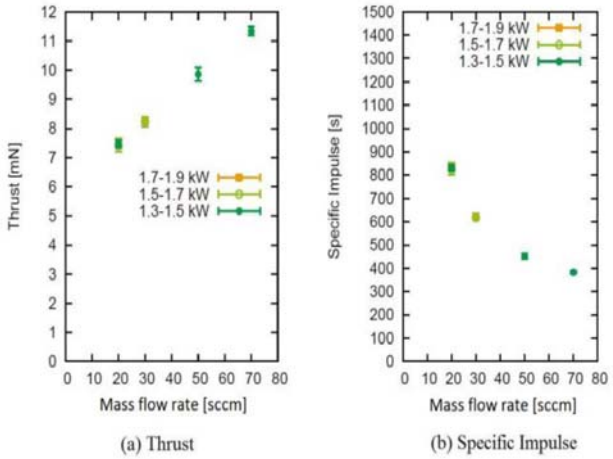


図 9　(左) 推力，(右) 比推力の質量流量依存性

3.3.　ICR/PA 加速

ここでは ICR/PA について議論する．イオンは ICR により磁場に垂直方向に効率良く加熱され，発散磁場下ではイオンは弱磁場方向に進むため，垂直方向のエネルギーが平行方向のエネルギーに変換される．更に共鳴点近傍に波動密度を高めるように印加すると，電磁的なポンデロモーティブ力 [20] によりイオンは平行方向に加速される．

ICR と PA の効果は分離が出来ないが，後者の方は望ましい．なぜなら後者の方がイオンラーマ―半径が小さいため，プラズマと壁との相互作用が小さくなるためである．PA による推力は定式化され，ポンデロモーティブによるポテンシャルは，$(q^2/4m)\,[E_{rf}{}^2 / (\omega^2 - \Omega_{ci}{}^2)]$ のように表される．ここで，q，m，E_{rf}，ω，Ω_{ci} はそれぞれ，イオンの電荷，イオンの質量，印加高周波電場，印加電場角周波数，イオンサイクロトロン角周波数である．

図 10 にイオン速度 v_b を変えた場合の，(上) (z, v_z) 平面でのイオンの軌跡，(下) $(\varepsilon_\perp, \varepsilon_{//})$ 平面でのイオンエネルギーの増加，の典型的例を示す．ここで $\varepsilon_{//}$ と $\varepsilon_\perp$ は磁場に平行と垂直方向のイオンエネルギーを示す．イオンエネルギーの増加量 $\Delta\varepsilon$ を、種々の外部パラメータを変えて調べ，ICR/PA は ICR 単独よりもイオンエネルギーの増加が大きい事が分かった．

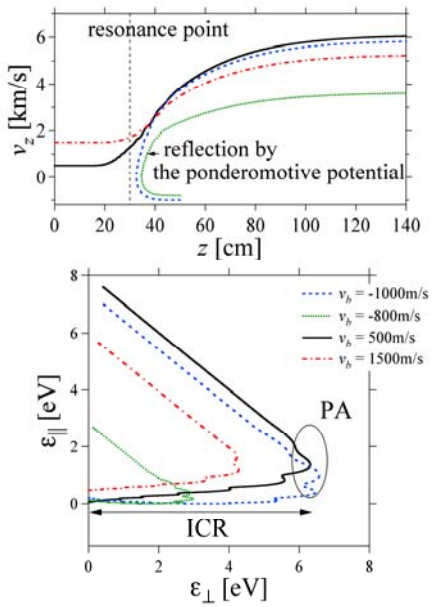


図 10　(上) (z, v_z) 平面でのイオンの軌跡，
(下) $(\varepsilon_\perp, \varepsilon_{//})$ 平面でのイオンエネルギーの増加

次に図 11 には $\Delta\varepsilon_{//}$ と $\Delta\varepsilon_\perp$ のビームの速度 v_b 依存性を示す。v_b の小さい領域では $\Delta\varepsilon_{//}$ と $\Delta\varepsilon_\perp$ の双方が大きいが，準線形理論から離れて来ており数値も飽和している。これは軸方向への加速での滞在時間の減少によるものである。理論的には大雑把には $\Delta\varepsilon_{//}$ は $\Delta\varepsilon_\perp$ の 16 % 程度である。

またこれらの計算法により，中性粒子や壁の影響も考慮して，種々のガス種による推力の比較評価も行っている．

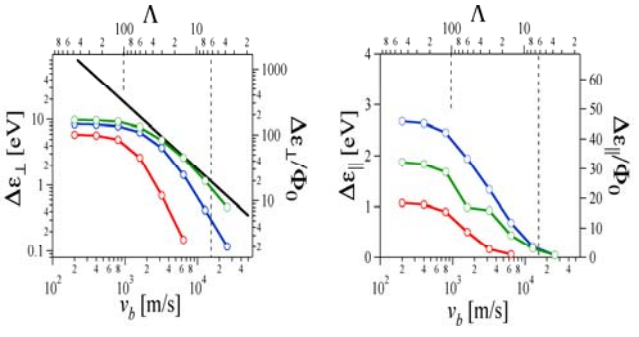


図 11　(左) $\Delta\varepsilon_\perp$ のビームの速度 v_b 依存性，
(右) $\Delta\varepsilon_{//}$ のビームの速度 v_b の依存性

現在，Tokai Helicon Device (THD) を用いて，粒子間衝突とプラズマ壁相互作用を考慮しながら，この方法による実験・実証を始めている．

This document is provided by JAXA

4. まとめ

独特な方法による高密度ヘリコンプラズマの開発と特性評価を，世界最大口径，最小口径，最小アスペクト比，最大軸長などを例に述べた．また非常に良い粒子生成効率を，古典拡散モデルによって 2 つの場合 (拡散が径方向または軸方向) について説明できた．

次に HEAT プロジェクトのレビューとして，ヘリコンプラズマ源の新概念のプラズマ推進法について述べた．ここでは無電極 (プラズマと電極が直接触れない) のため, 長寿命の運転が期待できる RMF, REF, ICR/PA の 3 つの研究を実験と理論・シミュレーションで進めている．現在周方向モード $m = 0$ の加速[10)]についても、追加候補として研究を始めた．

我々が提唱している推進法を実証するには，理論的研究と共に種々の外部パラメータを実験的に変えて調べる必要がある．また以下のような計測法についても更に開発が必要である:静電プローブ (多チャンネル化したラングミュアープローブ，マッハプローブ，イオン静電アナライザー)，光測定 (レーザー誘起蛍光法、可視分光法，高速度カメラ測定法)，スラストスタンド．

5. 謝辞

本研究の無電極プラズマ推進プロジェクト遂行にあたり、大きな貢献をされて来られました故都木恭一郎教授には一同心から感謝致します．篠原研究室，西田研究室の学生諸子には実験を行うに際し協力を得ました．本研究は科学研究費補助金 基盤研究 (S) 21226019 の補助等を受けて行われました．

参考文献

1) Franklin R. Chang-Díaz, *Sci. Am.* **283**, 90-97 (2000).
2) C. Charles, R. W. Boswell, A. Bouchoule, C. Laure and P. Ranson: *J. Vac. Sci. Technol.*, A **19**, 661-663 (1991).
3) G. D. Emsellem, and S Larigaldie: *44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propul. Conf. & Exhibit*, AIAA 2008-5009 (2008).
4) Y. Yasaka, S. Nishino, M. Yamamoto, S. Nakamoto, H. Takeno and H. Yonemori: *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, AIAA2011-1072 (2011).
5) T. Enoki: *Proc. of 28th Int. Symp. on Space Technol. & Sci.*, ISTS-2011-b-46 (2011).
6) A. Shabshelowitz and A. Gallimore: *32nd Int. Electric Propul. Conf.*, IEPC-2011-166 (2011).
7) R. W. Boswell: *Phys. Lett.*, **33A**, 457-458 (1970).
8) S. Shinohara: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36**, 4695-4703 (1997). (Review Paper)
9) S. Shinohara *et al.*: *Phys. Plasmas*, **16**, 057104-1~10 (2009).
10) S. Shinohara *et al.*: The Heat Project, *32nd Int. Electric Propul. Conf.*, IEPC-2011-056 (2011).
11) H. Nishida, T. Nakamura, I. Funaki, S. Shinohara, T. Hada and T. Tanikawa: *The Asian Joint Conf. on Propul. and Power 2010*, AJCPP2010-063 (2010).
12) T. Matsuoka, I. Funaki, T. Nakamura, K. Yokoi, H. Nishida, T. S. Rudenko, K. P. Shamrai, T. Tanikawa, T. Hada and S. Shinohara: *Plasma Fus. Res.*, **6**, 2406103-1~4 (2011).
13) T. Nakamura, K. Yokoi, H. Nishida, S. Shinohara, I. Funaki, T. Matsuoka, T. Tanikawa, T. Hada, K. P. Shamrai and T. S. Rudenko: *32nd Int. Electric Propul. Conf.*, IEPC-2011-279 (2011).
14) S. Shinohara *et al*.: *Rev. Sci. Instrum.*, **75**, 1941 -1946 (2004)
15) S. Shinohara *et al*.: *Plasma Sources Sci. Technol.*, **19**, 034108-1~7 (2010).
16) T. Motomura, S. Shinohara, T. Tanikawa and K. P. Shamrai: *Phys. Plasma*s, **19**, 043504-1~12 (2012).
17) T. Tanikawa and S. Shinohara: *Int. Cong. on Plasma Phys.* (2004) URL:http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00002013/en/.
18) S. Shinohara *et al.*: Trans. Fusion Sci. Techonol., in press.
19) S. Shinohara, S. Takechi and Y. Kawai: *Jpn. J. Appl. Phys*. **35**, 4503-4508 (1996).
20) R. D. Milroy: *Phys. Plasmas*, **6**, 2771-2780 (1999).
21) I. Y. Dodin, N. J. Fisch and J. M. Rax: *Phys. Plasmas*, **11**, 5046-5064 (2004).

This document is provided by JAXA