

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24654187

研究課題名(和文) ビーム加速用反射型負イオン源を用いた新規イオンエンジンの開発

研究課題名(英文) Development of the new type ion engine using a reflected-type negative ion source

研究代表者

安藤 晃 (Ando, Akira)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90182998

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、反射型イオン源をもとにしたイオンエンジンを開発し、中和器のない長寿命運転と、推進剤利用を飛躍的に向上させることを目的とし、実験研究を行う。具体的な実験内容としては、イオン源の製作、レーザー光脱離法による負イオンの計測、カusp磁場の配置による性能改善試験、ビーム引き出し実験等である。カusp磁場の配置により、負イオン源としての性能が向上し、引き出される負イオンビーム電流が向上することがわかった。これらの実験の成果により、反射型イオン源を開発するにあたり必要な基礎データをひと通り揃えることに成功した。

研究成果の概要(英文)：The main objective of this research is the development of the ion-engine using the reflected-type negative ion source. The experiments were performed in our previously-developed RF ion source and the extraction of the negative ion beam from the source was tested. The acceleration electrodes consist of a molybdenum plasma grid, copper extraction and acceleration grids. The extraction and acceleration voltage can be applied to 10 kV and 20 kV, respectively. The results show that the ratio of the negative ion in the extracted beam can be changed by the extraction voltage and it reaches about 10%. In addition, the arrangement of the cusp magnetic field around the source improves the performance of the negative ion source.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：イオン源

1. 研究開始当初の背景

近年の宇宙開発は、宇宙ステーションを中心とした近地球ミッションと、火星以遠の惑星探査を目的とした深宇宙ミッションの両輪で進められている。推進剤をプラズマ化し、電磁力や静電力を利用したイオン加速を用いた電気推進(プラズマ推進)技術は1990年代以降に徐々に実機搭載が進められ、近地球・深宇宙用の推進機としてアークジェット、ホールスラスタ、イオンエンジンなど特徴ある推進機が開発されている(R.H. Frisbee, J. Propulsion and Power, 19, 1129 (2003))。中でもイオンエンジンは、高非推力を実現し、わずかな推進剤燃料で長時間の運転が可能な推進機で、わが国でも2003年に打ち上げられ7年の宇宙航行の後に地球に帰還した「はやぶさ」に搭載され、その有用性と信頼度が実証された。しかし、正イオン源と中和器という構成が長期運用にとって大きな故障要因となることも明らかとなり(S.Hosoda, H.Kuninaka, J. Plasma Fusion Res. 86, 282 (2010), A. Fujiwara, et al., Science 312, 1330 (2006).) 次世代のイオンエンジンでは新たな発想を用いたイオン源開発が急務となっている。

本研究は、核融合研究における中性粒子入射(NBI)用負イオン源開発、特に高周波を用いた定常水素負イオン源の開発研究(A. Ando, et al., Rev. Sci. Instrum., 81, 02B107 (2010).)と、宇宙推進用プラズマ加速研究(A.Ando, et al., Trans. Fusion Sci. and Tech., 51, 72(2007).)で得られた知見から、反射型負イオン源を用いることで、正イオンの同時引き出しを行い中和器を必要としない効果的な定常イオンエンジンが開発できることを着想し、本研究を実施した。

2. 研究の目的

応募者のこれまでの研究によって進められてきたNBI用負イオン源開発、宇宙推進用プラズマ加速研究によって得られた成果をもとに、中和器を必要としないイオンエンジンを実現するために必要な実験的検証を行う。本研究では、反射型負イオン源をもとにしたイオンエンジンの開発にむけ、正イオンだけでなく負イオン生成に必要な高周波プラズマ生成と推進剤利用効率(ガス圧特性)等の動作特性を実験的に明らかにする。正イオンと負イオンのみから構成されるイオン性プラズマを効率よく生成するために必要な条件を見出すことを目的に研究を実施した。

3. 研究の方法

本研究の目的であるイオンスラスタを開発し、長寿運転と、推進剤利用を飛躍的に向上させることを実現するため、正イオンと負イオンのみから構成されるイオン性プラズマを効率よく生成するために必要なプラズマ条件を見出す。想定されるイオンエンジンは「はやぶさ」イオンエンジンとして用い

られた $\mu 10$ イオンエンジンの大きさ相当で、ビーム引き出し口径が10cm相当のイオン源開発を目指している。そのため、同程度の大きさのイオン源を用いて内部のプラズマ密度などパラメータ計測を行い、高周波を用いた高密度プラズマ生成とイオン源からのビーム引き出し特性を実験的に明らかにする。イオン性プラズマを効率よく生成するために必要な制御条件(RF電力や動作圧力など)を明らかにしイオンスラスタとしての評価研究を実施する。

4. 研究成果

(1) イオン源の構成とプラズマパラメータの計測

本研究では、正イオンと負イオンのみから構成されるイオン性プラズマを効率よく生成するために必要な運転条件の検討を実施した。イオン源として、図1に示すような高周波イオン源を用い、動作ガスとしては水素を用いて実験研究を行った。図1の高周波イオン源では、円筒形セラミック容器の外周にRF結合用コイルアンテナ設置し(外部アンテナ方式)、高周波電流をアンテナに流すことで容器内部(生成部)に高周波プラズマを生成する。プラズマパラメータの計測として、静電プローブを用いてプラズマ密度と温度の計測を行った。結果を図2に示す。ここで、図中の P_{RF} は高周波プラズマに投入した高周波電力を示す。高周波電力が増大するとともに、電子密度が増大しているのがわかる。一

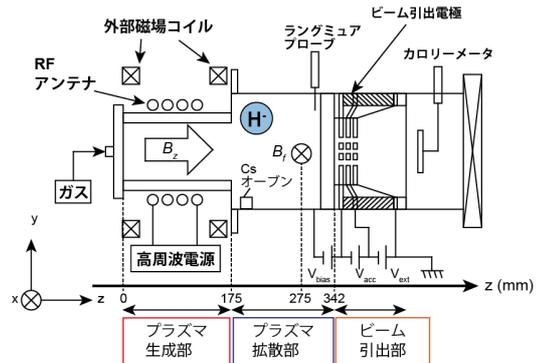


図1: 実験装置概略図

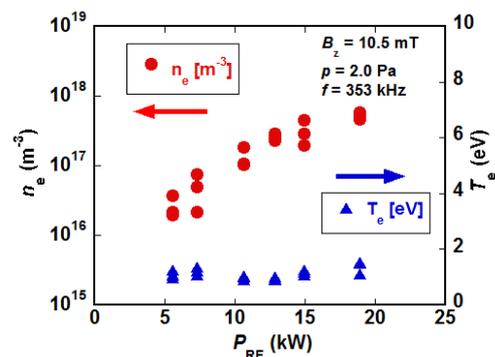


図2: プラズマ拡散部($z = 287$ mm)における電子密度・温度のRFパワー依存性

方で、電子密度はほぼ一定値の $1e^9$ を推移していることがわかる。

(2) レーザー光脱離法による負イオンの計測

イオン源内で生成される負イオンの計測を行った。計測系の概要を図3に示す。イオン源の動作ガスには水素を用いた。負イオンの計測にはレーザー光脱離法を用いる。レー

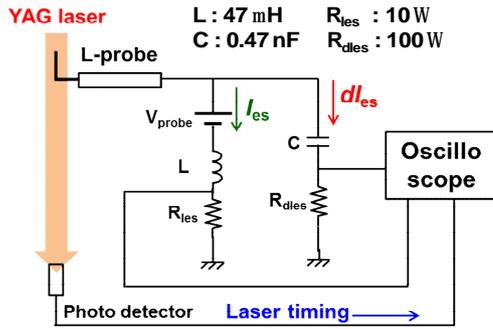


図3：レーザー光脱離法による負イオン計測の計測手法。 I_{es} は電子飽和電流。 dI_{es} は脱離電子電流。

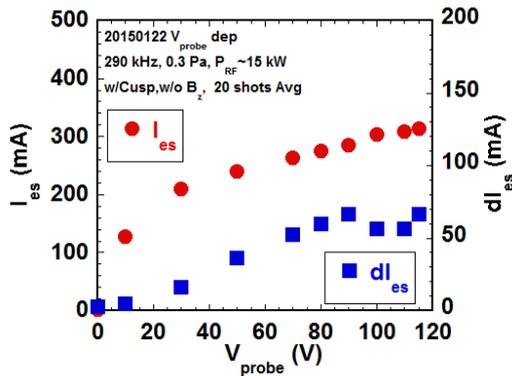


図4：電子飽和電流と脱離電子電流のプローブ電圧依存性

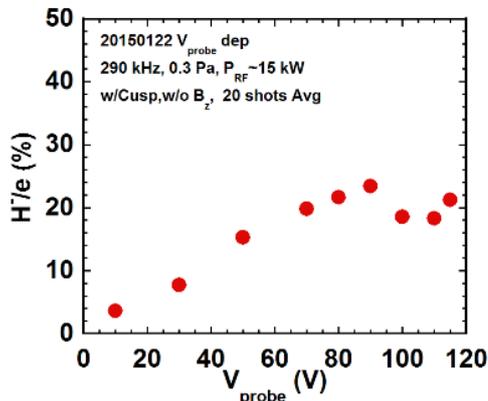


図5：水素負イオン / 電子の密度比のプローブ電圧依存性

ザー光脱離計測では、プラズマにレーザーを入射し、光脱離反応($H^- + h\nu \rightarrow H + e^-$)によって生じた脱離電子を、レーザーと同期して正にバイアスされた静電プローブによって検出する手法である。具体的には、プラズマ中の電子飽和電流と、YAG レーザーの入射により水素負イオンから脱離した電子による脱離電子電流の比から電子密度と負イオン密度の比を求める。この手法は、イオンが微量濃度でも計測が可能であるという特徴を持つ。また、この計測手法と、往來の静電プローブ法を利用し、高周波イオン源内部のプラズマ諸量の観測と負イオン生成量の相関を調べた。結果を図4、5に示す。図4に示した脱離電子電流と、電子飽和電流の比から、図5に示した負イオン / 電子の密度比が算出される。これらの結果より、本イオン源内でもレーザー光脱離法による負イオンの計測が行えること、負イオン密度の割合の定量的評価が行えた。一方で、水素負イオン以外の負イオンがプローブで計測されている可能性もあるため、より精度の高い計測を行うことを目指して、さらなる装置の改良を進めている。

(3) カスプ磁場の影響と効果

容器内で生成したプラズマは容器壁に向かって拡散していく。容器内での高密度のプラズマを達成するためには、この拡散損失を

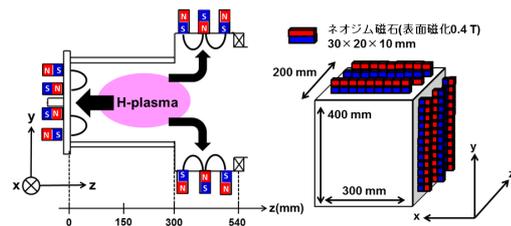


図6：ネオジウム磁石によるカスプ磁場の形成

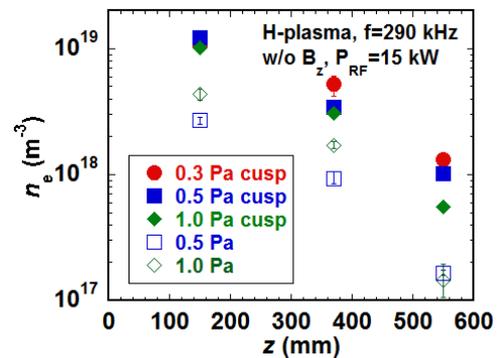


図7：カスプ磁場を形成した場合と形成しない場合における電子密度の軸方向分布

低減させる必要があり、そのための手段の一つとして、磁場による閉じ込めがある。本研究では図6に示したように、ネオジウム磁石を用いてカスプ磁場を形成し、その影響についての評価を行った。カスプ磁場を形成した場合と、形成しない場合とでの電子密度の軸方向分布を図7に示す。結果より、カスプ磁場の形成により、低ガス圧(0.3Pa)でもプラズマが生成することを確認し、また電子密度が大きく増大することが確認された。これは、カスプ磁場によるプラズマ拡散の抑制効果が顕著に現れた結果である。

(4) ビーム引き出し実験

ビームの引き出しには直流高電圧による静電加速方式を用いた。ビーム加速系全体の概略図を図8に示す。3枚の高電圧電極であるプラズマ電極(P.G)、引き出し電極(EXG)、接地電極(GDG)を用いてビーム引き出しを行う。プラズマ電極と引き出し電極の間には引き出し電圧(V_{ext})が印加され、引き出し電極と接地電極の間には加速電圧(V_{acc})がそれぞれ印加される。引出電源に流れる電流 I_{ext} は、ビーム中で偏向された電子電流と負イオン電流を足しあわせたものである。一方、加速電源に流れる電流 I_{acc} は接地電極に衝突した負イオン電流及び接地電極を通過した負イオン電流の和である。すなわち、 I_{ext} 及び I_{acc} の測定により、電子電流と負イオン電流の両者の比を評価することが出来る。

図9にビーム電流中の負イオンと電子の比を比較した結果を示す。引き出し電圧の増加とともに、負イオンの割合が数%から10%程度へと上がっていくことがわかる。また、負イオンの割合は、カスプ磁場導入時のほうが高いといった結果が得られた。これは、前述したカスプ磁場によるプラズマ拡散の抑制効果によるものと考えられる。

上記(1)~(4)の結果により、本研究の目的であるイオン源の開発にあたり必要な基礎データをひと通り揃えることに成功した。今回の研究では、反射型イオン源などで用いられるイオン性プラズマを用いた推力測定を行うことまでは叶わなかったが、今回の実験で得られた基礎データを元に、さらなる実験と開発を行い、高性能のイオンエンジンの開発に努めていく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

S. Komizunai, K. Oikawa, Y. Saito, K. Kazunori, and A. Ando, "High-power, low-pressure, inductively coupled RF plasma source using a FET-based inverter power supply", Japanese

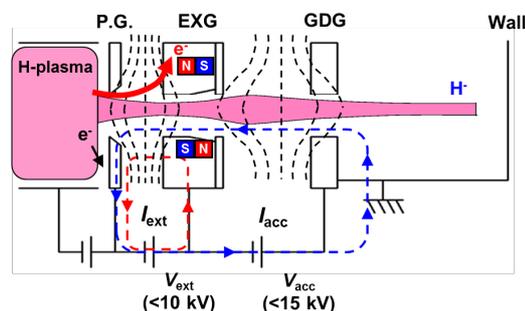


図 8: 引き出し電極と引き出し電流の計測系の概略図

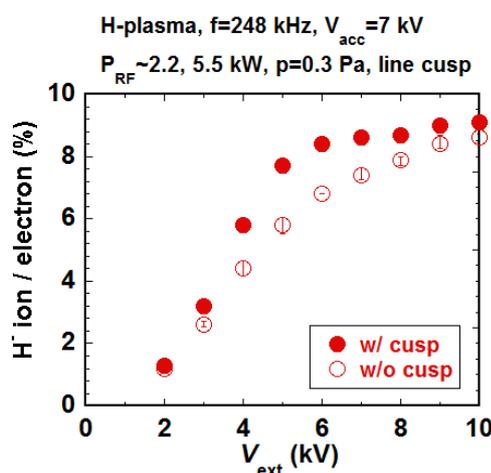


図 9: ビームとして引き出された電子電流と負イオン電流の比

Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 54, 2015, 01AA08-1-4.

<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.54.01AA08>.

K. Oikawa, Y. Saito, S. Komizunai, K. Kazunori, and A. Ando, "Radio frequency hydrogen ion source with permanent magnets providing axial magnetic field", Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol. 185, 2014, 02B124-1-3.

<http://dx.doi.org/10.1063/1.4849696>.

S. Komizunai, K. Oikawa, Y. Saito, K. Kazunori, and A. Ando, "A high power FET-based radiofrequency plasma source for a negative hydrogen ion source", Proceeding of the 8th International Conference on Reactive Plasmas and 31st Symposium on Plasma Processing, 査読有, 2014, , 6P-AM-S01-P11.

A. Ando, K. Takahashi, Y. Izawa, K. Suzuki, and Y. Hoshino, "Enhancement of thrust performance of a MPD thruster with a magnetic nozzle",

Proceedings of the 33rd International Electric Propulsion Conference, 査読有, 2013, IEPC-2013-338.

N. Tanaka, T. Funaoi, K. Oikawa, Y. Saito, H. Nakano, and A. Ando, “Characteristics of volume produced negative hydrogen ions in a field-effect-transistor based ion source”, AIP Conference proceedings, 査読有, Vol. 1515, 2013, 263-269.
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4792793>.

〔学会発表〕(計 14 件)

高山頌、小水内翔太、小室淳史、高橋和貴、安藤晃、「高周波水素負イオン源プラズマにおけるプラズマ基礎特性の周波数依存性」, Plasma Conference 2014, 朱鷺メッセ、新潟市、新潟県、2014 年 11 月 18 日

A. Komuro, S. Komizunai, S. Takayama, K. Takahashi, and A. Ando, “Effects of source size of plasma production on H⁻ production and beam extraction for neutral beam system”, The 4th International Symposium on Negative Ions, Beams and Sources(NIBS2014), Garching, Germany, 6-10. Oct. 2014.

松浦宏太、小室淳史、高橋和貴、安藤晃、「Numerical study of photo neutralizer in NBI system」, 平成 26 年度プラズマ若手夏の学校、小川屋、下呂市、岐阜県、2014 年 9 月 3 日

小水内翔太、高山頌、松浦宏太、小室淳史、高橋和貴、安藤晃、「RF 負イオン源開発と光中性化セルの検討」, 平成 26 年度負イオン研究会、核融合科学研究所、土岐市、岐阜県、2014 年 8 月 27 日

高山頌、小水内翔太、小室淳史、高橋和貴、安藤晃、「Effects of driving frequency on performance of the RF negative ion source」, 平成 26 年度電気関係学会東北支部連合大会、山形大学、米沢市、山形県、2014 年 8 月 21-22 日

松浦宏太、小室淳史、高橋和貴、安藤晃、「Numerical study of laser photo-detachment neutralizer for negative ion beam system」, 平成 26 年度電気関係学会東北支部連合大会、山形大学、米沢市、山形県、2014 年 8 月 21-22 日

高山頌、小水内翔太、小室淳史、高橋和貴、安藤晃、「高周波負イオン源のプラズマ駆動周波数の効果」, 第 10 階核融合エネルギー連合講演会、つくば国際会議場、茨城県、2014 年 6 月 19-20 日

A. Ando, “Development issues of large-area, high power rf ion source for N-NBI system”, KAERI International

Collaborative Seminar, Daejeon, Korea, 12-13. May. 2014.

S. Komizunai, K. Oikawa, Y. Saito, K. Kazunori, and A. Ando, “A high power FET-based radiofrequency plasma source for a negative hydrogen ion source”, The 8th International Conference on Reactive Plasmas and 31st Symposium on Plasma Processing, 3-7. Feb. 2014, , Fukuoka Convention Center, Fukuoka, Japan.

星野優介、伊澤裕紀、鈴木清孝、松浦宏太、高橋和貴、安藤晃、「小型 VASIMAR 推進に向けた無電極プラズマ装置の開発」, 宇宙輸送シンポジウム、2014 年 1 月 16 日、宇宙科学研究所、相模原市、神奈川県

星野優介、鈴木清孝、伊澤裕紀、高橋和貴、安藤晃、「Radio frequency (RF) plasma production for the development of a RF electric plasma thruster」, 電気関係学会東北支部連合大会、会津大学、福島、2013 年 8 月 22 日

田中のぞみ、船生拓矢、及川幸平、斎藤雄太、中野治久、安藤晃、「セシウム添加型高密度負イオン源における水素負イオン特性評価」, 2012 年日本物理学会秋季大会、2012 年 9 月 18-21 日、横浜国立大学、神奈川県

A. Ando, T. Funaoi, K. Oikawa, Y. Saito, and N. Tanaka, “Plasma production and H⁻ beam extraction from a FET-based RF ion source”, 3rd International Symposium on Negative Ions, Beams and Sources, 3-7, Sep. 2012, Jyväskylä, Finland.

N. Tanaka, T. Funaoi, K. Oikawa, Y. Saito, H. Nakano, and A. Ando, “CRD measurements in a FET-based H⁻ ion source”, 3rd International Symposium on Negative Ions, Beams and Sources, 3-7, Sep. 2012, Jyväskylä, Finland.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安藤 晃 (ANDO, Akira)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：90182998

(2) 研究分担者

森 義治 (MORI, Yoshiharu)
京都大学・原子力実験所・教授
研究者番号： 30124176

(3)連携研究者
該当なし