

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360408

研究課題名(和文) 高密度・定常・高効率水素/重水素負イオン源を用いた負イオン挙動解明と能動制御

研究課題名(英文) Performance enhancement of actively-controllable hydrogen/deuterium 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) 14,200,000円、(間接経費) 4,260,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、核融合の定常炉実現に不可欠な高周波(RF)生成手法による大電流重水素負イオン源の実現に向け、定常運転可能な高密度かつ高効率な水素負イオン源の開発を行った。RFイオン源内に外部重畳磁場を印加することにより、 10^{13} 乗cc程度の高密度水素プラズマを生成できることを明らかにした。また、RF負イオン源内部における負イオンの生成、移流効果などの挙動をレーザーと分光器を用いて計測し、イオン源プラズマを定常動作させるために必要な、基礎物理値の収集を行った。

研究成果の概要(英文)：High density negative ion source has been developed for the neutral beam injection system required for the future nuclear fusion system. A high density hydrogen plasma with more than 10^{13} /cc was successfully obtained using the FET based RF power source. Ion beams were extracted from the source and measured using by the laser photo-detachment technique and a spectral apparatus. These results will provide important insights into the future neutral beam injection system.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：高性能負イオン源

1. 研究開始当初の背景

現在、国際熱核融合実験炉(ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor)の建設が着実に進行し、我が国でも、トカマク方式をはじめ磁気閉じ込め方式における高温プラズマの維持・加熱手法の開発が急展開で進展している。現在考慮されているプラズマの加熱方法の一つとして、中性粒子ビーム入射加熱法(NBI: Neutral Beam Injection)がある。NBIとは、核融合炉の外部で負イオンを生成し、それを電場で加速させてビームにした後、中性化して核融合炉内に入射することで粒子の運動エネルギーを核融合プラズマに与えるものである。水素/重水素を用いたNBI方式は、核融合を目指した高温プラズマの加熱と維持にとって最も信頼性があり不可欠な方法として大型化、高電圧化、大電流化が進められている。一方で、現在主流となっているアーク放電方式の負イオン生成は、フィラメントの損傷やタングステンスパッタによる表面の汚染に関連した負イオン生成量の低下が、ITERに求められる長時間定常運転の目標を達成するための妨げとなっていた。

このような背景のもと、近年、フィラメントを用いない負イオン生成方法として、高周波(RF)放電を用いたイオン源の開発が進められている。RF放電ではプラズマ生成部に電極を挿入しないため、アーク放電方式で問題となっていたフィラメントの問題が一挙に解決できる。一方で、RF放電方式は、アーク放電プラズマと比べ、負イオン表面生成に寄与する水素/重水素イオンや原子の成分比が異なり、負イオンの生成効率やビーム引き出し特性(負イオン電流比、ビーム発散、空間均一性)さらに高周波源も含めた運転特性など、従来のアーク放電方式とは異なる動作特性を示すことが予想される。現段階では、NBIに必要な大型化・高出力化を進める上で必要なRF放電の基礎過程の理解が不十分である。

2. 研究の目的

本研究は、核融合定常炉実現に不可欠な高周波(RF)生成手法による大電流水素負イオン源の実現に向け、定常運転可能な高密度かつ高効率な水素/重水素負イオン源の開発をすすめ、RF負イオン源内部における負イオンの生成、移流効果などの挙動をレーザー計測、分光計測を活用して明らかにする。また、多様な原子分子過程や表面相互作用が関与するイオン源プラズマを定常動作させるため、時間的に変化する負イオン挙動解明と能動制御を行うことを目指す。

3. 研究の方法

図1に本研究で使用する実験装置の概略図を示す。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

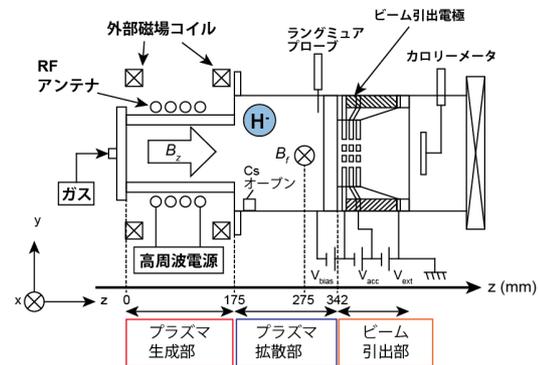


図1: 実験装置概略図

容器内部(生成部)に高周波プラズマを生成する。また本研究の特色として、ITERに求められる低ガス圧(0.3Pa以下)動作、高密度プラズマ($10^{19}m^{-3}$ 以上)の要件を達成するために、ヘリコン波励起による高密度プラズマの生成を試みる。ヘリコン波の励起には一般的には電磁石を用いるが、本研究では永久磁石を用いてヘリコン波を励起することを試みる。永久磁石を用いることで余分な電源が不要となり、また電磁石による熱負荷の低減にもつながる。また、ヘリコン波の励起周波数に対する依存性、永久磁石による磁場配位に対する効果、プラズマ径、磁場配位など、RFイオン源の特性を評価する。

次に、RFイオン源内での水素負イオン(H)の計測を行う。図2に負イオン源と計測系の構成を示す。RFイオン源内における水素負イオンを計測するため、YAGレーザー(波長1064nm)を光源として、レーザー光脱離法による計測を行う。図3にレーザー光脱離計測の計測系を示す。レー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、従来の静電プローブ法を利用し、RF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る。

さらに、イオン源内にセシウム(Cs)蒸気を添加し、負イオンビームの引き出し実験を行う。そして、引き出し電流、加速電流、カロリメータ電流、各種分光強度の測定を行い、イオン源にとって最適にCsの添加方法や手法についての検討を行う。

以上の方法により計測された結果を、プラズマ生成実験にフィードバックさせることにより、電極配置や印加電圧、動作ガス圧の最適化を進め、さらなる負イオン源の挙動解明を行う。

ており、安定してプラズマが生成されていることがわかる。

さらに、負イオン源の大型化を行った。プラズマ生成部・ビーム引き出し部の大口径化を行い、ITERの実機モデルに近いサイズの高周波負イオン源を作成した。図8に従来の小型負イオン源と、新しく製作した大型負イオン源における電子密度のパワー密度依存性を示す。大型化に伴い、プラズマ生成部内壁へのプラズマ損失を抑制することが出来、高効率の負イオン含有プラズマ生成が可能であることを実証した。

(2) レーザー光脱離法によるRFイオン源内での水素負イオンの計測

レーザー光脱離法では負イオンと電子密度の比を計測するため、負イオンの絶対値を求めるためには電子密度を同時に計測することが必要となる。図9にプラズマ拡散部(z = 287 mm)における電子密度・温度のパワー依存性を示す。また、図10には、図9と同条件で水素負イオン密度のパワー依存性を測った時の測定結果を示す。図9, 10より、プラズマ拡散部において電子密度がおよそ1eVのプラズマが生成されており、RFパワーの増加により、電子密度と水素

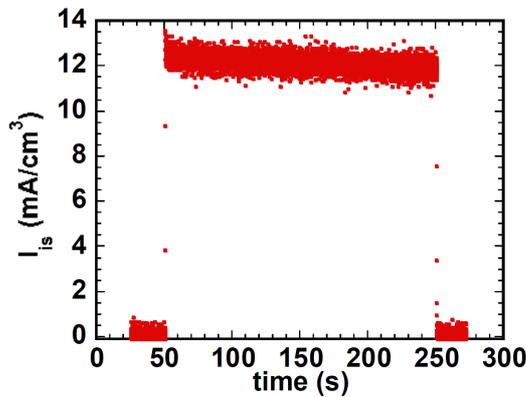


図7：200秒放電時のイオン飽和電流。RF電力3.5kW, 周波数250kHz。

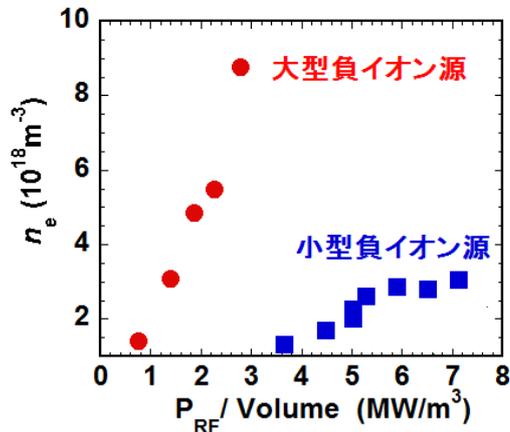


図8：従来の小型負イオン源と、新しく製作した大型負イオン源の比較

負イオンの密度が上昇していることがわかった。負イオン密度は、10kW以上のRFパワーを投入することで 10^{16}m^{-3} 以上になり、今回の実験では最大で $8.5 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$ に達した。

(3) RFイオン源へのセシウム添加効果の計測とビーム引き出し実験結果

イオン源にセシウム蒸気を添加し、ビーム引き出し実験を行った。そして、セシウムを添加した場合と、添加しない場合におけるカリメータ電流の変化を測定した。その結果を図11に示す。このとき放電周波数は310kHz、RFパワーは25kWである。セシウムの添加により、負イオンビーム量が最大で

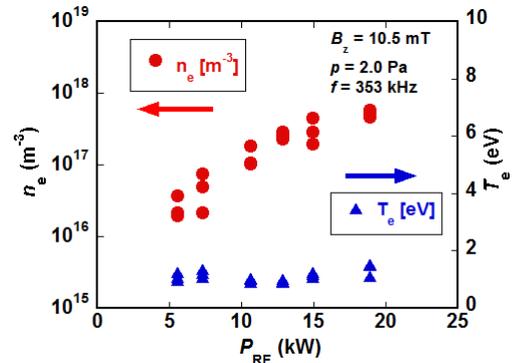


図9：プラズマ拡散部(z = 287 mm)における電子密度・温度のRFパワー依存性

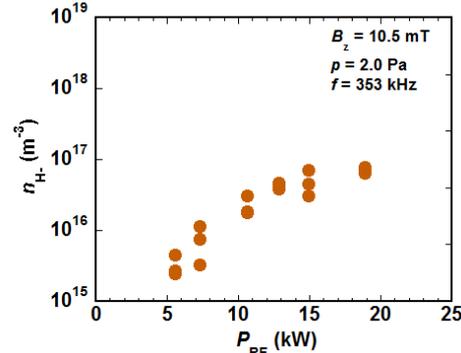


図10：プラズマ拡散部(z = 287 mm)における水素負イオン密度のRFパワー依存性

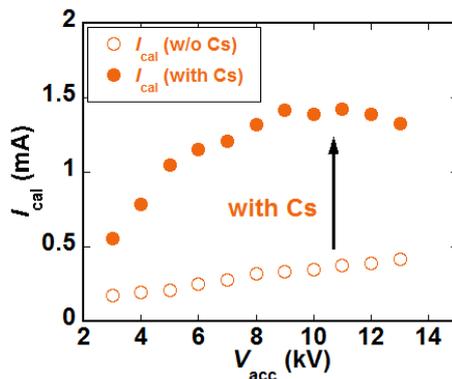


図11：負イオンビーム電流密度。セシウムを添加した場合と、添加しない場合の効果の比較。

4倍程度に増加しているのがわかる。これは、セシウムを添加することにより、電極表面の仕事関数が下がり、容器内の水素原子や水素正イオンが金属表面の電子を奪い負イオンを形成しやすくなったためだと考えられる。今回の実験においては、最大負イオンビーム電流密度は約 2.2mA/cm^2 であった。この値は、ITER に要求される電流密度には及ばないものの、今後のイオン源の大電力化によって目標達成が十分に可能と考えられる。

(1)~(3)より、イオン源の高性能化(大型化・ヘリコン波励起等)と、セシウム蒸気の導入により、水素負イオンの生成効率が飛躍的に上昇することが明らかにし、ビーム引き出し電流の上昇が可能であることを実証した。

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 4件)

K. Oikawa, Y. Saito, S. Komizunai, K. Takahashi, A. Ando, *Radiofrequency hydrogen ion source with permanent magnets providing axial magnetic field*, Review of Scientific Instruments, 査読有り, vol. 85, 02B124 (2014), DOI: 10.1063/1.4849696.

Y. Izawa, K. Suzuki, K. Takahashi, and A. Ando, *Effect of magnetic nozzle in an MPD thruster*, JPS Conference Proceedings, 査読有り, vol. 1, 15046 (2014), DOI: 10.7566/JPSCP.1.015046.

K. Takahashi, and A. Ando, *Observation of Stationary Plasma Striation and Collimated Plasma Transport in a 100-kHz Inductively Coupled Plasma Discharge*, IEEE Transaction on Plasma Science, 査読有り(掲載確定), (2014)

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, 査読有り, vol. 1515, pp. 263-269 (2013), DOI: 10.1063/1.4792793

[学会発表](計 14件)

S. Komizunai, K. Oikawa, Y. Saito, K. Takahashi, A. Ando, *A high power FET-based radiofrequency plasma source for a negative hydrogen ion source*, The 8th International Conference on Reactive Plasmas and the 31st Symposium on Plasma Processing, 2014/2/4-7, Fukuoka(Japan).

A. Ando, K. Oikawa, Y. Saito, S. Komizunai, K. Takahashi, *Helicon*

plasma production and H- beam extraction from a FET based rf negative hydrogen ion source, The 15th International Conference on Ion Sources, 2013/9/9-13, Chiba(Japan).

K. Oikawa, Y. Saito, S. Komizunai, K. Takahashi, and A. Ando, *High density plasma production in an rf negative hydrogen ion source with axial magnetic field generated by a permanent magnet array*, The 15th International Conference on Ion Sources, 2013/9/9-13, Chiba(Japan).

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, 2012/9/3-7, Jyvaskyla(Finland).

A. Ando, T. Funaoi, K. Oikawa, Y. Saito, H. Nakano, N. Tanaka, *Plasma production and H- beam extraction from a FET-based RF ion source*, 3rd International Symposium on Negative Ions, Beams and Sources, 2012/9/3-7, Jyvaskyla(Finland).

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

田中 のぞみ (TANAKA NOZOMI)
大阪大学・レーザーエネルギー学研究中心・特任研究員
研究者番号：60581296

津守 克嘉 (TSUMORI KATSUYOSHI)
核融合科学研究所・プラズマ加熱物理研究系・准教授
研究者番号：50236949

戸張 博之 (TOBARI HIROYUKI)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究副主幹
研究者番号：70361128

(3)連携研究者

竹入 康彦 (TAKEIRI YASUHIKO)
核融合科学研究所・プラズマ加熱物理研究系・教授
研究者番号：60179603