

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：16102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400533

研究課題名(和文) 負イオン源における負イオン引き出し機構・負イオンビーム光学特性の解明

研究課題名(英文) Study of the physics of the extraction and optics of the negative ion beam in a negative ion source

研究代表者

宮本 賢治 (KENJI, MIYAMOTO)

鳴門教育大学・大学院学校教育研究科・准教授

研究者番号：00532996

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、3次元PIC数値計算コードとモンテカルロ計算との結合による3次元PIC-MCC結合コードを構築し、負イオン引き出しの物理機構と負イオンビームの光学的特性、特にビーム発散角の大きな成分であるビームハロの発生要因の解明を行った。その結果、負イオン引出し面の端部から引き出された負イオンは、負イオン引出し面の端部の電界レンズ効果は強いいため、引出部で負イオンビームが過収束してビームハロになることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)： The physics of the extraction and optics of the negative ion beam, especially the beam halo formation was studied by using the 3D PIC (particle in cell) simulation combined with a Monte Carlo calculation.

It is shown that the beam halo consists of the negative ions extracted from the periphery of the plasma meniscus. Since the curvature of the equipotential surface is large in the periphery of the plasma meniscus, these negative ions are over-focused and then divergent.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：プラズマ 核融合 負イオン源 加速器 シミュレーション イオンビーム光学 PIC法

1. 研究開始当初の背景

負イオン源において生成される負イオンビームは分子イオンや金属負イオンなどの不純物イオンが含まれにくい、ビームの収束性が良い、被照射物を帯電しにくい等、正イオンビームに比べて優れた特性を有する。そのために、現在、これらの優れた特性を積極的に利用して、加速器科学、核融合における負イオンを用いた中性粒子ビーム入射による追加熱、及びナノテクノロジーにおける微細加工やバイオテクノロジーにおけるイオン注入等の産業応用といった非常に広範囲に渡る分野での研究開発が勢力的に行われている。

負イオン源では、フィラメントを用いた熱陰極アーク放電より放電プラズマを生成する(図1)。負イオンは体積生成と表面生成の二つの生成過程によって生成される。生成された負イオンは、プラズマ電極(PG)の引き出し孔まで輸送された後、引き出され、加速される。

負イオン源の開発において、大電流、高エネルギーかつ収束性の良い負イオンビームの生成が要求される。上述の表面生成は負イオン生成過程において支配的であり、大電流化において重要な役割を果たす。表面生成は次のような生成過程である。負イオン源内にセシウム(Cs)を導入し、PG表面にCs原子層を形成し、PG表面の仕事関数を低下させる。仕事関数の低下したPG表面に、放電プラズマ中の中性水素原子あるいは水素イオンが入射し、 H^- が生成される。最近の実験結果から、表面生成された負イオンはPGの近傍のみならず、PGから十分に離れた放電プラズマ中にも存在することが報告されているが、表面生成された負イオンの引き出しの物理機構は未だ解明されていない。

また表面生成による負イオンビームの収束性に関する研究としては、日本原子力研究開発機構や米国のローレンスバークレー国立研究所、フランスのカダラッシュ研究所等において、負イオンビームの空間プロファイルやエミッタンス測定が行われ、上述のように負イオンビームは収束性が良くビーム発散角は小さい($< 5\text{mrad}$)ことが実験的に確認されている。しかし、負イオンビームは良好な収束性を示す一方で、ビームハコと呼ばれるビーム発散角の大きい成分($> 10\text{mrad}$)が含まれることが、英国のカラム研究所と日本原子力研究開発機構によって実験的に示されている(図2)。すなわち、負イオンビームの空間プロファイルは発散角の小さいビームコアと発散角の大きいビームハコから成る。ビームハ

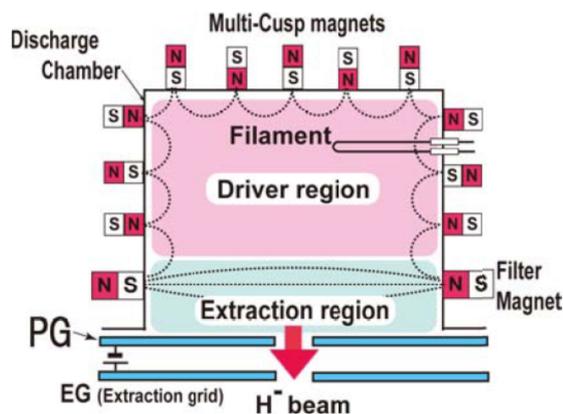


図1 熱陰極アーク放電型負イオン源

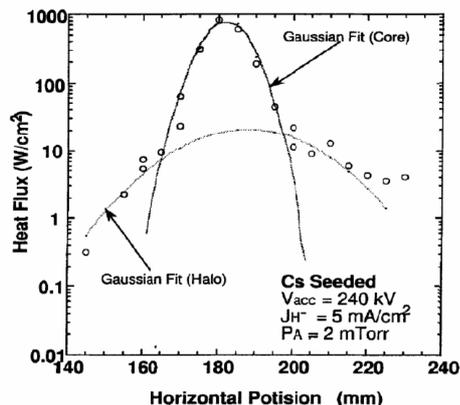


図2 負イオンビームハコの測定結果例

口はビームコアに比べて電流密度は3桁以下という微量であるが、発散角が大きいためにビームパワー全体に占める割合を無視できず、加速部での電極熱負荷をもたらすことが実験的に確認されている。

PIC (Particle-in-Cell)法の負イオン源解析への適用は、近年、慶応大やIMIPのF. Taccognaらの研究グループ、パリ大等で勢力的に試みられており、負イオンの引き出し過程や表面生成におけるポテンシャル構造の解明を図る上で非常に有効な手法として貢献してきた。これまで申請者は、2次元のPIC数値計算にて負イオンビームハ口に関する研究を行ってきた結果、ビームハ口発生 of 物理的要因について明らかにしつつある。しかし、ビームハ口に起因する加速部内の各加速電極熱負荷の実測値は計算値と一致していないことから未だ推察の域を脱していない。そこで、定量評価を進める上で、既存の計算コードを3次元に改良する必要がある。

2. 研究の目的

負イオン源によって生成される負イオンビームには、ビームハ口と呼ばれるビーム発散角の大きな成分が含まれることが実験的に確認されている。ビームハ口は負イオンビーム電流値の損失や絶縁破壊の原因となり、その抑制は喫緊の課題であるが、物理機構は未だ解明されていない。

負イオンビームの光学特性は、負イオンの引き出される界面(負イオン放出面)に左右されるといっても過言ではなく、それゆえ負イオンビームの光学特性を改善するために、負イオンの引き出し機構の解明は避けられない。本研究では3次元PIC数値計算コードとモンテカルロ計算との結合によるPIC-MCC

結合コードを構築し、負イオン引き出しの物理機構を解明すると共に、負イオンの引き出し位置と負イオンビームの光学的特性、特にビームハ口との相関性を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 負イオンビームの光学的特性を左右する負イオン放出面を詳細にモデリングするために、3次元PICコードを構築する。

負イオン源の負イオン生成部から加速部までを、総合的にモデル化し、負イオン放出面を自己矛盾なく解く。

フィルター磁場や電子抑制磁場については、共同研究を行っている日本原子力研究開発機構のJT-60用負イオン源の3次元データが既に提供されており、これらをモデルに考慮する。

今までの研究成果から、磁場が存在する場合の負イオン放出面形状は電子の実効的な閉じ込め時間に依存することが示されている(K. Miyamoto et al., J. Appl. Phys., 114, 103302-1 (2013).)。したがって、多くの3次元PICコードにみられる周期的境界条件ではなく、電子が磁力線に沿って負イオン源容器壁に損失するように境界条件を与えなければならない。

(2) 3次元PICコードとモンテカルロ計算を結合したPIC-MCC結合コードを構築して、負イオンの引き出し特性の解明を図る。負イオン密度空間分布の実験結果から推測されるように、プラズマ電極(PG)表面で生成された負イオンが、PGから十分離れた放電プラズマ中へ戻った後に、引き出し用の電界によって引き出されるか等を実験結果と比較・検討する。

(3) PIC-MCC結合コードを加速部まで拡張し

た総合的な負イオン源のモデリングを構築して、負イオンビーム軌道計算を行う。電極熱負荷測定結果等との比較により、負イオン引き出し位置と負イオンビームの光学的特性、特にビームハロとの相関性について明らかにする。

4. 研究成果

(1) ビームハロに起因する加速部の電極熱負荷について、実験結果と数値計算結果を比較した。計算モデルを図3に示す。負イオンビームの引出・加速方向を x 軸とし、またフィルター磁場、電子抑制磁場に平行な方向をそれぞれ y 軸、 z 軸とした。

加速部の電極熱負荷の要因として、1) 残留水素ガス分子と H^- との衝突によって生じた剥離電子、2) 負イオンビームの直接入射、3) 引出部からの2次電子が挙げられる。電極熱負荷は運転ガス圧に比例する。0 Pa まで外挿した際の電極熱負荷は、負イオンビームの直接入射が、引出部からの2次電子による。今回は、残留水素ガス分子と H^- との衝突を考慮していないため、電極熱負荷は0 Pa まで外挿した場合に相当する。

実験結果を0 Pa まで外挿した際の値と数値計算結果を表1に比較した。表1では、荷電粒子の加速に要したパワーに対する電極熱負荷の割合が示されている。A2G と GRG については両者がほぼ一致し、定量的に妥当である。一方 A1G については、数値計算結果は実験結果の半分以下である。A1G の電極熱負荷には、引出電極から発生する2次電子からの寄与が大きいことが実験的に指摘されている。今回の数値計算では2次電子を考慮していないため、実験結果よりも低い値になると考えられる。よって、引出電極から発生する2次

電子を考慮することが、今後の課題である。

(2) ビームコアとビームハロの軌道計算結果例を図4に示す。ビームハロ発生の物理機構は、以下の通りであることを明らかにした。すなわち、負イオン引出し面の中央部付近から引き出された負イオンはビームコアになるのに対して、負イオン引出し面の端部から引き出された負イオンはビームハロになる。負イオン引出し面の端部の電界レンズ効果は強いいため、引出部で負イオンビームが過収束してビームハロになる。

(3) 表面生成された負イオンが相互中性化により途中で損失することなく、PG から十分離れたソースプラズマへ戻り、引き出されることが実験的に指摘されている。数値計算においても同様のメカニズムで、負イオンが引き出されることを確認した。

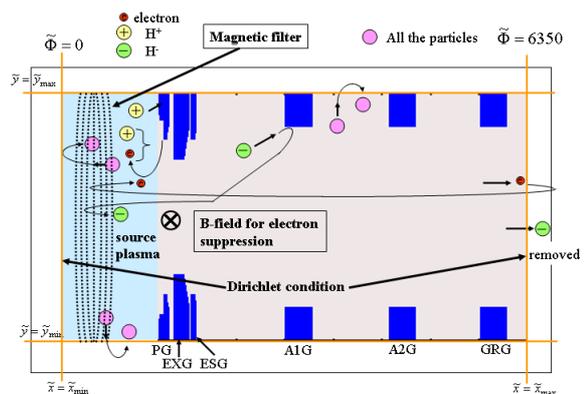


図3 負イオン源の総合的計算モデル

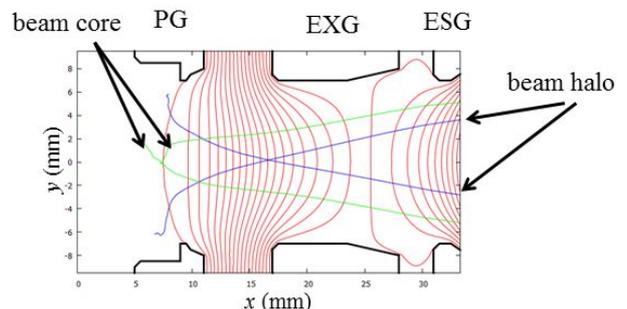


図4 ビームコアとビームハロの軌道の比較

表 1 加速部の電極熱負荷

加速電極	実験結果 (0 Pa に外挿 した値)	数値計算結果
A1G	2.4 %	0.9 %
A2G	3.0 %	2.4 %
GRG	5.0 %	3.7 %

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (3 件)

S. Nishioka, I. Goto, K. Miyamoto, A. Hatayama, and A. Fukano, Study of ion-ion plasma formation in negative ion sources by a three-dimensional in real space and three-dimensional in velocity space particle in cell model, 査読 有, J. Appl. Phys., 2016, vol. 119, pp. 023302, doi 10.1063/1.4939467

K. Miyamoto, S. Nishioka, I. Goto, A. Hatayama, M. Hanada, and A. Kojima, Analysis of the beam halo in negative ion sources by using 3D3V PIC code, 査読 有, Rev. Sci. Instrum., 2016, vol. 87, pp. 02B124, doi 10.1063/1.4932390

K. Miyamoto, S. Nishioka, I. Goto, A. Hatayama, M. Hanada, and A. Kojima, Study of negative hydrogen ion beam optics using the 3D3V PIC model, AIP conference proceedings, 査読 有, vol. 1655, 2015, pp. 050004/1-050004/9, doi 10.1063/1.4916461

[学会発表] (4 件)

K. Miyamoto, Study of energy relaxation processes of the surface produced negative ions

by using the 3D3V PIC simulation, 5th International Symposium on Negative Ions, Beams and Sources, 2016 年 9 月 14 日, Oxford (UK)

K. Miyamoto, Analysis of the beam halo in negative ion sources by using 3D3V PIC code, The 16th International Conference on Ion Sources, 2015年8月25日, New York City (USA.)

宮本 賢治, 3D3VPICシミュレーションを用いた水素負イオン源における負イオンビーム光学の研究, Plasma Conference 2014 (日本物理学会 (領域2) 2014 年秋季大会、応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会第32回プラズマプロセッシング研究会、プラズマ・核融合学会第31回年会) 2014年11月20日、朱鷺メッセ (新潟県新潟市)

K. Miyamoto, Study of negative hydrogen ion beam optics using the 3D3V PIC model, 4th International Symposium on Negative Ions, Beams and Sources, 2014 年 10 月 7 日, Garching, (Germany)

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

宮本 賢治 (MIYAMOTO, Kenji)
鳴門教育大学・大学院学校教育研究科・准教授

研究者番号 : 00532996

(2) 連携研究者

畑山 明聖 (HATAYAMA, Akiyoshi)

慶応義塾大学・理工学部・教授

研究者番号 : 10245607