

氏 名 松 本 新 功

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第758号

学位授与の日付 平成16年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 核融合科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 レーザー光脱離反応時のビーム量測定を利用した  
負イオン源内H<sup>-</sup>輸送の研究

論文審査委員	主 査	教授	金子 修
		教授	森下 一男
		教授	松岡 啓介
		助教授	中島 徳嘉
		助教授	門 信一郎 (東京大学)
		次長	小原 祥裕 (日本原子力研究所)

## 論文内容の要旨

Beams of hydrogen and deuterium negative ions are used for plasma heating by a neutral beam injection for thermo-nuclear fusion experiments. Volume-type negative ion sources are utilized in experiment of large fusion devices in Japan such as the large helical device (LHD) and JT-60. For development of high efficient H<sup>-</sup> ion sources, H<sup>-</sup> production and transport mechanism in extraction region of ion sources should be investigated.

For H<sup>-</sup> density and velocity measurement in an ion source plasma, the laser-photodetachment method with Langmuir probe (PD-LP) has been widely used. Since the distributions of H<sup>-</sup> density and H<sup>-</sup> velocity inside ion sources can be obtained from this method, these parameters are useful to study the negative ion production mechanism and the extraction modeling. However it is difficult to construct an exact model for beam extraction based on the photodetachment method with a PD-LP. Therefore H<sup>-</sup> transport mechanism in ion sources has been studied with numerical analysis mainly, because there is no experimental method to measure the relation of H<sup>-</sup> ions inside and extracted from ion sources. Another experimental method suitable to study the negative ion transport in an ion source is desirable.

In this thesis, a new diagnostic method, laser aided H<sup>-</sup> beam current measurement (PD-FC: photodetachment method with Faraday cup), is developed and utilized to study the H<sup>-</sup> transport inside an H<sup>-</sup> ion source. This method consists of the followings, (1) A pulsed laser beam is irradiated into the plasma, the photodetachment reaction ( $\text{H}^- + h\nu \rightarrow \text{H} + e^-$ ) occurs along the laser beam. (2) Steady state transport of H<sup>-</sup> is hindered by localized depletion of H<sup>-</sup>, and the change in the extracted H<sup>-</sup> current is detected by a Faraday cup. The detected change in the H<sup>-</sup> current should include information on the H<sup>-</sup> density, the velocity, and the transport. It can be also applicable to a strongly magnetized plasma as it directly detects negative ions. In this thesis, the H<sup>-</sup> transport near the plasma electrode (PE) inside the plasma is studied using both the conventional method with PD-LP and the new method.

This thesis consists of 7 chapters. The background of this study, principle of measurement, and the experimental setup for this study are described in chapter 1, 2, and 3, respectively. Chapter 4, 5, and 6 are for the experimental results and discussion. The new diagnostic method is applied to a compact negative ion source, and three experimental studies have been carried out depending on the distance between the PE and the laser beam axis, defined as D, and on whether Cs vapor is added or not.

In chapter 4, the time evolution of  $H^-$  beam current was analyzed in the case of  $D=0$ , where the laser beam with semicircular cross section passes the region right front of the beam extraction aperture contacting with PE. The decrease of  $H^-$  beam current after photodetachment,  $\Delta I_{H^-}$ , becomes larger as the laser power density is increased. It is confirmed that the laser power is large enough to destruct all the  $H^-$  in the beam path.

Next, to study  $H^-$  transport near the extraction hole, the time evolution of  $H^-$  beam current after photodetachment is analyzed on the basis of the ballistic theory. From the recovery time of  $H^-$  beam current,  $H^-$  velocity is derived, and then  $H^-$  density is estimated from the obtained  $H^-$  velocity. The measured  $H^-$  velocities obtained with both methods agree well, while  $H^-$  density measured with the Faraday cup is larger than that by the Langmuir probe in high gas pressure condition. The reasons for this disagreement are considered to be due to the influence of collision with  $H_2$  molecules in plasma, because ballistic theory does not hold in high gas pressure condition.

In chapter 5, the characteristics of  $H^-$  beam current after photodetachment with  $D>0$  are discussed. Here we cannot adopt the ballistic theory used in chapter 4, because in the experimental conditions the shortest mean-free-path and the Larmor radius are both comparable to  $D$ . Therefore we must treat collisions of  $H^-$  ions with other ions, electrons, atoms, and molecules, and the gyro motions during the travel of  $H^-$  ions from the plasma to the extraction hole of PE. This situation is simulated by the Monte-Carlo method. The calculated results are compared with the experimental results, and then we can make sure whether the transport model is valid or not.

The maximum change of  $H^-$  current after photodetachment ( $\Delta I_{H^- \text{max}}$ ) decreases gradually as  $D$  increases. At  $D>15\text{mm}$  the signal of  $\Delta I_{H^- \text{max}}$  was too small to distinguish it from the plasma noise. In the plasma used here, we found that the  $H^-$  ions in the region within 15 mm from the PE contributed for  $H^-$  beam. This tendency is in good agreement with the simulation results, and therefore it is concluded that the present  $H^-$  transport model is reasonable in a compact negative ion source of this size.

It is found that the sheath potential at PE affects the amount and time behavior of PD-FC signal. Because the kinetic energy is smaller than the typically formed negative sheath potential on the wall,  $H^-$  is reflected on the surface of PE. Then some part of extracted beam consists of these reflected ions, which is observed as a tail in PD-FC signal wave form. When the sheath potential is reversed by adjusting the PE bias voltage ( $V_b$ ) against plasma potential ( $V_p$ ),  $H^-$  becomes hitting PE and does not survive. As a result of experiment, the tail was vanished in the PD-FC

signal with  $V_p < V_b$  condition. This change of wave form is also demonstrated by Monte-Carlo calculation which takes the destruction of  $H^-$  ions on the PE surface into consideration. For high extraction efficiency of  $H^-$  ions from ion sources, a PE should be biased lower than plasma potential to prevent  $H^-$  ions from being destructed by collision with a PE.

It is widely known that addition of Cs into volume type negative ion sources make increase of extracted  $H^-$  beam current. In chapter 6, to clear the cause of this Cs effect, the same experimental method as in chapter 5 is applied for cesium added hydrogen plasma. By introducing Cs vapor, the extracted  $H^-$  current increases by factor of 2.5. At  $D \sim 2$  mm,  $\Delta I_{H^- \text{max}}$  is also enhanced by 2.5 times. The dependence of  $\Delta I_{H^- \text{max}}$  upon  $D$  shows that the increase of  $H^-$  near the PE contributes to the enhancement of extracted beam in the case of Cs added plasma, which suggests the surface production of  $H^-$  on the grid.

In chapter 7, the conclusions are described throughout the studies on the  $H^-$  transport inside the ion source.

## 論文の審査結果の要旨

松本新功君の論文は、核融合プラズマ加熱に使われる大電流水素負イオン源を念頭に置き、イオン源プラズマ中に生成された負イオンがビームとして引き出されるまでの輸送過程を、レーザーにより負イオンを局所的に破壊してその引き出しイオン電流への影響を調べるという極めてユニークな方法で実験的に調べ、数値シミュレーションによってその挙動を解析したものである。

負イオン源プラズマ内での負イオン密度の直接測定の試みは従来からなされており、特にレーザーによる光脱離反応を用いて負イオンから電子を脱離させ、その電子をプローブで捕獲する方法は局所的な負イオン密度を求める方法として確立している。この方法によりプラズマ中の負イオン密度が条件によって大きく変化することはわかっていたが、負イオンを実際にビームとして引き出すに当たって、空間的にどの領域の負イオンがビームに寄与するのかが明らかでなかった。それはプラズマ中に生成された負イオンはその温度が0.1eV程度と低いことが知られており、プラズマ中の電場や磁場の影響を受けやすいからである。この問題についてこれまでは負イオンの軌道を解析的に追うモンテカルロ計算で定性的な検討がなされているのみであったが、その信憑性については議論があった。

松本君はレーザーによる光脱離反応で負イオンを局所的に破壊できることに着目し、負イオンビームを引き出している状態でイオン源内の様々な場所で負イオンを破壊し、ビームの変化量を測定することでビームに寄与する負イオンの存在領域を明らかにすることを着想した。そしてその減少量と時間的な振る舞いから負イオンがどのような過程でビームの引出孔まで輸送されるのかを、負イオンがその移動過程で経験するであろう磁場、プラズマ周辺でのシースポテンシャル、電子や正イオンとの衝突、中性粒子との衝突等を考慮したモンテカルロシミュレーションと比較検討した。

まず半月型の断面を持つレーザービームで引出孔に直面する領域の負イオンを瞬間的に全て破壊し、いったん負イオンビーム量がゼロになることを確認する。そしてビーム量が回復するまでの時間変化から負イオンの無くなった領域に負イオンが外側からどのような過程で輸送されてくるかを推定した。この時間(1 $\mu$ s)空間(2mm)スケールでは新たな負イオン生成や磁場や他粒子との衝突が無視でき負イオンが直線運動をずとした理論式とのよい一致が見られた。この結果から松本君は逆にビーム量の変化から電極近傍の負イオンのパラメータを推定する方法を新たに提案した。この方法は高電位に浮いて動作する負イオン源の動作中の測定が出来るというこれまでに無い利点を持つものである。

次に松本君はレーザー照射位置を引出孔から離していき、負イオンビームの量的、時間的変化の距離依存性を調べた。その結果、時間変化の異なる2成分を発見した。この結果を解釈するためにモンテカルロシミュレーションを行い、早い成分は生成場所から衝突を経ながらも直接引出孔へ到達した負イオンであり、遅い成分は引出電極のシース電場で反射され時間をかけて引出孔に到達するものであることを推定した。そしてこの結果を実験

的に引出電極の電位を変えて反射を押さえることで早い成分のみが残ることで確かめた。これは負イオン源のバイアス効果として知られている現象を説明するものである。

更に論文ではセシウムを添加した効果にも触れている。セシウムを添加することにより負イオンビーム量が大幅に増加し、その原因が引出電極表面での負イオン生成によるものであるとされているが、その場合生成された負イオンはシースポテンシャルでプラズマ中に放出され必ずしもビームとして引き出されるとは限らない。松本君は同様の手法を用い電極近傍からのビーム寄与が増加することを実験的に明らかにした。この結果はセシウム効果が電極近傍で顕著であることを示しており、負イオンの表面生成をより支持するものである。

このように、本論文は引き出された負イオンビームを計測対象にするという応用上利用価値のある実験手段を用いながら、負イオン源プラズマ内の負イオンの挙動について新たな知見を与えており、負イオン源開発の立場からも貴重な結果を得ているものである。審査委員会は本論文が博士（理学）の称号を授与するに値するものであると判断し、審査員全員一致で合格とした。