

水素負イオン源プラズマの荷電粒子ダイナミクス Charged Particle Dynamics in Negative-Hydrogen-Ion Source Plasma

中野治久¹⁾、GENG Shaofei²⁾、津守克嘉¹⁾、木崎雅志¹⁾、
池田勝則¹⁾、神尾修治¹⁾、永岡賢一¹⁾、長壁正樹¹⁾
NAKANO Haruhisa¹⁾、GENG Shaofei²⁾、TSUMORI Katsuyoshi¹⁾、KISAKI Masashi¹⁾、
IKEDA Katsunori¹⁾、KAMIO Shuji¹⁾、NAGAOKA Kenichi¹⁾、OSAKABE Masaki¹⁾

¹⁾自然科学研究機構核融合科学研究所、²⁾総合研究大学院大学/核工業西南物理研究院
¹⁾NINS-NIFS, ²⁾SOKENDAI / SWIP

水素負イオン源は、核融合や高エネルギー物理、粒子線治療等、荷電粒子ビーム源として広範囲に利用されている。この水素負イオン源内のプラズマ（水素負イオン源プラズマ）において、近年、我々は電子が少ない負イオンプラズマ、更にはLangmuirプローブ特性がほぼ点対称となる（電子が極めて少なく、ほぼ正負水素イオンのみで構成される）イオン性プラズマの出現を世界に先駆けて発見している（図1）。その後、イオン性プラズマは他の水素負イオン源でも次々に観測され、水素負イオン源の特性を示す上で重要な指標となっている。ところで、イオン性プラズマは質量等価の正負荷電粒子で構成されるプラズマである。これは、活動銀河中心やパルサー磁気圏などに存在が予想される電子-陽電子プラズマと同様関係にある。こ

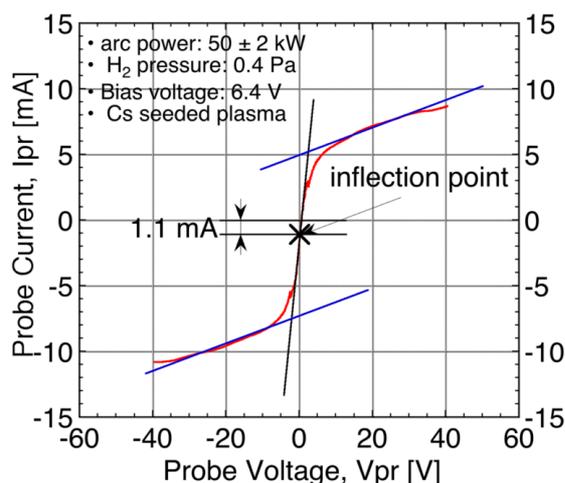


図1 NIFS-RNIS で存在が確認されたイオン性プラズマのペアプラズマプローブ特性。[K. Tsumori *et al.*, AIP Conf. Proc. 1515, 149 (2013)]

のようなプラズマでは、通常のイオン-電子プラズマとは基本特性が異なると予想されている。イオン性プラズマの特性を明らかにすることは、水素負イオン源性能向上だけでなく、宇宙プラズマやプラズマ基礎特性の理解の進展に貢献するものと考えられる。本講演では、水素負イオン源で生成される負イオンプラズマおよびイオン性プラズマの諸特性について、荷電粒子のダイナミクスを中心に述べる。

本研究は、核融合科学研究所・研究開発用負イオン源NIFS-RNIS（図2）を用いて行った。NIFS-RNISのイオン源プラズマはフィルター磁場によってドライバ領域（プラズマ生成領域）とビーム引出界面であるプラズマグリッド電極（PG）近傍の電子温度が低い（ $T_e \sim 0.7$ eV）フィルター領域（ビーム引出領域）に分かれている。イオン源プラズマ中にはセシウムが添加され、PG表面の仕事関数を下げている。このPG

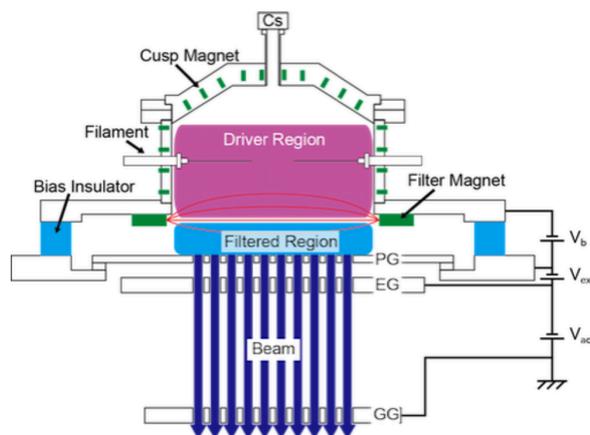


図2 水素負イオン源（核融合科学研究所研究開発用負イオン源 NIFS-RNIS）[H. Nakano *et al.*, Journal of Instrumentation 11, C03018-C03018 (2016)].

表面において、ドライバ領域で生成された水素原子/正イオンが水素負イオンに大量に変換される。これにより、準中性条件を満たすようにPG近傍の電子が水素負イオンに置き換わる結果、PG近傍にイオン性プラズマが生成されている。このとき、電子密度比は極めて低く、プラズマ密度の10%以下（計測限界以下）の状態になる場合があることが分かった。

ビーム引き出し電場に対するプラズマの静電応答がPG近傍の水素負イオン-電子密度比によって異なることがわかった。さらに、 ~ 0.1 mmのシース長に対して、ビーム境界面から30 mm以上離れた領域においてもプラズマが静電応答するという、負イオン源の負イオンプラズマ特有と考えられる現象を観測した。この物理過程を調べるために、荷電粒子（水素正/負イオン）の流れ分布、荷電粒子密度分布および荷電粒子と水素原子の温度の計測を行った。図3にPG近傍のフィルター磁場（ ~ 6 mT）に垂直な平面における水素正イオンの平均流の計測結果を示す。計測は方向性Langmuirプローブで行った。PG近傍では、PGに向かってプラズマ密度が減少する。また、ビーム方向の電場（ ~ 25 V/m）が形成されている。これらから両極性拡散（ビーム方向）および $E \times B$ ドリフトによる流速を見積もり、計測結果と定量的に比較したところ、PG近傍では水素正イオンの平均流は上記両効果が支配的であることがわかった。

水素負イオン密度はNd:YAGレーザーを用いたLangmuirプローブ支援電子光脱離法(LP-PD)で計測した。LP-PDは極低電子密度比の負イオンプラズマでは通常、水素負イオン密度絶対評価が困難である。そこで、我々はCavity Ringdown法(CRD)による水素負イオンの線平均

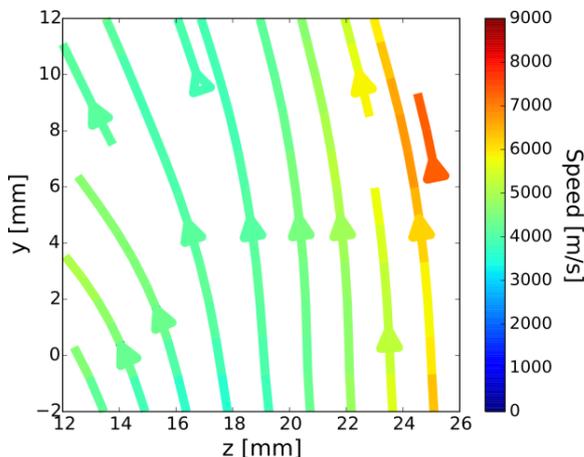


図3 ビーム引き出し中の水素正イオン流の二次元分布 [S. Geng, Doctoral Thesis (2016)].

絶対密度を元にLP-PD信号を較正することで、局所水素負イオン絶対密度を評価する手法を新たに開発した。水素負イオンの平均流計測はDLPとLP-PDを組み合わせた手法で実現した。図4にビーム引き出し中の水素負イオン流れの二次元分布を示す。水素負イオンは水素正イオンとは明らかに異なる流れ分布を持つことが分かった。PG表面で生成・放出された水素負イオンは、一旦ビームと逆方向の流れとなり、その後、ビーム引出電場の影響によりPGから約20 mm離れた位置でビーム方向へ流れを変化していること初めて示した。さらに、水素負イオン流はPG近傍の磁場の影響を受けていることも新たにわかった。

CRD法を発展して水素負イオン温度計測法を新たに開発するとともに、水素負イオン流計測に付随しても可能となった水素負イオン温度計測より、PG近傍の水素負イオン温度が約0.1 eVであることが実規模水素負イオン源で初めてわかった。観測結果は実測されたビーム発散角の説明が可能なるものである。一方で、シミュレーションでは0.6 - 1 eV程度の水素負イオン温度が予想されており、シミュレーションモデルを含めた精査が必要となり、注目を集めている。

講演では、水素負イオン流分布を含む荷電粒子流、荷電粒子密度・温度および水素原子温度から導かれる負イオンプラズマおよびイオン性プラズマの荷電粒子ダイナミクスの詳細について述べる。

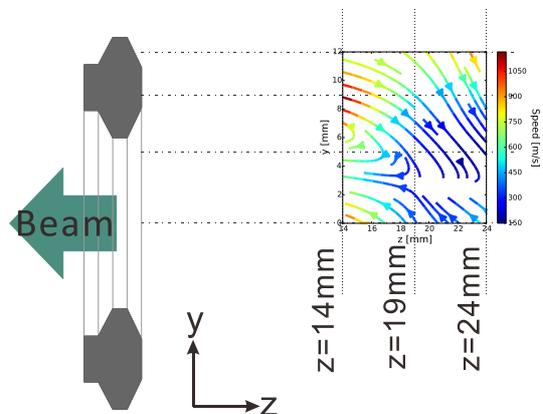


図4 ビーム引き出し中の水素負イオン流の二次元分布 [S. Geng et al. submitted to Fusion Engineering and Design.].

