

負イオン生成におけるCsフリー化の試み Trial of Cs-free in negative ion production

大原 渡*, 竹田 敬, 横山 浩之, 姉川 伸季, 加美川 俊満, 巽 優祐,
江川 正樹, 高森 暁, 林 智成

W. Oohara, T. Takeda, H. Yokoyama, N. Anegawa, T. Kamikawa, Y. Tatsumi,
M. Egawa, S. Takamori, T. Hayashi

山口大院理工
Yamaguchi Univ.

水素負イオンの主な生成手法は、セシウム Cs を用いた表面生成や、Cs を用いない体積生成である。体積生成において、高速電子の衝突によって高次の振動励起分子は確率的に生成され、これらだけ選択的に生成することができない。結果的に、負イオン生成効率の向上には限界がある。一方、Cs を用いた表面生成の負イオン生成効率は高いが、大型負イオン源を安定してオペレーションする上で Cs の使用が障害になる。よって、Cs を用いない (Cs フリー) で、効率良く負イオンを生成することが望ましい。水素イオンまたは水素原子に電子を付加して負イオン化するためには、気相電子に比べて電子密度が大幅に高い金属表面近傍の電子を利用する方がよいと考えられる。電子が金属へ逆遷移する確率を低減し、仕事関数に強く依存せず電子遷移させる方法の一つとして、できるだけ金属面に平行方向へ正イオンを入射・反射させることによって負イオン化させることを目指した、プラズマ支援触媒イオン化を提案している [1,2]。

金属メッシュに正イオンを照射して、その照

射裏面より負イオンが生成されることをこれまで示してきた。未だ負イオンが生成される機構の詳細は明らかになっていないが、アルミニウム Al を用いると負イオン生成量が多いことが分かった。ここで、NBI のように負イオンを加速する場合には、正イオンバックストリームが存在して、負イオン引出孔をふさぐ平板状の金属メッシュはダメージを受けるため、用いることができない。そこで、負イオン源で用いられているプラズマグリッドの負イオン引出孔の内壁で、正イオンを負イオン化させることを目指している。

図 1(a)に示すように、厚さのある Al プラズマグリッド Al-PG に引き続いて、電子偏向除去用の磁場を印加した制御グリッド CG を設置した。Al-PG と CG の孔内外のプラズマ分布を、軸方向へ可動するラングミュアプローブで測定した。直径 13 mm の引出孔がある Al-PG (厚さ 20 mm) に直流電圧 $V_{PG} (< 0 \text{ V})$ が印加されている。熱陰極直流アーク放電で生成された水素プラズマの正イオンは引出孔に入射する。正イオンが引出孔内壁に衝突・反射する過程で負イ

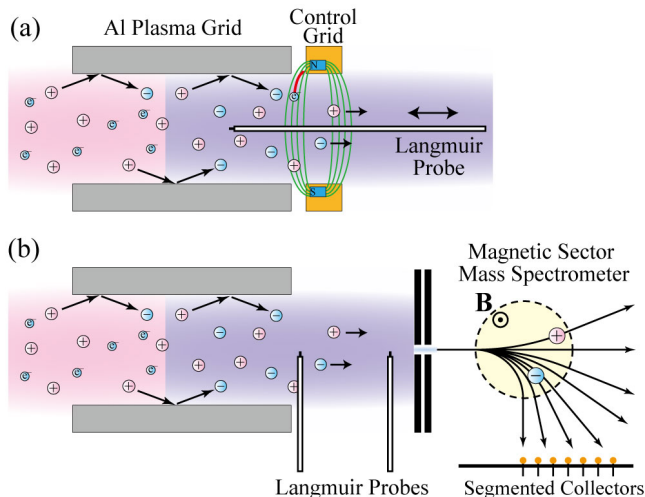


図 1：電極配置と測定項目。

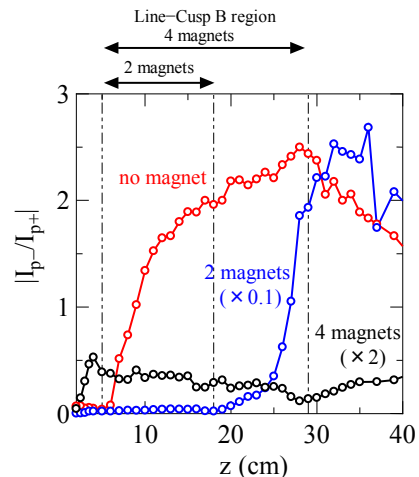


図 2：プローブ正負飽和電流比の軸方向分布。

オン化する．電子は Al-PG 引出孔入口から 1 cm 程度内側で完全に反射され，これより下流ではイオン性プラズマになることが分かった．イオン性プラズマになる位置は V_{PG} に依存しており，Al-PG の厚さは 2 cm 程度が必要である．ただし，厚くなるに従い，イオン性プラズマ密度は減少する．なお，正イオンが衝突する際に二次電子も放出されるが，偏向磁場で除去される．CG の下流側には，イオンの拡散損失を抑制するために，軸方向に永久磁石を並べたラインカスプ磁場（周方向に 4 極）を印加した円筒が設置されている．CG を通過した正負イオンは，この円筒内に導かれるようになっている．ここで，ラインカスプ磁場の終端付近において，プローブの正飽和電流は減少するにも関わらず，負飽和電流は増加することが分かった．軸方向に並べる磁石の個数を 4 個，2 個，0 個の場合に，それぞれ負飽和電流の軸方向分布を図 2 に示している．磁場が印加されている領域から無磁場領域へ拡散する領域で，負イオンが崩壊して脱離電子に置き替わっていると考えられる．

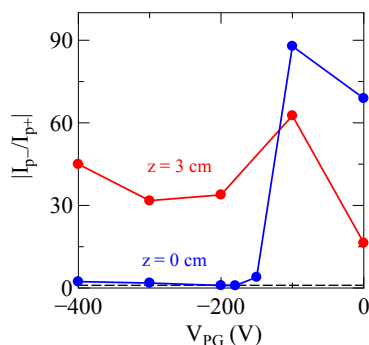


図 3：プローブ正負飽和電流比の PG 電圧依存性．

負イオンの崩壊は磁場に依存するかどうかを調べるために図 1(b)のように，Al-PG 出口 ($z = 0$ cm) と $z = 3$ cm にラングミュアプローブを設置して，その正負飽和電流比を測定した（図 3）．なお，ここでは CG（電子偏向磁場）やラインカスプ磁場は存在しない． $V_{PG} < -180$ V の電圧条件において電流比が低くなり，Al-PG 出口ではイオン性プラズマになっている．一方， $z = 3$ cm では V_{PG} に依らず電流比が大きく，電子プラズマになっている．すなわち，Al-PG 出口より下流域で形成されているシース電場中で，負イオンは崩壊して電子に置き換わっていることを示唆している．これにより，磁場が無くても電場で負イオンは崩壊するといえる．

次に，磁場偏向型質量分析器を Al-PG 出口付近に設置して，下流域のイオン質量分析を行っ

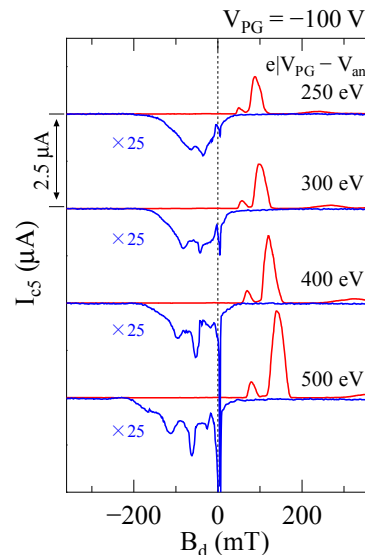


図 4：磁場偏向型質量分析器で測定した正負イオンの質量スペクトル．

た． $V_{PG} = -100$ V のままイオン加速電圧 V_{an} を変化させて，イオンの加速エネルギーを変化させた場合の質量スペクトルを図 4 に示す．ここで $B_d < 0$ mT とは，偏向磁力線の向きが反転していることを示す． $B_d > 0$ mT の正イオン質量スペクトル（赤色）において，イオンエネルギーが 500 eV の場合， $B_d \sim 80, 140$ mT のピークは H^+ ， H_3^+ を示している． $B_d < 0$ mT の負イオン質量スペクトル（青色）において，イオンエネルギーが 250 eV の場合，正イオンスペクトルに比べてかなりブロードなスペクトルになっている．300 eV より大きくなるとブロードな成分が減少し，主に 3 つのピークが現れることが分かった．500 eV の場合， $B_d \sim -60, 0$ mT のピークは， H^- と電子を示している．エネルギーと偏向磁場の関係から， $B_d \sim -110$ mT のピークは H^- の 2 倍程度の質量を持っていると考えられるが，これが何を示しているのかは明らかではない．

以上のように，Al-PG 引出孔内において，負イオンは生成されていることが明らかになった．ここで，有磁場領域から無磁場領域への拡散，または電場のみで拡散する場合において，負イオンが崩壊して脱離電子に置き換わることが明らかになった．負イオンが単独で存在する場合には崩壊しないので，これは正イオンと共存する場合に現れる現象と考えている．

- [1] W. Oohara, H. Yokoyama, Toshiaki Takeda, Y. Maetani, Takashi Takeda, K. Kawata, Phys. Plasma, **21**, 063514, 2014.
- [2] W. Oohara, Y. Maetani, Takashi Takeda, Toshiaki Takeda, H. Yokoyama, K. Kawata, Phys. Plasmas, **22**, 033507, 2015.