シートプラズマによる大電流 H⁻, D⁻ イオン源の研究(Ⅱ)

浦 本 上 進*

(昭和59年1月13日 受理)

Research of High Current H⁻ or D⁻ Ion Source by a Sheet Plasma (II)

Jōshin URAMOTO

(Institute of Plasma Physics,
Nagoya University, Nagoya, Aichi)

(Received January 13, 1984)

A development to large area H⁻ or D⁻ ion source is tried by using three extraction electrodes: The first electrode bias voltage is set near the wall potential (floating), the second electrode is set near 13 % of main extraction voltage and the third electrode is the main acceleration electrode. An ion current of 13 mA (3.3 mA/cm²) for H⁻ or 11 mA (2.8 mA/cm²) for D⁻ at 3 keV is extracted from 9 apertures of 6 mm ϕ in 4 cm² outside of the sheet plasma (14 cm wide and 1.0 cm thick) under a pressure of 7.7×10^{-4} Torr H₂ or D₂ gas and a weak magnetic field 50 gauss. Then, it is noted that the corresponding electron current is suppressed below 1/10 of the H⁻ or D⁻ ion current.

1. ま え が き

このシリーズの研究 I¹⁾ で「高能率シートプラズマの外側から、隣接した多くの孔を持った引き出し電極によって大面積に渡って高い実効電流密度の H⁻, D⁻ イオンを引き出すには、引き出し加速領域に侵入する電子を抑制しなければならない」ことについてすでに議論した。その研究 I では H⁻, D⁻ イオンの引き出しのために 2 枚の引き出し電極が用いられ、最初のシートプラズマに面する電極(制限電極)のバイアス電圧は壁電位(プラズマ中に電氣的に浮動)近くに設定し、次が H⁻, D⁻ イオンを加速する引き出し加速電極で 3 kV 程度迄かけられた。しかしながら 2 枚の電極による引き出しでは、加速領域への侵入電子を抑制するには隣接した引き出し孔の間隔が 3 cm 程度以上必要であり、結局大面積に渡っての実効電流密度を上げることは不可能であった。

かくして、この研究 II においては、3 枚の隣接して多くの孔を持った引き出し電極を使用し、侵入電子を抑制

しながら大面積に渡っての電流密度を上げることを試みる。

2. 実験的追求

加速領域への電子の侵入を抑制するために、研究 I の 2 枚の引き出し電極、制限電極 L と加速電極 E の間に、Fig. 1(A) に示したように中間電極 M が配置され、大面積に渡って H⁻, D⁻ イオンを引き出すときの隣接した孔の相互干渉を調べるために、L と M 電極には Fig. 1(B) に示したように約 4 cm² に 6 mm ϕ の孔が 9 ケ開けられた。また、E 電極には 1 ケの 5 mm ϕ の孔が開けられ、その背後には理論的曲率半径 4.5 cm の 90° 偏向型の磁場による質量分析器が 0.5 cm 離れて配置された。

L, M, E 電極の厚みは 1 mm であり、L と M 電極間、M と E 電極間は共に 0.5 cm である。シートプラズマに沿った方向の磁場 $B_z(y)$ は Fig. 1(C) に示したように中心から外側へ緩く減衰しており、引き出し電極付近では 50 gauss 以下である。この磁場は引き出された H⁻, D⁻ イオンの軌道に影響するので、イオンビーム分

*名古屋大学プラズマ研究所(名古屋市千種区不老町)

Fig. 1 (A) Schematic diagram of experimental apparatus. S.P.: Sheet plasma (14 cm wide and 1.0 thick), B_z (y): Magnetic field along S.P. (z direction), y: Direction perpendicular to S.P., z: Direction along S.P., A: Discharge anode, I_A : Current to A, GT: Glass tube, M.A.: Mass analyser, F.C.: Faraday cup (1 cm $\times$ 1 cm), B_M : Analyzing Magnetic Field. I_e or I^- : Electron current or negative ion current to F.C., L: Limiting electrode (first extraction electrode), V_B : Bias voltage of L, M: Intermediate electrode (second extraction electrode), V_M : Bias voltage of M, E: Main extraction electrode (third extraction electrode), and V_E : Main acceleration voltage of E.

(B) Extraction electrodes with multi-apertures. L and M: (Multi-aperture), E: (Single-aperture).

(C) Magnetic field distribution. B_z (y) to y direction perpendicular to sheet plasma. (1): Distribution with M.A., (2): Distribution without M.A., GT: Wall position of glass tube, L: Position of L electrode, M: Position of M electrode, E: Position of E electrode, and M.A.: Surface position of M.A.

光的にはできるだけ小さい方が望ましいが、多孔型水素、重水素正イオンビームの場合を例にすればこの程度の磁場は許される(局所的に)。

高能率シートプラズマ²⁾のプラズマパラメーターは研究 I と同様であり、この研究 II では磁場が中心付近で 20

%程度減じられているのみである。即ち、通常 H_2 , D_2 ガスの圧力は 7.7×10^{-4} Torr, 放電陽極電流は 25 A, シートプラズマの幅 14 cm, 厚み 1.0 cm (プラズマ密度の半値幅), 電子温度はシートプラズマの中心付近で 20 eV 前後, 外側で 2 ~ 3 eV, 引き出し電極 L の面前でのプラ

ズマ密度は $10^{10}/\text{cc}$ 前後である。

Fig. 2 がシートプラズマの幅に垂直な y 方向へのプラズマ電位の分布であり、第1引き出し電極である制限電極Lの孔 $6\text{ mm}\phi$ の中で急変することがわかる。即ち、その $6\text{ mm}\phi$ の孔の中心付近ではプラズマ電位に近く、孔の周辺では外部的に調節されるL電極のバイアス電圧 V_B に近くなる。これは孔の周辺に一つのイオンシースが形成されることを意味する。

引き出し加速電圧 $V_E=1\text{ kV}$ のとき、中間引き出し電極Mのバイアス電圧 $V_M=0\text{ V}$, $V_M=130\text{ V}$ の二つの場合に対応した質量分析図を **Fig. 3(A)** に示した。このときその最初の制限電極Lのバイアス電圧は壁電位（プラズマ中に電氣的浮動） $V_w(\approx -7\text{ V})$ 附近に保れた。

Fig. 3(A) において我々は $V_M=130\text{ V}$ の場合に著しく H^- イオン電流が大きく、一方電子電流はその1/10以下であることを見出す。（なお、質量分析器の実験的曲率半径はその理論的曲率半径と10%以内で一致している）。次に、加速電圧 $V_E=1\text{ kV}$ において、中間電極Mのバイアス電圧 $V_M=0$, $V_M=130\text{ V}$ の二つの場合に対して制限電極Lのバイアス電圧 V_B 依存性が調べられた。**Fig. 3(B)** が $V_M=0\text{ V}$, **Fig. 3(C)** が $V_M=130\text{ V}$ の場合である。

我々は $V_M=130\text{ V}$ のとき、 V_B がその壁電位 V_w よりわずかに低い電圧で H^- イオン電流が最大になり、一方電子電流がその1/10以下に減少することを見出す。**Fig. 3(D)** は制限電極の最適バイアス電圧 $V_B=-10\text{ V}$, 加速電圧 $V_E=1\text{ kV}$ のときの H^- イオン電流の中間電極バイアス電圧 V_M 依存性であり、 V_M が V_E の約13%のときに H^- イオン電流が最大になることがわかる。引き出し加速電圧 V_E が 0.5 kV から 1.5 kV まで変えられたとしても、**Fig. 3(E)** に示したように、 H^- イオン電流の最大はやはり、 $V_M/V_E \approx 0.13$ (13%) のときである。

D^- イオン電流に対しても H^- イオン電流における実験結果と同様であり、**Fig. 4** にその質量分析図が、二つの典型的な中間電極のバイアス電圧 V_M に対して示されている。

また **Fig. 5** にはその H^- , D^- イオン引き出しの最適条件 $V_M/V_E \approx 0.13$, $V_B \approx -10\text{ V}$ の下に、質量分析器のFaraday cup ($1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$) に入る H^- , D^- イオン電流の加速電圧 V_E 依存性が示されている。このとき放電陽極電流は、 H^- , D^- イオンの流束制限 (Flux limit) を避けるために 35 A まで上昇されている。

以上の実験結果に基づいて、大面積に渡って H^- , D^- イオン電流を引き出す第一歩として、**Fig. 6(A)** に示したような面積 4 cm^2 における $6\text{ mm}\phi$ の孔9ヶからの全 H^- , D^- イオン電流 I_T を測定することを試みた。即

Fig. 2 Plasma potential distribution $V_s(y)$ to y direction perpendicular to sheet plasma. L: L electrode position. M: M electrode position, V_B : bias voltage of L electrode. Ap.: One of multi-aperture in L electrode.

ち、引き出し加速電極EがM, L電極と同じ (**Fig. 1(B)**) ものに変えられ、9ヶの孔からの全 H^- , D^- イオン電流 I_T を測定できる大きな Faraday cup (L. F. C.) が配置された。

かくして、その V_B , V_M の H^- , D^- イオン電流引き出しに対する最適条件の下に加速電圧 V_E を 3 kV まで変えて全 H^- , D^- イオン電流 I_T を測定した。**Fig. 6(B)** に示したように、 H^- イオンに対して 13 mA , D^- イオンに対して 11 mA の電流が $V_E=3\text{ kV}$ において得られた。この電流はその全面積 4 cm^2 に対して実効的に H^- イオン電流密度 3.3 mA/cm^2 , D^- イオン電流密度 2.8 mA/cm^2 となる。このとき加速電極E, 中間電極Mに入る負電流 I_E , I_M (**Fig. 6(A)** に示す) は **Fig. 6(C)** に示したようになり、その H^- , D^- イオンの全電流 I_T に対して $I_T/I_E \approx 1/5$, $I_T/I_M \approx 1$ である。

3. 実験結果の検討

Fig. 3(C) に示したように、制限電極Lのバイアス電圧 V_B がその壁電位 V_w よりずっと深い負電圧になるとき ($V_B \ll V_w$) には H^- イオン電流は減衰する。これは H^- イオンがL電極の面前でプラズマ側に反射されるためと考えられる。一方、 $V_B \ll V_w$ でも電子電流が増大しているのは、L電極の孔の周辺で電子は反射されるが、中心部では逆に吸収されない分だけ密度が上昇して通過するためと考えられる。この差は電子の初期エネルギーが H^- イオンの初期エネルギーより大きいことに起因する。

次にL電極のバイアス電圧 V_B が V_w を越えてプラズ

Fig 3 (A) Mass analyzing patterns of H^- ions and electron under main acceleration voltage $V_E = 1$ kV. B_M : Analyzing magnetic field, I_e or I^- : Electron or H^- ion current to F. C. of M. A., V_M : Bias voltage of M electrode, V_B : Bias voltage of L electrode (at electrically floating condition). (B) Dependence of electron or H^- ion current (I_e or I^-) to F.C. of M.A. on bias voltage V_B of L electrode under $V_M = 0$ V. V_M : Bias voltage of M electrode, and V_E : Main acceleration voltage ($= 1$ kV), (C) Dependence of electron or H^- ion current (I_e or I^-) to F.C. of M. A. on bias voltage V_B of L electrode under $V_M = 130$ V. V_M : Bias voltage of M electrode, V_E : Main acceleration voltage ($= 1$ kV), and V_W : Wall potential of L electrode. (D) Dependence of electron on H^- ion current (I_e or I^-) to F. C. of M. A. on bias voltage V_M of intermediate electrode M (under $V_E = 1$ kV). V_B : Bias voltage of L electrode. (E) Relation between bias voltage V_M of M electrode and main acceleration voltage V_E of E electrode, which gives a maximum of H^- ion current to F. C. of M. A.. V_B : Bias voltage of L electrode.

マ電位に近づくとき ($V_B \gg V_W$), H^- イオン, 電子電流ともに著しく減少しているのは H^- イオン, 電子ともに L 電極に吸収されるためと考えられる。

L 電極のバイアス電圧 V_B がその壁電位に近いとき ($V_B \sim V_W$), Fig. 3(C) から推論できるように, H^- イ

オンが L 電極を通過しやすくなり (孔の周辺で反射されるが中心部では密度が上昇), 一方電子は L 電極に吸収され, H^- イオン電流が増大すると考えられる。

以上の L 電極の効果はその磁場とも関連していると推定できる。何故なら, L 電極面前のプラズマの電子温度

Fig. 4 Mass analyzing patterns of D^- ion and electron under main acceleration voltage $V_E = 1$ kV. B_M : Analyzing magnetic field, I_e or I^- : electron or D^- ion current to F. C. of M.A., V_M : Bias voltage of M electrode, V_B : Bias voltage of L electrode, and V_W : Wall potential of L electrode (at electrically floating condition).

~3 eV, H^- イオンの初期エネルギー~1 eV と仮定すれば, L電極の近くの磁場50 gauss の下では, 電子のサイクロトロン半径 $r_{ce} \approx 0.2$ cm, H^- イオンのサイクロトロン半径 $r_{ci} \approx 2.9$ cm であり, r_{ce} は L電極の孔の半径 0.3 cm に近い. 従って H^- イオンに関しては磁場の影響は小さいと考えられる. この推定は **Fig. 7** に示したように磁場 $B_z(y)$ を変えることによってある程度確かめることができる (L電極の付近では50 gauss が最適であり, より弱い磁場に対しては H^- イオン電流の変化は小さい).

中間電極Mの効果に対しても同様に考えることができる. 即ち, 中間電極Mのバイアス電圧 V_M が, その加速電圧 V_E に対して $V_M \ll 0.13 V_E$ のときには, L電極を通過して迷い込んだ侵入電子はM電極も通過して主加速領域M, E電極の間に入る. 一方 H^- イオン電流はその電子の空間電荷で制限されて減少する. 次に $V_M \gg 0.13 V_E$ に対してはL電極を通過した侵入電子と H^- イオンが共にM電極に吸収され, 引き出される電子電流, H^- イオン電流ともに減少する. $V_M \approx 0.13 V_E$ のときのみL電極を通過した侵入電子がM電極に吸収され, H^- イオンがM電極を通過する条件が充されると考えられる.

M電極のバイアス電圧 V_M に対しても, やはりその磁場 $B_z(y) \approx 50$ gauss に関係づけられる. 即ち, $V_M = 130$ V ($V_E = 1$ kV に対する最適バイアス電圧) のとき, そのマグネトロンカットオフ半径は, L, M電極間の距離に近い. その結果としてL電極を通過した侵入電子はM電極に効果的に吸収されると考えられる.

Table 1 に以上の V_W , V_B , V_M , V_E と電子, H^- イオンに対する効果を簡単にまとめた. 電子がL或いはM電

Fig. 5 Dependence of H^- or D^- ion current on main acceleration voltage of E electrode. V_M/V_E : Ratio between bias voltage V_M of M electrode and main acceleration voltage V_E of E electrode, I_A : Discharge anode current, and V_B : Bias voltage of L electrodes.

Table 1. Filter effects of two bias voltage for H^- ion and electron (e). V_W : Wall potential of L electrode, V_B : Bias voltage of L electrode (first), V_M : Bias voltage of M electrode(second), and V_E : Main acceleration voltage of E electrode (and third).

For L electrode			
	$V_B \gg V_W$	: H^- e	} absorb
○	$V_B \sim V_W$	: H^- e	pass absorb
	$V_B \ll V_W$	: H^- e	reflect pass
For M electrode			
	$V_M \gg 0.13 V_E$	: H^- e	} absorb
○	$V_M \sim 0.13 V_E$	: H^- e	pass absorb
	$V_M \ll 0.13 V_E$	: H^- e	limit pass

極に吸収される効果は“電子のマグネトロン吸収”とも考えることができる.

Fig. 6(B) に示した H^- 或いは D^- イオンの実効的電流密度は H^- に対して 3.3 mA/cm², D^- に対して 2.8 mA/cm² であり, この値は研究 I で推定した電流密度に近い (収束する以前の理論値).

----- S.P. -----

Fig. 6 (A) Schematic diagram of multi-aperture extraction. *Third extraction electrode E is changed from single aperture type to the same (9 apertures of 6 mm ϕ in 4 cm 2) type with L or M electrode as shown in Fig. 1 (B). S. P.: Sheet plasma L, F. C.: Large area faraday cup covering multi-aperture, I_T : Total H^- or D^- ion current, I_E : Negative current to E electrode, and I_M : Negative current to M electrode. *See Fig. 1 (A) and its figure caption.

(B) Dependence of total H^- or D^- ion current I_T to large F. C. covering multi-aperture, (9 aperture of 6 mm ϕ in 4 cm 2) on main acceleration voltage V_E under optimum conditions. I_A : Discharge anode current, V_M : Bias voltage of M electrode, and V_B : Bias voltage of L electrode.

(C) Dependence of negative current I_E or I_M to E or L electrode on main acceleration voltage V_E of electrode, corresponding to Fig. 6 (B). *See figure caption of Fig. 6 (B).

Fig. 1(A) に示したM電極とE電極にかかる電圧 V_M , V_E の極性をプラスからマイナスに変えると **Fig. 8(A)** に示したように H^+ , H_3^+ イオンに対する質量分析図が得られる。また、**Fig. 8 (B)** に示したように、そのL電極のバイアス電圧 V_B が、やはり壁電位に近いとき ($V_B \approx V_w$) 質量分析器の Faraday cup への H^+ , H_3^+ イオン電流が最大である。

Fig. 8(A), Fig. 8(B) からわかるように、この H^+ , H_3^+ イオン電流値は Fig. 3(A), Fig. 3(C), Fig. 4 に示した H^- 或いは D^- イオン電流値と同等である。この結果から、水素、重水素の正イオン、負イオンが同程度の密度でこの高能率シートプラズマの外側に存在すると推定できる。

4. 結 論

高能率シートプラズマの外側の大面积から弱磁場 (イオンビーム分光的に悪影響を与えない程度の) に垂直に配列した3枚の多孔型引き出し電極によって、電子電流を無視できる程に抑制しながら H^- , D^- イオンの大電流を引き出すことができる。その全面積に渡る H^- , D^- イオンの実効的電流密度は、セシウム表面変換法による電流密度 (収束させる以前の)³⁾ に匹敵する。

5. あとがき

このシリーズの研究 I, II の動機はセシウムの取扱いの不便さ、不安定さを避けることであった。当初我々は

Fig. 7 Dependence of H^- ion current to F. C. of M. A. on magnetic field $B_z(y)$ along the sheet plasma under $V_E = 1$ kV, $V_M = 130$ V and $V_B = -10$ V (while the width of the sheet plasma is kept at 14 cm by adjusting the magnetic field of permanent magnet for producing the sheet plasma). $B_z(y=0)$: Magnetic field in the center of the sheet plasma. $B_z(y=10)$: Magnetic field on L electrode.

セシウム表面変換法を試みて、プラズマ中に負のバイアス電圧 (-200 V) をかけた大面積の電極(コンバーター)を入れ、セシウムデイスペンサーでプラズマ中にセシウムを投入した。そのとき放電状態が急変し、引き出される H^- , D^- イオン電流も時間的に大きく変化した。コンバーター表面でのセシウムの附着の厚さがとくに問題であり、この調節によって正イオンから負イオンへの変換効率が大きく変化することが不安定性の最大要因である。

この高能率シートプラズマは当初セシウム表面変換法の損失を少なくするために開発したのであるが、偶然このプラズマ自身に H^- , D^- イオンが可成り含まれていることを発見し、引き出し方法を工夫した結果、セシウムを使用しないで大電流の H^- , D^- イオンが引き出せるようになった次第である。まだ外側のプラズマの密度 $10^{10}/cc$ 程度で引き出しており、更に放電電流を上げれば、より大電流密度が得られることが予期される。次に研究Ⅲではそれを試みる予定である。

Fig. 8 (A) Mass analyzing patterns of H^+ and H_3^+ ions under main acceleration voltage $V_E = -1$ kV, bias voltage of M electrode $V_B \approx V_W$ (wall potential of -7 V). *Each polarity of V_E or V_M in Fig. 1 (A) is changed from plus to minus. I^+ : Positive ion current to faraday cup of M. A. in Fig. 1 (A). B_M : Analyzing magnetic field.
(B) Dependence of H^+ and H_3^+ ion currents I^+ to F. C. of M. A. on bias of L electrode V_B under $V_E = -1$ kV and $V_M = -130$ V. V_B : Wall potential.

〔文 献〕

- 1) 浦本上進: 真空 **27** (1983) 600.
- 2) 浦本上進: 真空 **25** (1982) 719.
- 3) K. N. Leung and K. W. Ehlers: Rev. Sci. Instrum. **53** (6), (1982) 803.