シートプラズマによる陽子加速器と熱核融合反応 研究のための空間生成 H^- , D^- イオン源(II)

浦 本 上 進*

(昭和61年11月17日 受理)

Volume Produced H^- , D^- Ion Source for Proton Accelerator
and Theromo-Nuclear Fusion Research by Sheet Plasma (II)

Jōshin URAMOTO

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

(Received November 17, 1986)

By increasing thicknesses of multi-aperture electrodes to extract volume produced H^- , D^- ions in the sheet plasma, electron currents accelerated with H^- , D^- ions, are reduced around 10% compared with the H^- , D^- ion current (in a current density of 20~30 mA/cm² over a large area). Meanwhile, a total heat load of extraction electrodes is also reduced effectively: for an example, around a power density of 100 W/cm² for a H^- ion current of 190 mA from an area of 13 cm² with 6 mm ϕ $\times$ 25 apertures (7 cm²) or, for a H^- ion current density of 27 mA/cm² in transparency 54%.

1. ま え が き

著者はすでに、高能率シートプラズマによる空間生成法によって、陽子加速器と熱核融合反応研究のための H^- , D^- イオン源を設計した¹⁾。しかし、重要な課題として、(1) H^- , D^- イオンと共に加速される電子電流のより一層の抑制、(2)加速電極の熱負荷(最終加速電極への電子電流が主因)、(3) H^- , D^- イオン加速後の領域への中性ガス (H_2 , D_2) の流入量の抑制が未解決である。この論文ではこれ等の課題を多孔型加速電極の厚みを増大させることによって飛躍的に解決する方法を実験的に示す。

2. 加速電極の改善 (1)

Fig. 1 がすでに発表した¹⁾「シートプラズマによる陽子加速器と熱核融合反応研究のための空間生成 H^- , D^- イオン源(I)」の H^- , D^- イオン引き出し部分の構成

図であり、3枚の引き出し加速電極が L, M, E によって示されている。この装置での L, M, E 電極の厚みは全て 1 mm, その配置の間隔は LM 間, ME 間共に 4 mm であり, H_2 ガスの圧力 2.5×10^{-3} Torr, 放電陽極電流 150 A, 主加速電極 E の電圧 4 kV の実験条件の下で、引き出される全負電流 (H^- イオン電流 I^- と電子電流 I_e の和) の E 電極と Faraday Cup F.C. 間の距離 y' に対する依存性は Fig. 2 の E1 曲線に示く如くであった。これはすでに述べたように、E 電極の表面から 2.0 cm 程度迄は電子電流 I_e が H^- イオン電流 I^- より著しく多く、E 電極表面近くでは電子電流 I_e が H^- イオン電流 I^- の 2 倍以上存在することを示している。一般に陽子加速器への入射、熱核融合反応の加熱研究のための H^- , D^- イオンの最終加速電圧は 150 kV 以上要するので、この装置の主加速電極 E の直後に、更に高電圧の加速電極が必要になる。そのとき E 電極を通過した、 H^- , D^- イオン電流より 2 倍以上も大きな電子電流 I_e の存在は極めて重大な障害(電力損失と熱負荷の増大)となることは明らかである。何故なら、 H^- , D^- イオン電流の 2

* 名古屋大学プラズマ研究所 (名古屋市中区不老町)

Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus (Measurement separating Electron Current from H^- , D^- Ion Current). e : Electrons (Accelerated). V.C.: Main Vacuum Chamber (SUS), V_B : Bias Voltage of V.C., x, y, z : Orthogonal Coordinate. B_z : Axial Magnetic Field. GT: Glass Tube. L: First Extraction Electrode (Electrically Floated). M: Second or Intermediate Extraction Electrode. E: Third or Main Extraction Electrode. V_L : Voltage of L (~ -5 V). V_M : Voltage of M (~ 600 V). V_E : Voltage of E (4 kV). F.C.: Faraday Cup measuring Total Negative Current. I^- : Total H^- , D^- Ion Current. I_e : Electron Current. y' : Distance between E electrode and F.C. S.P.: Sheet Plasma ($x \approx 25$ cm, $y \approx 28$ cm, $z \approx 30$ cm in V.C.) along B_z (60 $\sim$ 100 gauss).

倍以上に達する電力を電子加速のために消費することになり、エネルギー効率を最重要視する熱核融合反応研究には不適当になるからである。従ってE電極通過の電子電流 I_e は低加速電圧 (≤ 4 kV) の段階で少くとも H^- , D^- イオン電流 I^- の80%程度以下 (現在の150 keV 水素, 重水素の正イオン H^+ , D^+ の中性粒子への変換効率を一つの基準として) に抑制する工夫が必要になる。著者は一連の研究で, 2枚の引き出し電極に中間電極 (M) を追加し²⁾, 電子電流を抑制しながら H^- , D^- イオンを効果的に増大し引き出すことに, ある程度成功している。しかしながら, Fig. 2 のE1 曲線が示すように4 keV 領域の電子電流の抑制には, 未だ不十分である。この対策として, この論文の実験では先づ, E電極の厚みを1 mm から4 mm に増大し, 多孔形のE電極の孔の中で弱磁場により電子軌道を曲げ電子電流を吸収する実験を行った。この実験結果はFig. 2 のE4 曲線のように, Faraday Cup F.C. への全負電流 ($I^- + I_e$) の y' 依存性が数%以下になり, 著しい電子電流の抑制効果を示している。即ち, 電子電流の抑制は, 実験的な観測からは, すでに報告したように³⁾, 負電流 ($I^- + I_e$) がE電極とF.C. 間の距離 y' により, 急変しないことによって決定することができる。この実験条件では, 加速電極付近の磁場が60 $\sim$ 80 gauss であり, 4 keV の電子のサイクロト

Fig. 2 Dependence (for Electrode) of H^- Ion Current I^- and Electron Current I_e on Distance y' between Faraday Cup and E electrode.

E1: A Case corresponding to Thickness 1 mm of E Electrode. E4: Another Case corresponding to Thickness 4 mm of E electrode. Extraction Conditions: $V_B = -50$ V, $V_E = 4$ kV, $V_M = 600$ V, $V_L = -5$ V (floating), Discharge Anode Current ≈ 150 A, Gas Pressure of $H_2 \approx 2.5 \times 10^{-3}$ Torr.

Fig. 3 Schematic Diagram of Experimental Apparatus (Mass Analysis of H^- , D^- Ion or Electron). MA: Mass Analyzer. B_M : Mass Analyzing Magnetic Field. I_{MA} : H^- Ion Current to Faraday Cup F.C. of MA. I_{eM} : Electron Current to F.C. of MA. (See Fig. 1 also).

Fig. 4 Mass Analysis Patterns of H^- Ion Current and Electron Current corresponding to E electrode Thickness 1 mm (E1) or 4 mm (E4). B_M : Mass Analyzing Magnetic Field. I_{MA} : H^- Ion Current to F.C. of Mass Analyzer MA. I_{eM} : Electron Current to F.C. of MA. I_{eM1} : A Electron Current Corresponding to E electrode Thickness 1 mm. I_{eM4} : Another Electron Current corresponding to E electrode Thickness 4 mm.

ロン半径は2.7~3.6 cmである。従って y' のこの距離以内と以外で負電流が殆んど変動しなくなることで電子電流の効果的な抑制を確認できる。更にこの事実は **Fig. 3** に示したような質量分析器の配置によっても追求された。

Fig. 5 Dependence (for M electrode) of H^- Ion Current I^- and Electron Current I_e on Distance y' between F.C. and E electrode. M2: A case corresponding to Thickness 2 mm of M electrode (E electrode Thickness 1 mm). M2 and E4: Another Case corresponding to M electrode Thickness 2 mm and E electrode Thickness 4 mm.

Fig. 4 は **Fig. 2** に対応した質量分析図である。 **Fig. 4** は明らかに E 電極の厚みを 1 mm から 4 mm に増大したことによる電子電流の著しい減少を支持している。

かくして、主加速電極 E の厚みを増すことによって、4 keV 程度のエネルギー段階で電子電流を H^- , D^- イオン電流に比較して無視できる程効果的に抑制でき、且つ、 H^- , D^- イオンの電流密度の確保もできるので陽子加速器と熱核融合反応研究のために大きく前進したと考えられる。しかしながら、 E 電極の熱負荷は当然残された重要課題であり次の検討と工夫が必要になる(但し、電極の厚みを増大したので、熱容量的には熱負荷が緩和されたことに留意すべきである。

3. 加速電極の改善(2)

この実験の主加速電極 E への熱負荷の軽減と電子電流のより一層の抑制のために、更に中間引き出し電極 M の改善が試みられた。即ち、同様に磁場の効果(マグネトロン軌道)に期待して M 電極の厚みが 1 mm から 2 mm に増大された。これに伴って最初の引き出し電極 L と M 電極の間は 3 mm に縮小され空間電荷制限の緩和も期待された。実験結果として、**Fig. 5** の M2 曲線のように E 電極直後の電子電流は **Fig. 2** の E1 曲線 (E : 1 mm, M : 1 mm, L : 1 mm) に比較して約 1/2 に抑制されている。このとき E 電極への全負電流が 0.23 A (4 kV

で) から0.12 A に減少し, E 電極の熱負荷が1/2 近くに軽減されることが実験的に確かめられた. M 電極の電圧は600 V 前後であり, 電流は0.2 A から0.4 A 程度の変化であるから, 引き出し加速電極全体としても1 kW 程度から700 W 程度に軽減された. E 電極の熱負荷を加速面積約4 cm² で評価すると約120 W/cm², 同様に M 電極に対しては, 60 W/cm² に軽減されたことになる.

中間引き出し電極 M の厚みを2 mm にして, 更に E 電極の厚みを4 mm にすると (Fig. 5), Fig. 5 の $E4$ and $M2$ 曲線のように電子電流がより一層抑制 (約10% 以下) されることがわかる. なお, M 電極と L 電極間が4 mm から3 mm に縮小されたことによって, 空間電荷制限が緩和され20%程度負電流が増大していることが Fig. 2 と Fig. 5 の比較によってわかる.

4. 電子電流と電極の熱負荷対策

前章迄の実験によって, 電子電流を H^- イオン電流の10%程度以下に抑制し, 且つ電極の熱負荷を, H^- イオン電流密度10数 mA/cm² (引き出し部の全面積に対して) から20 mA/cm² (引き出し孔のみの合計面積に対して) に対して, 120 W/cm² 程度に軽減するには, Fig. 6 に示したように E 電極の厚みを4 mm, M 電極の厚みを

Fig. 7 Dependence of D^- Ion Current I^- and Electron Current I_e on Distance y' between F.C. and E electrode. Extraction Conditions: E electrode Thickness 4 mm, M electrode Thickness 2 mm, and L electrode Thickness 1 mm, $V_B = -50$ V, $V_E = 4$ kV, $V_M \approx 600$ V, $V_L \approx -4$ V (floating), Discharge Anode Current ≈ 160 A, Gas Pressure of $D_2 \approx 2.5 \times 10^{-3}$ Torr.

Fig. 6 Schematic Diagram of Experimental Apparatus (Extracting only H^- , D^- Ion Current). I^- : H^- or D^- Ion Current. E , M , L electrode Thickness: 4, 2, 1 mm. (See Fig. 1 also).

Fig. 8 Dependence of H^- Ion Current I^- and Electron Current I_e on y' for 25 Extraction Apertures. Extraction Conditions: E electrode Thickness 4 mm, M electrode Thickness 2 mm and L electrode Thickness 1 mm, $V_B = -50$ V, $V_E = 4$ kV, $V_M \approx 600$ V, $V_L \approx -5$ V (floating), Discharge Anode Current ≈ 150 A, Gas Pressure of $H_2 \approx 2.5 \times 10^{-3}$ Torr.

2 mm 程度にすればよいことが確認された。重水素 D_2 の場合にもこの方法が適用され、放電電流 160 A (H_2 の例より 10 A 大きな電流) の場合の 1 例として **Fig. 7** の様な結果を得た。即ち、同様に電子電流が D^- イオン電流の 10% 程度に縮小され、且つ熱負荷も 150 W/cm^2 程度に軽減されることがわかった。

次に H^- , D^- イオンの引き出し電極 (L, M, E) の孔を 9 ケから 25 ケに増加させたときも同様であり **Fig. 8** に示したように負電流 ($I_e + I^-$) の y' への依存性は小さく、電子電流が 10% 前後に抑制されたことがわかる。なお、**Fig. 8** で 25 ケの引き出し孔のみの全面積は約 7 cm^2 であり H^- イオン電流密度は 27 mA/cm^2 に達する (透過率は約 54%)。またこのとき E 電極の熱負荷は約 100 W/cm^2 であり実用上問題ないと考えられる。

5. 原理的検討

この論文で著者は、電子電流の抑制と電極の熱負荷の軽減を実用規模の問題として実験的に追求した。この原理を簡単に考察するとき、電子のマグネトロンカットの距離 d_c (cm) と加速電極間の距離の関係が重要になる。即ち、

$$d_c \approx \frac{3.4 \sqrt{V_e}}{B} \quad (1)$$

Fig. 9 Effects on Electron Path by Extraction Electrode Thickness. E electrode Thickness: 4 mm, M electrode Thickness: 2 mm, L electrode Thickness: 1 mm, e : Electron Path, B: Axial Magnetic Field ($\equiv B_z$), Extraction Aperture: 6 mm ϕ , Discharge Anode (for Sheet Plasma) Potential: 0 V.

ここに B は加速電極間の平均磁場 (電極面に平行な成分)、 V_e は電子加速 (電極) 電圧であり、 B : (gauss)、 V_e : (V) 単位である。 $B \approx 70 \text{ gauss}$ (実験条件)、M 電極の加速電圧約 600 V に対して、電子のマグネトロンカット距離は約 1.0 cm、E 電極の加速電圧約 4 kV に対してのそれは約 3.0 cm であり、**Fig. 9** に示したように L の中心から出発した電子は図の (e) で表示した範囲の軌道を取る。但し、この表示は電子の衝突と空間電荷の効果は考慮していないので一つの基礎的表示に過ぎない。しかしながら、主加速電極 E で電子が吸収される様子はある程度理解できる。中間加速電極 M での電子吸収は、やはり電子と中性粒子との衝突 (プラズマ側の H_2 , D_2 の圧力は約 2.5×10^{-3} Torr であり、当然考慮が必要) の効果が影響していると推定できる。

ここで加速電極間の平均磁場 B を強くすれば、電子の吸収が更に効果的であると推論できるが、 H^- , D^- イオンビームの発散の問題を考慮すると、正イオン (H^+ , D^+) ビームで許される数 10 gauss の弱磁場での電子の吸収を効果的に行うのが今後の発展の点で望ましい。

6. 終りに

電子電流の効果的な抑制、加速電極の熱負荷の軽減は、 H^- , D^- イオン源の陽子加速器と熱核融合反応の研究への適用に当たって極めて重要な課題であった。しかし、一般には H^- , D^- イオンビームの発散に影響しな

い程度の弱磁場で効果的に行うことは期待できなかった。今回の加速電極の厚みを増大させる方法は H^- , D^- イオンの電流密度を減少させず、且つ弱磁場の範囲にあるので、極めて有効な方法と考えられる。

なお加速電極の厚みを増大させることは加速電極の熱容量を増大させるので一つの有効な熱負荷対策である。また、シートプラズマ生成領域から加速領域への中性ガス流量を減少させる（厚みを増大させることによって真

空の排気コンダクタンスを縮小させる）ので、加速領域後の排気ポンプの必要速度の縮小にも極めて有効な方法であると結論できる。

〔文 献〕

- 1) 浦本上進：真空，**29** (1986) 212.
- 2) 浦本上進：真空，**27** (1984) 610.
- 3) 浦本上進：真空，**28** (1985) 742.