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)

浦 本 上 進*

(昭和60年12月18日 受理)

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

Jōshin URAMOTO

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

(Received December 18, 1985)

In order to apply a sheet plasma type of volume produced H^- , D^- ion source to injection of proton accelerators and neutral beam injection of thermo-nuclear fusion researches, a large sheet plasma of width 20~25 cm and length 30 cm is produced in the discharge current of 175 A, H_2 or D_2 gas pressure of about 2.5×10^{-3} Torr and gas flow of (2.0~2.5) Torr l/sec in magnetic field of (60~110) gauss.

Thus, H^- or D^- ion currents are extracted in current densities up to 19 mA/cm² or 16 mA respectively, which are uniform within 10% over the large area (above 250 cm²) of the sheet plasma surface, and for the acceleration voltage up to 4.5 kV.

Electron current accelerated with H^- or D^- ions becomes negligible beyond a distance of 2 cm from the final acceleration electrode.

1. ま え が き

H^- , D^- イオン源としては, 空間生成 (Volume Production) 方式¹⁾が, 従来のセシウム方式に比較して, 取扱いと不純物の点で優れていることは明らかである. しかしながら空間生成方式は電流密度, 引き出し面積, 電子流の分離, 放電タ力効率, ガス効率, 電子を分離した測定法等に大きな問題を残している. 著者は以上の問題を解決するために, すでに7篇の論文に示すような基礎研究を行った²⁻⁷⁾. 即ち, 高能率シートプラズマの開発^{6,7)}と H^- , D^- イオン源への適用¹⁾, 大面積から電子を抑制しながら H^- , D^- イオンの大電流を引き出す方法²⁾, 最適シートプラズマ容器の追求⁴⁾, H^- , D^- イオンと電子を分離した測定法⁵⁾, シートプラズマでの空間生成 H^- , D^- イオン源のマルチカスププラズマに対する物

理的特長³⁾等に関してである.

以上の基礎研究に立脚して, 今回より陽子加速器への入射⁸⁾, 熱核融合反応研究の中性粒子入射加熱⁹⁾に充分対応できる規模¹⁰⁾での空間生成方式 H^- , D^- イオン源の追求に着手した. 具体的には, (1)シートプラズマの真空容器 (引き出し部分) を従来の $19 \times 18 \times 23$ cm³ から $28 \times 25 \times 30$ cm³ に拡張 (シートプラズマの幅と長さの増大) し, H^- , D^- イオン引き出し面積の実用規模への拡大 (加速器: 数十 cm², 熱核融合中性粒子入射数百 cm²), (2)放電タ流を増大し, H^- , D^- イオンの電流密度の実用規模への上昇 (加速器: 5 mA/cm² 以上, 核融合中性粒子入射 15 mA/cm² 以上), (3) H^- , D^- イオン電流に対する電子電流を1/10以下に抑制する, ことである. 以上の要請には, 放電タ力効率, ガス効率, 加速電極の熱負荷の問題が伴うことは当然であり, 今回は実用面でこれ等の問題も追求される.

* 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 (Sheet Plasma Surface). S.P.: Sheet Plasma. A: discharge Anode. K: Discharge Cathode. G_1 , G_2 : First, Second Intermediate Electrode. GT: Glass Tube, V.C.: Main Vacuum Chamber (SUS.) C: Magnetic Field Coils for Axial Magnetic Field B_z . I_A : Discharge Anode Current. I_d : Total Discharge Current. V_B : Bias Voltage of V.C., x , y , z : Orthogonal Coordinate.

(B) Schematic Diagram of Experimental Apparatus (Measurements of Accelerated Negative or Positive Ions). L: First Extraction Electrode (Electrically Floated). M: Second or Intermediate Extraction Electrode. E: Third or Final Extraction Electrode. V_M : Voltage of M electrode. V_E : Voltage of E Electrode. V_L : Voltage of L. F.C.: Faraday Cup measuring Total Negative or Positive Current. I^- : Total Negative (H^- , D^-) Current, I^+ : Total Positive Current (H^+ , H_2^+ , H_3^+ or D^+ , D_2^+ , D_3^+), y' : Distance between E Electrode and F.C. (See Fig. 1(A) also).

(C) Schematic Diagram of Experimental Apparatus (Measurement separating Electron Current from H^- , D^- Current). e : Electron Current. (See Figs. 1(A) and 1(B) also).

Fig. 1(D) Schematic Diagram of Experimental Apparatus (Mass Analysis of H^- , D^- Ions or H^+ , H_2^+ , H_3^+ ; D^+ , D_2^+ , D_3^+). MA: Mass Analyzer. B_M : Mass Analyzing Magnetic field. I_{MA-} : Negative Current to Faraday Cup F.C. of MA. I_{MA+} : Positive Current to F.C. of MA. (See Figs. 1(A), 1(B) and 1(C)).

(A)

(B)

Fig. 2(A) Normalized Plasma Density Distribution $n(y)/n(o)$ (determined from Positive Ion Current Density). $n(o)$: Plasma Density at the center of Sheet Plasma. $n(y)$: Plasma Density Distribution to y direction. y : Distance perpendicular to Sheet Plasma Surface (See Figs. 1). L : Position of First Extraction Electrode.

(B) Electron Temperature V_e Distribution. y : Distance perpendicular to Sheet Plasma Surface. L : Position of First Extraction Electrode.

2. 大型シートプラズマの生成

Fig. 1(A), 1(B), 1(C), 1(D) が高能率シートプラズマを生成し, H^- , D^- イオンを引き出し分析する装置の概略図である。今回の実験では以前より大きな幅のシートプラズマを生成するために, “ノシモチプラズマ”⁶⁾用の強力な 2 枚の角形永久磁石が使用されている。かくして Fig. 1(A) に示したように H^- , D^- イオン引き出し領域 (V.C.) で, 幅 20~25 cm, 厚み約 1.0 cm, 長さ約 30 cm の高能率シートプラズマが生成され, 引き出し面積

600 cm² 以上が確保されている。

このシートプラズマの中心附近 ($y \approx 0$) の磁場 (B_z) は約 110 gauss, 引き出し電極附近 ($y \approx 15$ cm) の磁場は約 60 gauss である。

放電陽極電流 I_A は全放電タ流 I_0 の約 90% であり, 大きな H^- , D^- イオン電流を引き出すために約 160 A 迄上昇されている。また, この放電タ流で放電の安定性を確保するために H_2 , D_2 ガスの圧力と流量も約 2.5×10^{-13} Torr, 2.0~2.5 Torr l/sec に増大されている。

放電陽極電流 $I_A \approx 160$ A に於ける放電タ圧は約 120 V

Fig. 3 Dependence of H^- Ion Current Efficiency on Bias Voltage V_B of Main Vacuum Chamber (V.C.) under a Constant Discharge Power (12.4 kW). γ : H^- ion current normalized by a H^- ion current in a case of $V_B = -50$ V. Discharge Conditions: Voltage $V_d = 104$ V and Current $I_d = 120$ A at $V_B = 0$ V, $V_d = 118$ V and $I_d = 105$ A at $V_B = -50$ V.

(第2中間電極 G_2 と陽極 A 間は約65 V) であり、このときプラズマ密度、電子温度は中心附近 ($y=0$) で約 $5 \times 10^{12}/\text{cc}$, 25 eV, 引き出し電極 L の表面 ($y=15$ cm) で約 $3 \times 10^{11}/\text{cc}$, 2.0 eV である。そのプラズマの密度分布、電子温度分布は Fig. 2(A), 2(B) のようであり、すでに発表したシートプラズマの特長¹⁾を示している。

3. H^- , D^- イオン電流密度の目標値と放電陽極電流及び加速電圧

Fig. 1(B), Fig. 1(C) に示したように H^- , D^- イオン電流は3枚の引き出し電極 L, M, E によって²⁾, シートプラズマの外側約15 cm の場所から引き出される。真空容器 V.C. (SUS) の放電陽極 A に対するバイアス電圧 V_B は大きな放電陽極電流 (100 A 以上) に対しては前回と相違し、Fig. 3 に示したように $V_B \approx -50$ V で H^- , D^- イオン電流に対して放電電力効率が最大であった。なおこのとき引き出し第1電極 L は電氣的に浮動したとき効率が最大であり、その浮動電位は-5 V 前後であった。

次に M 電極の電位 V_M は最終加速電極 E の電位 V_E に対して電子電流の吸収³⁾を考慮して $V_M \approx 0.2 V_E$ に保たれた。また、水素の正イオン (H^+ , H_2^+ , H_3^+) 電流は M, E 電極の極性を変換することによって引き出され、 H^- イオン電流と比較された。

先づ以前のデータ^{2,3,4)}との関連で L, M, E の引き出し電極の約 4 cm^2 に於ける $6 \text{ mm}\phi$ の孔9ヶから H^- イオン電流が引き出され、Fig. 4 に示したように E 電極と Faraday Cup F.C. との距離 y' 依存性が決定された⁵⁾。

Fig. 4 Dependence of H^- Ion Current I^- and (H^+ , H_2^+ , H_3^+) Ion Current I^+ on Distance y' between Faraday Cup and E electrode. ($I_e + I^-$): Electron Current I_e and H^- ion current I^- . Extraction Conditions: $V_B = -50$ V, $V_E = 4$ kV, $V_M = 0.2 V_E$, $V_L = -4$ V (floating) and $I_A = 160$ A. (See Figs. 1(B) and 1(C)).

このとき H^- イオンの最終加速電圧 V_E は4 kV, E 電極近くの磁場は60 gauss であり、Fig. 4 から理解できるように電子電流 I_e は $y' > 1.5$ cm で急激に減少している。一方水素の正イオン電流は y' 依存性が殆んどなく、 H^- イオン電流 I^- の1.2倍程度である。この $V_E = 4$ kV に於ける H^- イオン電流 I^- と、Fig. 1(D) に示したような90°型質量分析器 (曲率半径約6.5 cm) の $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ の Faraday Cup への電流 I_{MA} の放電陽極電流 I_A に対する依存性が Fig. 5(A), 5(B) に示されている。 I^- がほぼ I_{MA} に比例していることがわかる。

次に H^- イオンの最終加速電圧 V_E に対する H^- イオン電流の依存性が、放電陽極電流 I_A を変えながら Fig. 6 に示されている。このときその H^- イオン全電流測定用 F.C. (Fig. 1(C)) は E 電極から4 cm 以上離れてあり ($y' \geq 4$ cm), 電子電流はカットされている⁵⁾。この $I^- - V_E$ 特性はその理論的空間電荷制限則 (Fig. 6 の TH 曲線) と比較できる。即ち、

$$I_{TH}^- = 5.4 \times 10^{-8} V_E^{3/2} S / d^2 \quad (1)$$

ここに、 I_{TH}^- は H^- イオン電流 (A), V_E は最終加速電圧 (V), S は引き出し孔の全面積 (cm^2), d は実効的 H^- イ

Fig. 5(A) Mass Analysis Patterns of H^- Ion and (H^+ , H_2^+ , H_3^+) Ions. I_{MA}^- : H^- Ion current to F.C. of Mass Analyzer. I_{MA}^+ : (H^+ , H_2^+ , H_3^+) ion current to F.C. of Mass Analyzer. I_e : Electron current to F.C. of Mass Analyzer. B_M : Magnetic Field for Mass Analysis. (See Fig. 1(D)).

(B) Dependences of Total H^- Ion Current I^- and Maximum H^- Ion Current I_{MA}^- to F.C. of Mass Analyzer on Discharge Anode Current I_A . Extraction Voltages: $V_E=4$ kV, $V_M=0.2$ V_E , $V_L=-4$ V (floating), and $V_B=-50$ V.

Fig. 6 Dependences of H^- Ion Current I^- on Extraction Voltage V_E under Various Discharge Anode Currents I_A . $V_M=0.2$ V_E , $V_L \approx -4$ V, $V_B=-50$ V. TH: theoretical Space charge Limit Curve for H^- Ion.

オンの加速距離である。(1)式で今回の実験条件, $S(6 \text{ mm}\phi \times 9) \approx 2.5 \text{ cm}^2$, 加速実効距離 $d \approx 0.8 \text{ cm}$ (LM電極間0.4 cm, M電極の厚み0.1 cm, ME電極間0.5 cmであり, 全距離は1.0 cmである。しかし, LM間にはL電

極が電氣的に浮動されているので正イオンが侵入することを考慮してLM間の H^- イオン実効加速距離を半分の0.2 cmと推定している)に取ればFig. 6のTH曲線が得られる。しかしながら, 電子が存在するので実験値との正確な比較は困難である。

同様に水素の正イオン電流 I^+ の V_E 依存性, I^+-V_E 特性がFig. 7に示されており, やはり H^+ , H_3^+ としての理論的空間電荷制限則(Lが電氣的に浮動されているのでLM電極間には電子が侵入する。かくしてその実効加速距離は H^- と同様に $d \approx 0.8 \text{ cm}$ に取られている)と比較されている。質量分析(Fig. 5(A))の結果では H_3^+ イオンが多いので H_3^+ の場合の理論値と実験値を比較すると, 実験値が可成り大きい。 H^- イオンの場合と同様に電子の存在(中和が起る)が考慮されなければならない。

正確な理論値の導入は困難であるとしても, 以上の実験結果から, 今回の装置ではシートプラズマ表面から15 cm離れて H^- イオンを引き出すとして, 放電陽極電流 $I_A \approx 160 \text{ A}$ (全放電々流 $I_d \approx 175 \text{ A}$), 加速電圧 $V_E=4 \sim 4.5 \text{ kV}$ にて, H^- イオン電流密度 13 mA/cm^2 ($50 \text{ mA}/4 \text{ cm}^2$)から 19 mA/cm^2 ($75 \text{ mA}/4 \text{ cm}^2$)に達することがわかる。また6 mmφの9ケの引き出し孔の面積(2.5 cm^2)のみで H^- イオン電流密度を換算すると $20 \sim 30 \text{ mA/cm}^2$ である。Fig. 2(A)に示したプラズマの密度とこの H^- イオン電流密度との関連を調べると,

Fig. 7 Dependences of H^+ Ion Current I^+ on V_E under Various I_A . $V_M = -0.2|V_E|$. $V_L \approx -4$ V. $V_B = -50$ V. TH: Theoretical Space Charge Limit Curve for H^+ Ion or H_3^+ Ion.

$I_A \approx 160$ A で、引き出し電極 (L) の近くで正イオン密度 (H_3^+) として測定されたプラズマ密度は $n^+ \approx 3 \times 10^{11}/\text{cc}$ であるから、 H^- イオン密度も同程度に仮定し、 H^- イオンの初期エネルギーを 1 eV (電子温度と同程度) とすれば、 H^- イオン電流密度は

$$j^- = en^-v^- \approx 67 \text{ mA/cm}^2 \quad (2)$$

のように評価される。ここに e は電子の電荷、 n^- は H^- イオンの密度、 v^- は H^- イオンの初速度である。実験値が前述のようにこの値の 1/2 程度であるのは、電子密度 n_e も含めたプラズマ電荷の中和条件

$$n^- = n^+ - n_e \quad (3)$$

を考慮しなければならないことを示している。他に H^- イオンの空間生成条件も問題である。

重水素の負イオン D^- に関しても H^- イオンと同様な測定が行われ、Fig. 8 に示したような放電陽極電流 I_A と D^- イオン電流 I_D^- (6 mmφ の 9 ケ孔/4 cm² からの引き出し) の関係が決定された。このとき D^- イオンの最終加速電圧は $V_E = 4.5$ kV であり、 $I_A = 170$ A で D^- イオン電流密度が 15 mA/cm² (孔の面積のみでは 24 mA/cm²) に達する。

かくして、陽子加速器への入射と熱核融合反応の中性粒子入射の研究に充分な H^- , D^- イオン電流密度が今回の大型真空容器中の高エネルギーシートプラズマによって達成できることがわかる。

Fig. 8 Dependence of D^- Ion Current I_D^- on Discharge Anode Current I_A at Extractin Voltage $V_E = 4.5$ kV. I_D^- : D^- Ion Current from Apertures of 6 mmφ × 9/4 cm². $V_M = 0.2 V_E$. $V_L \approx -5$ V (floating). $V_B = -50$ V.

4. H^- , D^- イオン引き出し面積の拡大と一様性

次に、熱核融合反応の中性粒子入射の研究には、 H^- , D^- イオンの引き出し面積の拡大と、その電流密度の一様性が特に重要な課題となる。引き出し面積の拡大はプラズマ領域からの H_2 或いは D_2 ガスの排気処理の問題が伴うので大型排気ポンプが必要であり、今回の実験装置では可成り限定された。かくして、L, M, E の引き出し電極の約 13 cm² に Fig. 9 に示したように 6 mmφ の孔 25 ケ (孔面積合計約 7 cm²) 迄に限定して開け、 H^- イオン電流を引き出す実験を行った。結果として 6 mmφ の孔 9 ケの場合と同様な条件加速電圧 $V_E \approx 4.5$ kV、放電陽極電流 170 A にて Fig. 9 に示したように約 200 mA の H^- イオン電流が引き出され面積にほぼ比例することを示している。なお Fig. 9 に示した代表引き出し孔 MA からの質量分析器の F.C. への電流も 9 ケ孔の場合と同様であった。

残る問題として、Fig. 1(A) に見られるような SUS 真空容器 V.C. のシートプラズマ全表面に渡っての H^- イオン電流密度の一様性が重要となる。再び約 4 cm² に 6 mmφ の孔 9 ケを開けた離心型引き出し電極を用いて、Fig. 10 に示したようにプラズマ表面を回転させ、全 H^- イオン電流と質量分析器 (離心型を使用) の F.C. への H^- イオン電流を調べた。結果として、シートプラ

Fig. 9 Dependence of H^- Ion Current (from Apertures of $6\text{ mm}\phi \times 25/13\text{ cm}^2$) I_{-3} on Discharge Anode Current at $V_E = 4.5\text{ kV}$. MA: An Aperture for Mass Analysis.

ズマ表面 250 cm^2 以上 ($\sim 600\text{ cm}^2$ 可能性あり) に渡って H^- イオン電流の変動幅10%以内で一様であることが確認された。

5. 加速器と熱核融合研究への適用と問題点

前章迄の実験によって、高能率シートプラズマによる空間生成 H^- , D^- イオン源が、電流密度、引き出し面積とその一様性に関しては充分陽子加速器への入射、熱核融合反応研究の中性子入射への使用が可能であることが明らかとなった。特に加速器への入射に関してはセシウム表面変換方式に比較して電流密度、取扱い、不純物の点でこの高能率シートプラズマ方式が格段に優れていることが証明されたと考えられる。しかしながら熱核融合反応研究に使用し、現在の正イオン方式の中性子入射の性能を越えるにはまだいくつかの難問を解決しなければならない。先づ(1)電子電流による最終加速電極 E への熱負荷である。具体例で示すと、Fig. 1(B) の約 4 cm^2 の $6\text{ mm}\phi$ の孔9ヶから、Fig. 6 のように H^- イオン電流の最大 75 mA (19 mA/cm^2) を引き出すとき、E, M 電極への電流 (電子のマグネトロン吸収された電流が大部分) は約 0.4 A ($V_E \approx 4.5\text{ kV}$)、約 0.15 A ($V_E \approx 1\text{ kV}$) に達する。即ち、E 電極に約 1.8 kW 、M 電極に 150 W の電力が流入する。 4 cm^2 で考えるとその電力密度は E 電極で約 650 W/cm^2 、M 電極で約 38 W/cm^2 に達する。別の観点から、加速された H^- イオン密度

Fig. 10 H^- Ion Extractions from Various Positions of Sheet Plasma Surface. S.P. Sheet Plasma (x - z plane). L, M, E: Three Extraction Electrodes. O: Center of Three Electrodes. θ : Rotational Angle of Three Electrodes (H^- Ion Currents are determined at $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ and 270°).

に対する加速されて E 電極に吸収される電子密度が約 13% まで存在することを意味する。この推定は電子と H^- イオンの質量比の平方根から決定される (H^- イオンと電子数が等しいときには約 42 倍の電子電流になる)。一般に熱核融合反応の研究には大面積に渡って H^- , D^- イオン電流を引き出すので、例えば 4 cm^2 から 400 cm^2 に拡大すると、これに伴って E 電極の熱負荷は約 180 kW になる。明らかに過大な E 電極の熱負荷になり、極めて短いパルスイオン源になる。従って、更に電子の低エネルギー段階 (低い加速電圧) での吸収処理が今後の重要課題となる。

次に、(2)として H_2 , D_2 ガスの流量処理の問題である。正イオン中性粒子入射方式のように中性化のためのガスは不要としても、約 180 A の放電を圧力 $2.5 \times 10^{-3}\text{ Torr}$ (H^- , D^- の最大効率の空間生成圧力条件) で行い、大きな幅のシートプラズマを安定に生成するには、 H_2 , D_2 ガスの流量として $2 \sim 2.5\text{ Torr l/sec}$ を要する。このガス流量を今回の実験 (引き出し面積が小さい) のように大部分放電領域 ($2.5 \times 10^{-3}\text{ Torr}$) で排気すれば 10^3 l/sec 程度の排気ポンプで処理できる。これは現在の分子ポンプ技術、高電圧の絶縁技術を駆使すれば容易に解決する。しかしながら、引き出し面積が拡大し、 H_2 , D_2 ガスを加速段階 (E 電極側) で処理し、少なくとも $2.5 \times 10^{-5}\text{ Torr}$ に保つとすれば、 10^5 l/sec の排気ポンプが必要になる。この排気速度は正イオン方式に比較すれば 1/10 程度であり、また H^- , D^- イオンの引き出し電極数を、その透過率を低下しないようにしながら、できるだけ多くすれば、加速側 (E 電極) へのガス流量が低減し、排気ポンプ速度も更に小さくできる。排気系としては放

電領域と加速側の2系統で排気すれば効率が良く、簡単になると考えられる。

なお、(3)として高能率シートプラズマの幅と長さを更に拡大し、 H^- 、 D^- イオンの引き出し面積をできるだけ拡張することが、一定のガス流量で H^- 、 D^- イオン電流を多くできるので(ガス効率が高くなる)、やはり重要課題である。

他に、 H^- 、 D^- イオンを収束し電流密度を上げる技術も熱負荷の軽減とガス効率の改善に関連して重要な課題となる。

〔文 献〕

- 1) 浦本上進：真空27 (1984) 600.
- 2) 浦本上進：真空27 (1984) 610.
- 3) 浦本上進：真空28 (1985) 575.
- 4) 浦本上進：真空28 (1985) 701.
- 5) 浦本上進：真空28 (1985) 742.
- 6) 浦本上進：真空25 (1982) 719.
- 7) 浦本上進：真空26 (1983) 551.
- 8) A. Takagi, Y. Mori, Z. Igarashi, K. Ikegami, C. Kubota and S. Fukumoto: KEK Preprint 83-29 January 1984 A (Japan), Proc. of the 3rd Symposium on the Production and Neutralization of the Negative Hydrogen Ions and Beams, 14-18 Nov. 1983, BNL, Upton, NY.
- 9) 名古屋大学プラズマ研究所 R 計画デザインチーム：核融合反応プラズマ実験装置技術報告〔Ⅲ〕昭和56年12月.
- 10) 浦本上進：プラズマ研便り 2, No. 4 (1984) 7.