

慣性静電閉じ込めにおける電子ビームおよびイオンビーム生成

内海 倫明^{*1} 羅 氷洸^{*2} 進藤 春雄^{*3}

Electron-Beam and Ion-Beam Generation on Inertial Electrostatic Confinement

by

Michiaki UTSUMI^{*1}, Luo BINGYANG^{*2} and Haruo SHINDO^{*3}

(Received on Mar. 31, 2025 and accepted on Jun. 20, 2025)

Abstract

A fundamental study on using a two-ring cathode in inertial electrostatic confinement (IEC) discharge was performed. Two different sizes of one-ring and two-ring cathodes were prepared for measuring plasma floating potential and current-voltage characteristics using a cylindrical shaped single probe. The peak of floating potential of two-ring cathodes was about three times larger than that of one-ring cathodes. An ion beam incident on a Langmuir probe in a plasma gives rise to an extra knee in the electron saturation part of the current-voltage characteristics of the probe. At the center of the smaller one of the two-ring cathodes, the extra knee was observed systematically, revealing that ion beams exist.

Keywords: Inertial electrostatic confinement, Neutron source, Glow discharge

1. はじめに

球状または円筒状の対称な静電ポテンシャルの井戸を形成し、そこにイオンを放射状に注入すると核融合反応を起こすことができる。イオンを中心に収束させると、電子はイオンの作る電場により中心に引き寄せられ、イオンの空間電荷を中和し、その結果イオンの密度を上昇させる。ポテンシャルの井戸が十分に深い場合、イオンは核融合反応を起こすのに十分なエネルギーを獲得する。慣性閉じ込め核融合でも磁気閉じ込め核融合でもなく、慣性静電閉じ込め核融合(Inertial Electrostatic Confinement Fusion)¹⁾と呼ばれる。

慣性静電閉じ込め核融合 (IEC 核融合) は 1950 年代に旧ソ連の Lavrent'ev²⁾とアメリカの P.T.Francisworth³⁾ による独立な考案から始まる。その後、1967 年に R.L.Hirsh^{4),5)} の中性子発生が報告され、以降 G.H.Miley⁶⁾ らにより比較的簡単な装置で実験が行われるようになった。

Fig. 1 は IECF 装置の概念図を示している。直径数 10cm 程の球形の接地陽極に対して、直径数 cm のグリッド陰極を陽極と同心に配置し、負の高電圧 (数-10kV) を印加してグロー放電させる。放電により作られた正イオンは、電場により陰極方向に加速されるが、その多くは陰極と衝突せずに、電極間の静電ポテンシャルの谷間に閉じ込められ往復運動を繰り返す。動作ガスとして重水素ガスを用いると、重水素イオンは往復運動の過程で、核融合反応により中性子を生成する。

IEC において、放電を開始すると陰極の中心から陽極方向へ、グリッドの開孔部分を通り抜ける光の筋が形成される。これはマイクロチャンネルと言われ、電子とイ

オンの通る領域と考えられている。電子はマイクロチャンネルを通り陽極へ向かい、その途中で雰囲気ガスを励起またはイオン化する。電子によって作られたイオンは静電場により、陰極中心に収束するが、このイオンの作る空間電荷に電子が集まり、さらにイオンの密度を上昇させる。

2024 年の報告⁷⁾では 1ring 陰極によるマイクロチャンネルの形成およびその内部の電子ビームを確認した。マイクロチャンネルは陰極の周りに作られるシースの重なりにより形成され、マイクロチャンネル内の電子ビームを Langmuir Probe の電流-電圧($I-V$)特性のイオン飽

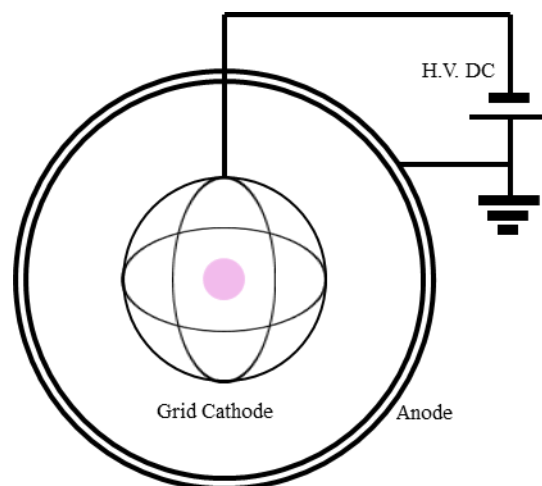


Fig.1 Concept of the Inertial Electro-static confinement apparatus

和領域の段差によって確認した。本論文では 2ring 陰極を用いてシングルプローブ法による陰極中心と陰極の外

^{*1} 理系教育センター教授

^{*2} 東海大学工学研究科応用理化学専攻修士課程

^{*3} (株)プラズマ理工学研究所

側の浮遊電位と $I-V$ 特性の測定を行い、マイクロチャンネルを通るイオンビームを検出することを目的とした。

2. 実験の概要

円筒型の真空容器に水素ガス (H_2) を充填し、容器の中心に陰極を設置した。通常 IECF 装置では、動作ガスとして重水素ガス (D_2) を使用するが、本実験では中性子発生数 (NPR) を測定することを目的としないので、 D_2 ガスとほぼ同じ特性を持ち、核融合反応を起こさない H_2 ガスを使用した。円筒 (内径 50 cm, 長さ 60 cm) 横置き型の真空容器 (陽極を兼ねる) の中心にフィードスルーを介して陰極を設置した。プラズマの電位測定にはタングステンの円筒型シングルプローブ (3mm, 0.8mm ϕ) を使用した。プローブにより円形および円筒形陰極の円平面に対して垂直方向の中心線上にプローブを設置し、プラズマの浮遊電位と $I-V$ 特性のガス圧力依存性を測定した。浮遊電位測定には、Tektronix 製の P6015A 1000X High Voltage Probe を使用した。 $I-V$ 特性は、プローブに直流安定化電源と約 20 オームの抵抗を直列に接続し、基準電極(陽極) に対するプローブ電圧 V_p と抵抗の電位差により得られたプローブ電流 I_p を測定した。 I_p はプローブに流入する電子の方向を正に取っている。陰極の印加電圧は全て-1.3kV である。陰極は1つの円環の 1ring と2つの円環を一本のワイヤーでつなげた円形状の 2ring を用いた。Table. 1 に使用した陰極の形状とサイズをまとめた。陰極円の直径のサイズにより No.1 と No.2 を 5cm タイプ, No.3 と No.4 を 2cm タイプとする。2ring 陰極では、円筒形状の陰極の中心(center)と外側(outer)にプローブを挿入して測定した。Fig. 2 は 2ring 2cm (No.4) 陰極の2か所のプローブの測定位置を示している。

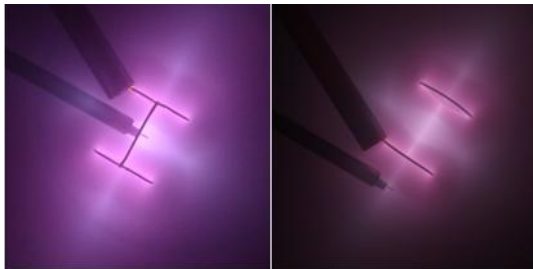


Fig.2 Pictures of the probe inserted into center and outer of the 2ring cathode. (3.8Pa)

Table 1 Types of cathodes used in this study.

No.	Number of Rings	Ring diameter /mm	Ring distance /mm
1	1	55.6	-
2	2	55.7	55.0
3	1	22.3	-
4	2	22.0	25.6

3. 実験結果

3.1 浮遊電位の圧力依存性

Fig.3 は 1ring および 2ring 陰極中心(center)と周辺(outer)の浮遊電位の水素ガス圧依存性を示している。Fig. 3(a)は 5cm を Fig. 3(b)は 2cm 陰極の測定結果であることを示している。Fig. 3 の(a)と(b)では軸のスケールが異なっているので注意してほしい。縦軸は浮遊電位[V], 横軸は水素ガス圧力[Pa]である。1ring, 2ring とともに、5cm 陰極は 1.24Pa 以下で、2cm 陰極は 4.16Pa 以下で浮遊電位が変化する。浮遊電位の絶対値が最大となるのは、陰極 No.1 では 0.43Pa, -96V, 陰極 No.2 の中心(center)では 0.29Pa, -327V, 周辺(outer)では、0.39Pa, -105V であった。陰極 No.3 では、1.46Pa, -193V, 陰極 4 の中心(center)では 1.15Pa, -576V, 外側(outer)では、1.06Pa, -174V であった。2ring 陰極の浮遊電位のピークの比は 2cm, 5cm とともに outer に対して center は約 2.3 倍であった。

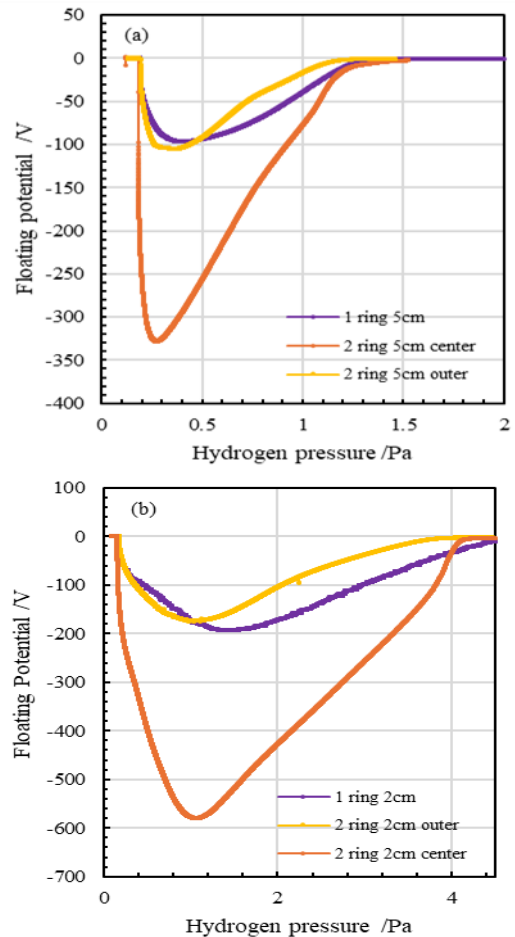


Fig.3 Dependence of floating potential distributions on hydrogen pressure: (a) 5cm diameter cathodes, (b) 2cm diameter cathodes.

3.2 プローブの $I-V$ 特性

プローブの $I-V$ 特性の測定結果を Fig. 4 に示している。Fig. 4(a),(b),(c)はそれぞれ 5cm 陰極の 1ring, 2ring outer, 2ring center を示しており, Fig. 4(d),(e),(f)は 2cm 陰極を示している。2cm 陰極では Probe Potential の負の領域($V_p < 0$)で、Probe Current が正の領域($I_p > 0$)に分布

し,5cm 陰極ではそれが見られない. これは特に 2ring 2cm center において顕著である. また, 1ring 2cm 陰極では 3.0Pa から 4.0Pa において, 2ring 2cm outer では 1.8Pa から 3.0Pa において Probe Potential の負の領域に以前の論文⁷でも示している通り, 分布に段差が見られた. Fig. 4(g),(h)にこの部分の拡大図を示した. 2cm 陰極ではエネルギーの高い電子電流が流れ, 電子ビームがプローブに到達していることを示し, マイクロチャンネルが形成さ

れている証拠となる.

Probe Potential の正の領域($V_p > 0$)において, 5cm 陰極では+100V になる前に Probe Current I_p が急激に上昇し放電してしまった. 2cm 陰極では Probe Potential が ($V_p \sim 200V$)でも放電せず, 電流が制御されている. 2cm 陰極では, 電子飽和領域において, イオン電流が流れ放電を妨げる役割をしていると考えられる.

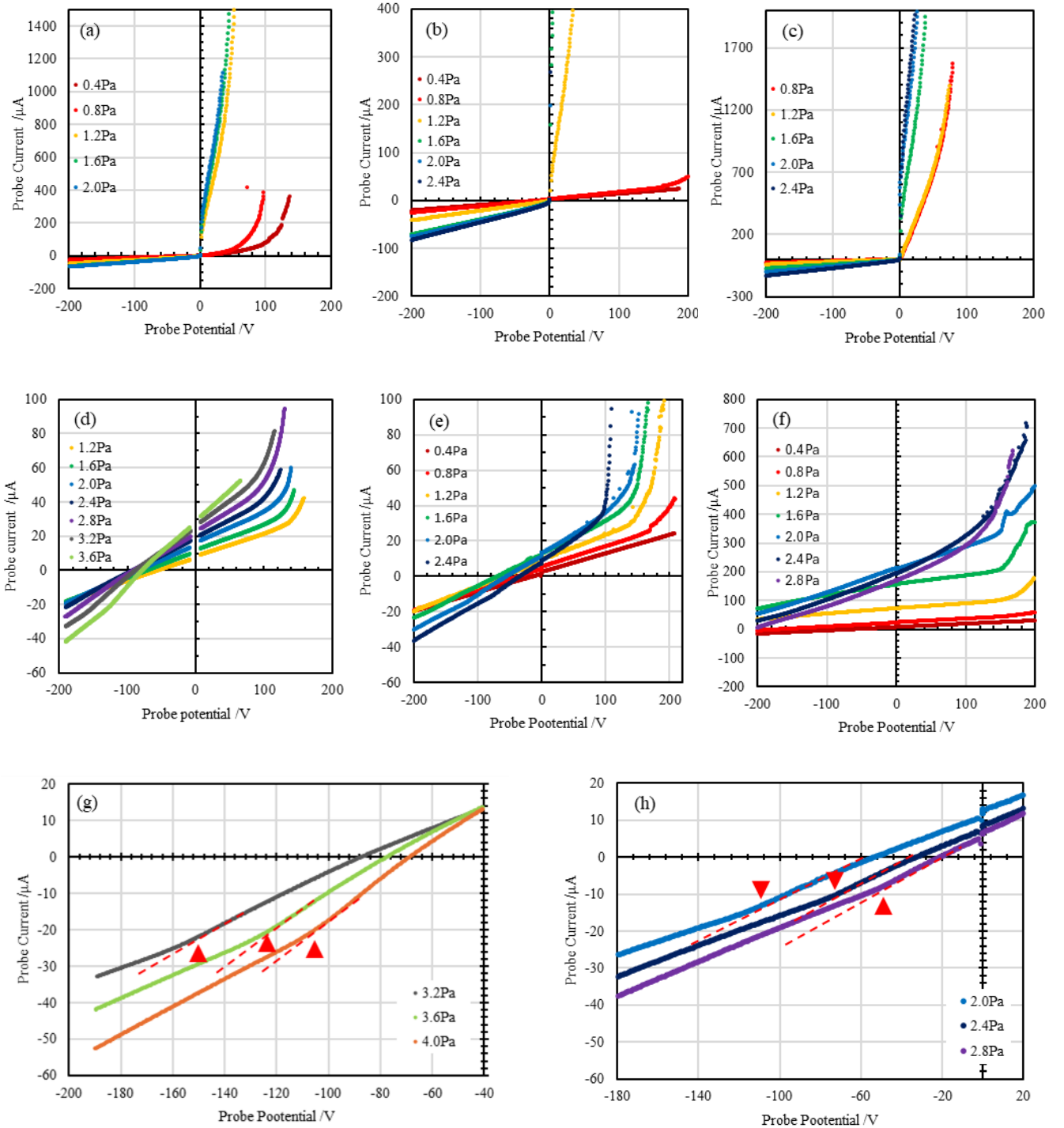


Fig.4 Current-Voltage Characteristics of various cathodes (a) 1ring 5cm, (b) 2ring 5cm outer, (c) 2ring 5cm center, (d) 1ring 2cm, (e) 2ring 2cm outer, (f) 2ring 2cm center, (g) Enlarged view of (d), (h) Enlarged view of (e).

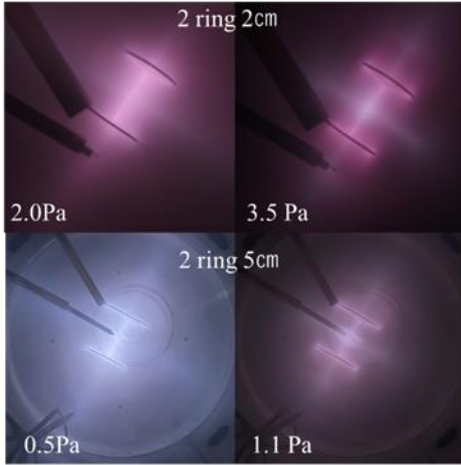


Fig. 5 Photographs of the sheath formed around the 2ring cathodes

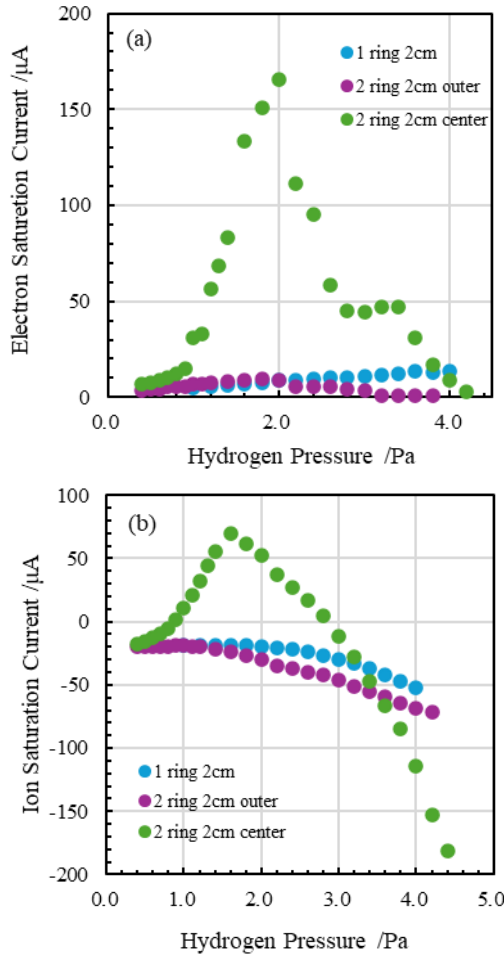


Fig. 6 Dependence saturation current on Hydrogen pressure: (a) Electron Saturation Current, (b) Ion saturation current

4. 考察

4.1 浮遊電位と陰極シースの厚さ

Fig. 3 に示す通り、浮遊電位は 2cm と 5cm の両方において 1ring と 2ring outer 陰極のプロファイルが似ている。

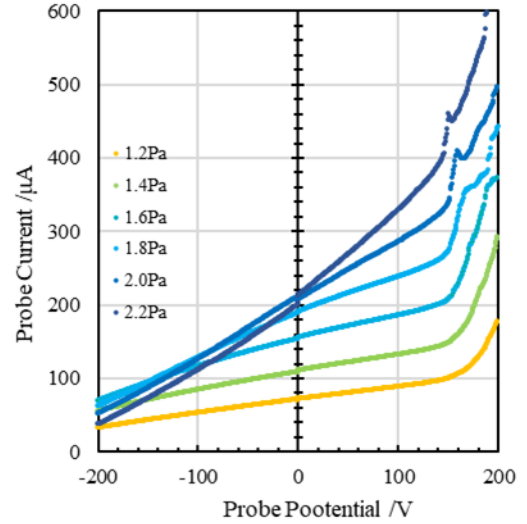
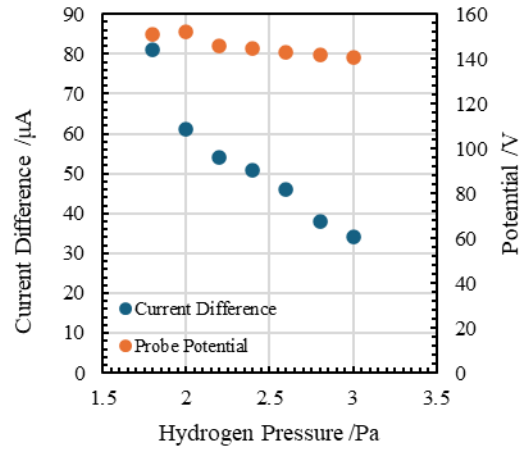

 Fig. 7 Enlarged view of Current-Voltage Characteristics
Fig. 4(f) 2ring 2cm center.


Fig. 8 Current Difference and Probe Potential at the step

これは両者のシースの厚さの気圧依存性がほぼ同じで、5cm 陰極では 1.24Pa 以下、2cm 陰極では 4.16Pa 以下で、マイクロチャンネルが形成されている為である。マイクロチャンネルが形成されると、電子密度が増加し浮遊電位が大きく変化すると考える。しかし、5cm 陰極では浮遊電位のピークとなる気圧が低いので、電子密度が低く、電流を検出できなかったと思われる。Fig. 5 は 2ring 陰極のシースとマイクロチャンネルの写真である。2cm と 5cm のシースの重なりを比べるために、陰極の大きさが等しく見えるようにして並べた。

4.2 電子飽和電流とイオン飽和電流

Fig. 6 は、No.3 と No.4 陰極のイオン飽和電流値と電子飽和電流値の水素気圧依存性を示している。イオン飽和電流はイオンの飽和電流値がグラフから読み取れないので、プローブの印加負電圧 -200V の電子電流値とした。電子飽和電流はプローブ法⁸⁾により電子反発領域、電子飽和領域における 2 接線の交点の電流値として求めた。イオン飽和電流は No.4 陰極 center が大きくプラスに分布し、また、電子飽和電流値も同様に No.4 陰極 center が outer に比べて最大で約 18 倍多く流れた。No.4 陰極 center

のイオン飽和電流の最大値は 1.6Pa で 69.3 μ A, 電子飽和電流の最大値は 2.0Pa で 165.5 μ A となった. 2ring 陰極 center はちょうど陰極の 2 つのリングのシースの隙間に位置しており, ここに陰極から出たエネルギーの高い電子が集ったと考えることができる. 集まった電子はマイクロチャンネルを通り陽極へと向かう.

4.3 イオンビーム

No.4 陰極 center の $I-V$ 特性は電子飽和領域の Probe Potential $V_p \sim 150V$ において段差が確認できる(Fig. 8 参照). Fig. 8 は, 段差が見られる 1.2Pa から 2.2Pa までの $I-V$ 特性を示している. Probe Potential の150V付近において段差 (beam edge) が系統的に作られている. これらの段差はイオンビームによるものであると過去の論文^{9),10),11),12)}では結論されている. Probe Potential がイオンビームのエネルギーとほぼ等しくなった時, イオンはプローブの直前に留まり, プローブの周りの電場を歪める. プローブに入射する電子の軌道はこの電場の歪みに影響され, イオンビームが停止することによって電場が作られた瞬間, 電子電流が増加し $I-V$ 特性に段差が生じたものである. 水素気圧に対する, この電流値の差と Probe Potential の関係を Fig. 8 にまとめた. 2ring 陰極の中心付近では, イオンビームはマイクロチャンネルを通り, 陰極中心に向うと考えられる.

5. まとめ

IEC 放電において直径の異なる 1ring, 2ring 陰極を用いてシングルプローブによる浮遊電位と $I-V$ 特性の水素ガス圧力依存性を調べ, 電子ビームとイオンビームの生成を実験的に明らかにすることができた.

浮遊電位測定において 5cm 陰極では陰極シースの重なりが 1.0Pa 以下で起こるが, 浮遊電位のピークとなる気圧は No.2 陰極 center では 0.29Pa と低く, ガスの密度が小さく, 測定限界付近であったと思われる. 本実験の印加電圧 (-1.3kV)では, マイクロチャンネルが形成する条件には適さなかったと考える. 一方, 2cm 陰極では, 浮遊電位の 1.0 ~ 1.5Pa にピークがあり, マイクロチャンネルの形成に必要な粒子密度が確保できたと考えられる.

ラングミュアプローブの $I-V$ 特性は, 2cm 陰極の 1ring と 2ring outer のイオン飽和領域に段差が確認された. 5cm 陰極に段差が見られないのは上記と同様にシースの

重なりが不十分あったためと考えられる. マイクロチャンネルが形成され, 電子ビームおよびイオンビームが生成されるためには, シースの重なりが重要であることがわかった. IEC 核融合では-50kV 以上の印加電圧を想定しているが, シースの厚さと十分な電子密度が必要となる.

最後に, 2ring 2cm center の Probe Potential $V_p = 140 \sim 150V$ において系統的な段差が観測された. これは Weber¹⁰⁾ らの報告による, プローブ近くに静止したイオンの作る電場の歪みが電子を増大させることによる電子電流の増加 (beam edge) であり, イオンビームの生成を実験的に明らかにした.

参考文献

- 1) M. Ohnishi, J. Plasma Fusion Res. Vol.73, No. 10, p.1080(1997).
- 2) O. A. Lavrent'ev et al. Ukrainskii Fizicheskii Zhurnal, Vol. 8, p.440(1962).
- 3) P. T. Fransworth, Space Charge Device for producing Nuclear Reactions, Patent. CA654306, US3258402 (1962).
- 4) R. L. Hirsch, J. Applied Physics, Vol.38, p.4522 (1967).
- 5) R. L. Hirsch, Physics of fluids Vol.11, p.2486 (1968).
- 6) G. H. Miley, J. Nadler, T. Hochberg, Y. Gu, O. Barnouin and J. Lovberg: "Inertial-Electrostatic Confinement: An approach to Burning Advanced Fuels", Fusion Technol., Vol.19, pp.840-845 (1991).
- 7) M. Utsumi et al. Proc. of School of Eng. Tokai Univ., Vol. 64, No 1., p.12(2024).
- 8) H. Amemiya et al. J. Plasma Fusion Res. Vol.81, No.7, pp.482-492 (2005).
- 9) PLASMA DIAGNOSTICS, Vol. I, Discharge Parameters and Chemistry, Edited by Orlando Auciello and Daniel Flamm, Academic Press Inc. New York, Chapter 3. How Langmuir Probe Works by Noah Hershkowitz, P130(1989).
- 10) Wim. J. Weber, W. J. Armstrong, R. J. and Trulsen, J. Journal of Applied Physics, Vol.50, P4545(1979).
- 11) Nakamura, Y., Nomura, Y. and Stenzel, R. L. Journal of Applied Physics, Vol.52, P1197(1981).
- 12) Å. Sköelv et al. Phys. Fluids Vol. 27, P2744(1984).