

慣性静電閉じ込めにおけるマイクロチャンネル生成の基礎的研究

内海 倫明^{*1} 進藤 春雄^{*2}

A Fundamental Study of Micro-Channel Generation on Inertial Electrostatic Confinement

by

Michiaki UTSUMI^{*1} and Haruo SHINDO^{*2}

(Received on Mar. 31, 2024 and accepted on Jul. 13, 2024)

Abstract

A fundamental study on using a primitive one-ring cathode in IEC discharge was performed. Two different sizes of one-ring cathode were prepared for measuring plasma floating potential using a cylindrical shaped single probe. A smaller cathode was also used to measure the current-voltage characteristics. The lowest floating potential of -203 V was achieved under a discharge voltage of -1.3 kV and a hydrogen gas pressure of 1.48 Pa with the smaller cathode. In comparison with theoretical calculation, we found that there is an energetic electron beam in the narrow line that is near the center and perpendicular to the cathode plane.

Keywords: Inertial electrostatic confinement, Neutron source, Glow discharge

1. はじめに

慣性静電閉じ込め (IEC: Inertial-electrostatic confinement) 核融合 (IECF: IEC Fusion) はイオンと電子を球状中心に収束させ核融合反応を起こさせるものである。1950 年代に旧ソ連の Lavrent'e¹⁾ とアメリカの P.T. Fransworth²⁾ による独立な考案により始まるが、1967 年に R.L. Hirsh^{3), 4)} の中性子発生の報告以降、G.H. Miley⁵⁾ らにより、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^{6), 7)} の概念図を示している。直径数 10 cm 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、グリッドの開口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⁸⁾ 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、陰極方向へと向かうが、その多くはグリッド陰極を通り抜け往復運動する。イオンは陰極に衝突するか、雰囲気ガスと電荷交換衝突するか、あるいは

核融合反応を起こすまで、この往復運動を繰り返す。

我々は、マイクロチャンネルの生成およびその内部の電子とイオンの基礎的性質を研究する為に、最も簡単な陰極である one ring 陰極を用い、シングルプローブによる浮遊電位とプローブ法⁹⁾ による電流-電圧特性を調べたので、これについて報告する。

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、容器の中心にフィードスルーを介して陰極を設置した。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、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。真空容器を陽極とし

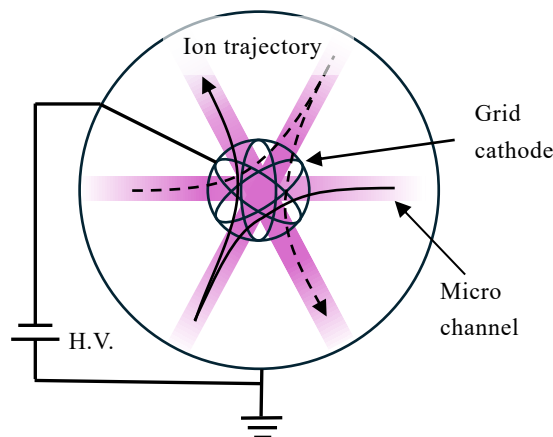


Fig. 1 Conceptual diagram of the IEC.

^{*1} 理系教育センター教授

^{*2} (株)プラズマ理工学研究所

容器の中心に、one ring の陰極が配置されている．Table 1 にそれぞれの陰極の特徴を示す．直径とワイヤー径の異なる 2 種類の one ring 陰極を使用した．Fig. 2 は装置全体の構成図を示している．円筒（内径 50 cm，長さ 60 cm）横置き型の真空容器の中心にフィードスルーを介して陰極を設置し，浮遊電位と電流－電圧特性を測定するためにタングステンの円筒プローブ（3 mm×0.8 mm φ）を挿入した．

プローブは陰極の面に対して平行に，陰極の動径方向に移動する．また，Fig. 3 は放電中の陰極付近の写真を示している．陰極の周りのトーラス状の暗部はグロー放電における陰極鞘である^{10),11)}．陰極鞘の幅は，気圧が高いと薄く気圧の下降とともに厚くなり，鞘の重なり部分

Table 1 Types of cathodes used in this study.

No.	Ring diameter /mm	Wire diameter /mm	Material
1	54.3	2.3	SUS304
2	21.9	1.0	SUS304

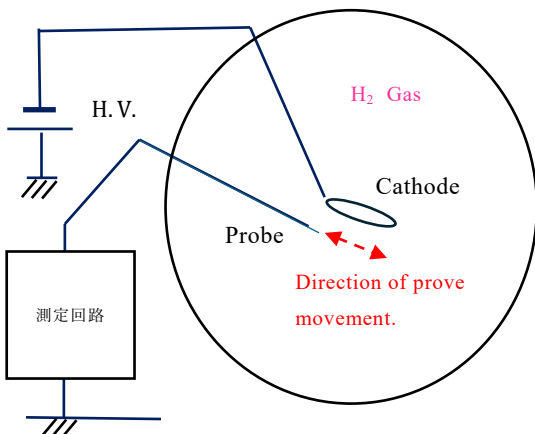


Fig.2 Schematic view of experimental apparatus

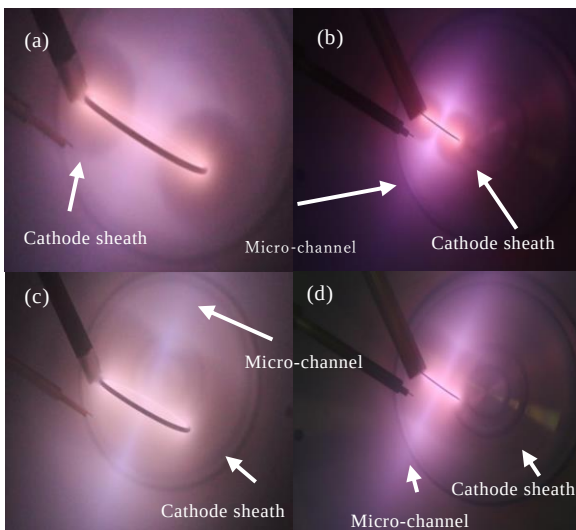


Fig. 3 Images of glow discharge of the hydrogen, (a) at cathode 1(3Pa), (b) at cathode 2(5Pa), (c) at cathode 1(1Pa), (d) at cathode 2(2.5Pa).

からマイクロチャンネルが陰極面に対して垂直方向に延びるのがわかる．Fig. 3(c), (d)では鞘の重なる部分から陰極に対して垂直に，光の筋（マイクロチャンネル）が伸びている．なお，鞘とマイクロチャンネルの一部を写真中に矢印で示している．

3. 実験結果

3.1 浮遊電位分布特性

陰極の印加電圧を一定にして，水素ガス圧力に対し，プローブを Fig. 2 に示すように陰極平面に対して平行に移動し，浮遊電位分布の測定を実施した．測定結果を Fig. 4

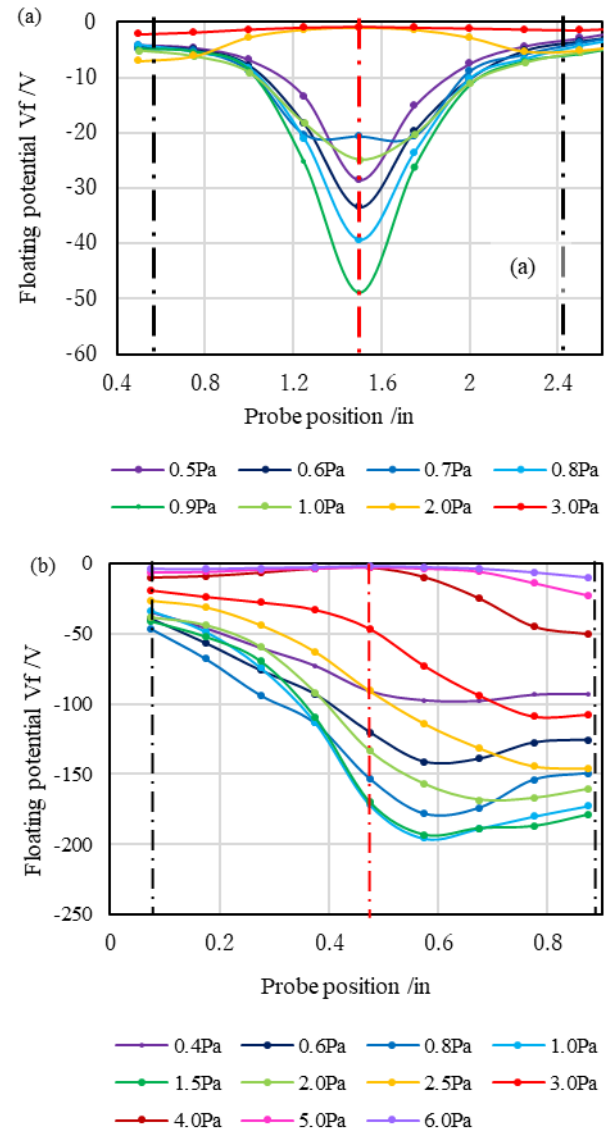


Fig. 4 Floating potential distribution. Red dash-dot line is position of the cathode center and black dash-dot lines are positions of both cathode ends. (a) Cathode 1 with applied voltage 0.9kV. The center position is 1.5 in. (b) Cathode 2 with applied voltage 1.3kV. The center position is 0.475 in.

に示す。Fig. 4(a)は陰極1の浮遊電位分布を示している。陰極の印加電圧は -0.9kV で、横軸はプローブ位置[in]、縦軸は浮遊電位[V]である。プローブ位置 1.5in が陰極の中心位置である。浮遊電位は陰極中心に対して対称な分布を示している。浮遊電位の大きさが最大となるのは、水素気圧 0.9Pa 、プローブ位置 1.5in で -48.8V であった。一方Fig. 4(b)は、陰極2の浮遊電位分布を示している。陰極の印加電圧は -1.3kV で、プローブ位置 0.475in は陰極の中心位置である。浮遊電位の大きさが最大となるのは、水素圧力 1.5Pa の時、プローブ位置 0.575in で -193V であった。陰極2の浮遊電位分布は陰極中心に対して対称とはならず、陰極の中心位置 0.475in に対して 0.1in ずれた場所で極小となるのは、陰極1の印加電圧より高電圧であることとプローブの絶縁管が電子ビームにさらされていたことによるものと考えられる。印加電圧の -0.9kV から -1.3kV (約1.4倍)に対して、浮遊電位の大きさの最大値は約4.0倍であった。

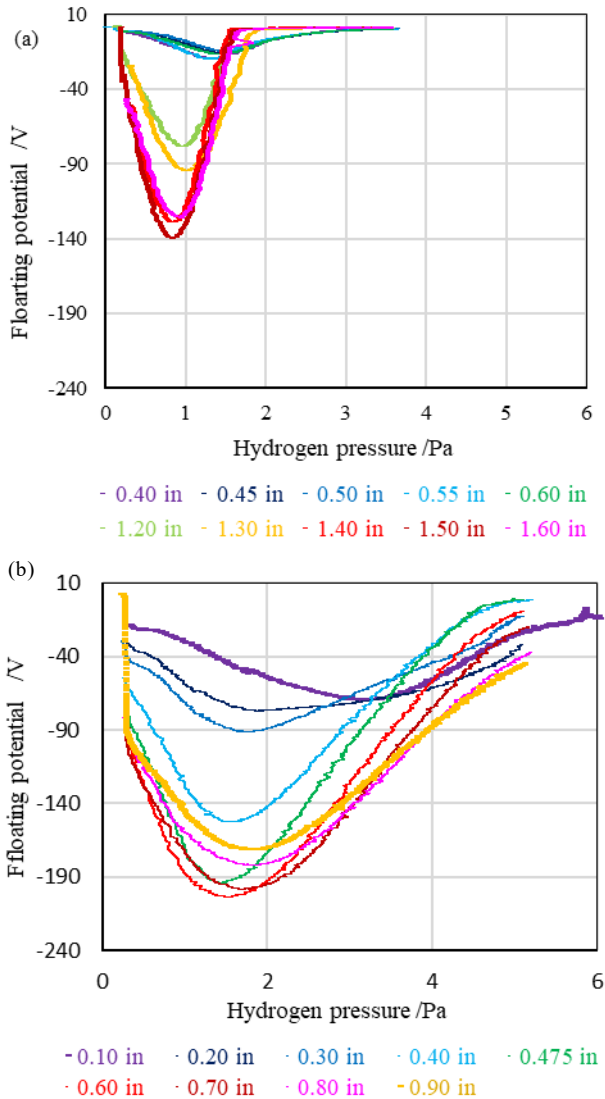


Fig. 5 Dependences of hydrogen fill pressure on floating potential; (a)cathode 1, (b)cathode 2.

3.2 浮遊電位の圧力依存特性

陰極の印加電圧を -1.3kV (定電圧モード)とし、水素ガスを連続的に充填しながら、それぞれの位置の浮遊電位を測定した (Fig. 5)。浮遊電位の絶対値が最大となるのは、陰極1の場合は中心の位置 1.5in の 0.85Pa 、 -139V 、陰極2の場合は位置 0.6in で 1.48Pa 、 -203V となった。陰極1では、印加電圧を -0.9kV から -1.3kV に増加したことで、浮遊電位の極大値は約 -90V 変化した。陰極2の浮遊電位は同じ印加電圧 -1.3kV に対してさらに低く(約 -60V)になった。

3.3 プローブの電流-電圧特性

印加電圧 -1.3kV で陰極2の中心位置の、プローブ法による電流-電圧特性を測定した結果をFig. 6(a)に示す。基準電極(陽極)に対してプローブ電圧 V_p を印加し、同時に抵抗(20Ω)の電位差からプローブ電流 I_p を求めた。 I_p はプローブに流入する電子電流の方向を正に取っている。

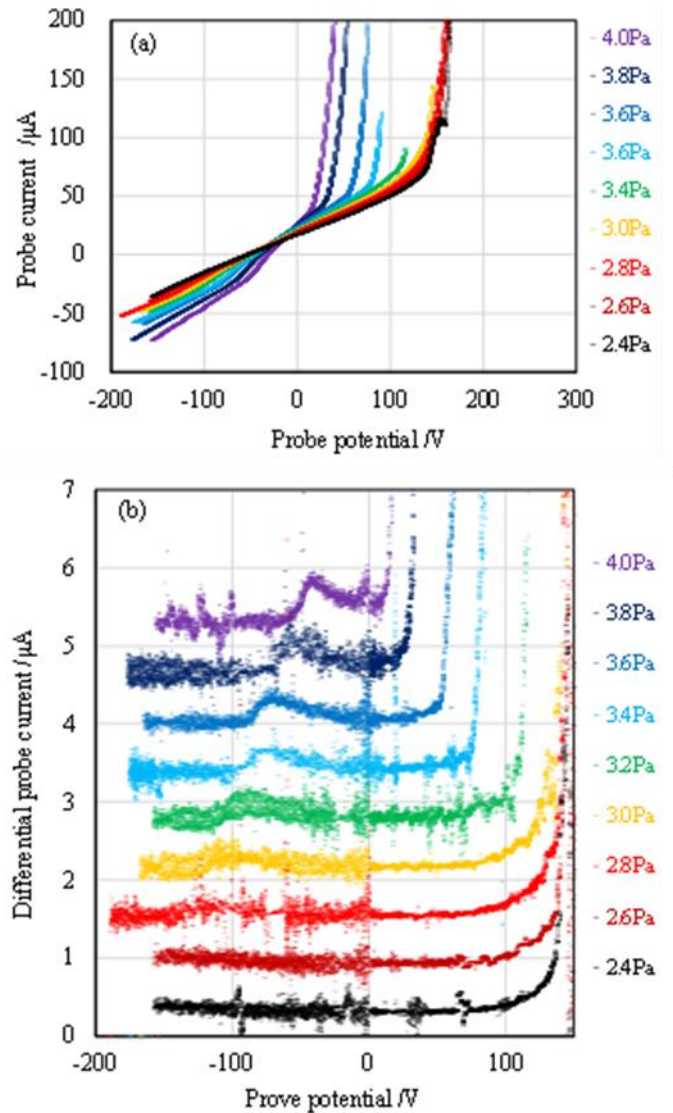


Fig. 6 Probe current-voltage characteristics (-1.3kV) for cathode 2 at 0.475in (center), (a) linear scale, (b) numerical differentiation.

イオン電流が飽和する付近の-50V から-100V にグラフの段差が確認できる．また，電子反発領域に電子電流の急激な傾きの増加がみられる．Fig. 6(b)は電流－電圧特性の数値微分（差分）を示している．電流－電圧特性（Fig. 6(a)）の段差がピークとして表れている．ピークの位置（プローブ電位）は，水素気圧が下がるとより低い方向へシフトしているのがわかる．ただし，図のプロットはピークの位置を確認できるように，気圧毎に縦方向にシフトして表示している．

4. 考察

4.1 浮遊電位分布特性

Fig. 4(a)より陰極 1 において浮遊電位分布は陰極の中心付近で極小となった．一方，陰極 2 の浮遊電位分布（Fig. 4(b)）は左右非対称となった．陰極 2 は陰極面の面積が陰極 1 対して 16%しかなく，プローブの挿入による電場への擾乱の影響が無視できないと考えられる．本実験では，プローブの軸とプローブ移動の軸が同一であったために，プローブの絶縁管がチャージアップした可能性も考えられる．プローブを使用する場合，電場への影響は避けることができないけれども，これらが最小となる幾何学的構成の検討が今後の課題である．

4.2 浮遊電位の圧力依存特性

3.2 で述べたように，陰極 1 では，中心付近の 1.4～1.6in において，水素気圧 0.85Pa 付近に浮遊電位の極小部分が存在している．陰極 2 では，0.4～0.9in において，水素気圧 1.48Pa 付近に，同様の極小値が観測され，陰極の中心付近に電位の井戸が存在することが観測された．この様に浮遊電位が負に下がり，電位井戸を形成するのは，陰極の中心付近に，細いビーム状の電子が陽極に向かって通過していると考ええる．これに対して，電子により生成されるイオンは，陽極の方向から，電位井戸に向かって移動することになる．これが，マイクロチャンネルである．マイクロチャンネルは陰極の開口部全体に広がるのではなく，陰極の中心の狭い領域を通過すると考えられる．

4.3 プローブ電流のモデル計算

電子ビームが存在する条件でプローブ電流を測定した場合に計測されるプローブ電流をモデル計算した．モデル計算では簡単化するために平板プローブとし，ある中心速度の電子ビームがイオン電流の変化に与える影響が，実験で確認されているような段差をしめすことを確認するのが計算の目的である．また，モデルとして平板プローブを対象とするのは円筒プローブでは飽和領域におけるイオン電流が電圧に対して一定とならず，モデル計算が複雑となるためである．

プラズマ電子の温度 T_p [K] のプラズマ中に中心速度 u [m/s] の電子ビームが存在する条件で平板プローブに流れ込む電子電流は次のように表せる． i_e は電子飽和電流で無次元化した電子電流である．

$$i_e = \int_{x_0}^{\infty} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} x \cdot \exp(-x^2) + \frac{N_r}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{T_p}{T_b}} x \cdot \exp \left\{ - \left(\sqrt{\frac{T_p}{T_b}} x - V_r \right)^2 \right\} \right] dx \quad (1)$$

ここで， x は次の無次元化した速度であり， V_r は無次元化したビームの中心速度である．また， x_0 は入射できる電子の最低の無次元速度である．

$$x = \frac{v}{\sqrt{\frac{2kT_p}{m}}}, \quad V_r = \frac{u}{\sqrt{\frac{2kT_b}{m}}}$$

ここで， v は電子の速度， m は電子の質量， k はボルツマン定数であり， T_b はビーム電子の温度， N_r はプラズマ電子密度に対するビーム電子密度の比である．更に，プローブ電流を無次元式で表すと次のように表せる

$$i_p = i_e + i_i \quad (2)$$

ここで， i_p は無次元化したプローブ電流， i_i は無次元化したイオン電流である．本論文ではモデル計算として次表のような条件でプローブ電流 i_p の数値計算を行った．

Table 2 Conditional parameters for model calculations.

プラズマ電子温度 T_p (eV)	ビーム電子温度 T_b (eV)	電子密度比 N_r	ビーム中心速度 V_r	ビーム中心エネルギー (eV)
2.0	0.003	0.1%	100	30.0
2.5	0.003	0.1%	140	58.8
3.0	0.003	0.1%	170	86.7

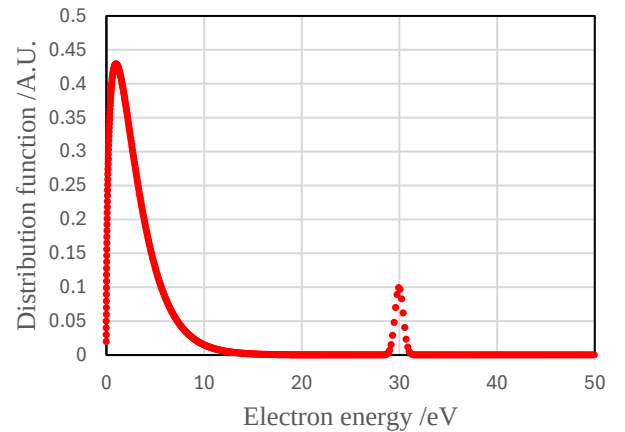


Fig. 7 A shape of the electron energy distribution for using model calculation of the probe current in condition $V_r = 100$ of the electron energy distribution function.

モデル計算結果の 1 例として Fig. 7 には計算の基となる分布関数（式(1)の被積分関数）の例を示した．Fig. 7 の関数は Table 2 における条件 $V_r = 100$ の分布関数である電子エネルギーの低い領域には温度 $T_p = 2$ eV のマックスウェル分布したプラズマバルク電子が存在する．更にエネ

ルギーの高い領域には中心エネルギー30eV のビーム電子が存在している。

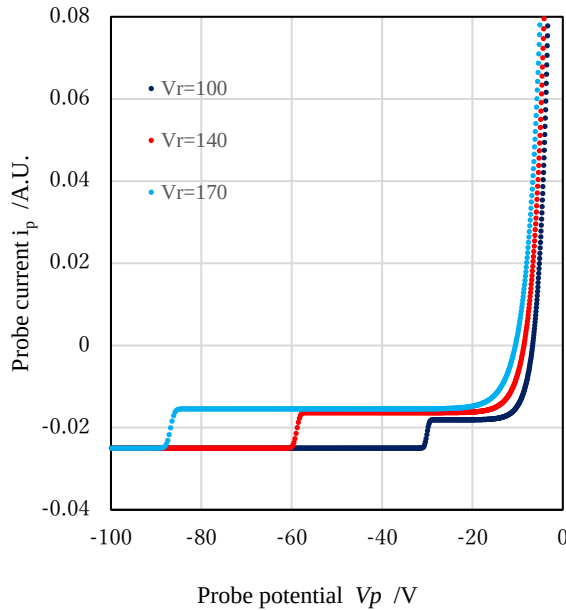


Fig. 8 Calculation of the current-voltage characteristics using conditions of Table 2.

Fig. 7 に示すような電子エネルギー分布関数を用いて式(1)より電子電流 i_e を計算し、更に無次元化されたイオン飽和電流 i_i を求めてプローブ電流を式(2)より求めた。

Fig. 8 には上記モデルで計算したプローブ電流の結果を示す。計算条件は Table 2 にあるような3条件である。Fig. 8 の横軸はプローブの電位 V_p [V]であり、縦軸は無次元化されたプローブ電流であり、リニアースケールで示してある。Fig. 8 の3本の曲線はいずれも正の電子電流からプローブバイアスの低下と共に負のイオン電流に切り替わる典型的なプローブの電圧-電流特性となっているが、いずれの曲線においてもイオン電流の領域に階段的变化が表れているのが分かる。しかもこの階段的变化が現れるプローブ電位は、例えば Fig. 7 にある、 $V_r = 100$ の条件の場合、 $V_p = 30.0V$ であり、電子ビームの持つエネルギーと一致している。他の条件である $V_r = 140$, $V_r = 170$ においても、階段的变化はそれぞれ $140 \times 140 \times 0.003 = 58.8V$, $170 \times 170 \times 0.003 = 86.7V$ と電子ビームエネルギーと一致していることが分かる。すなわち、プラズマ中にビーム電子が存在する条件でのプローブ特性には電子ビームによる電子電流の階段的变化が飽和領域にあるイオン電流に影響が現れ、イオン飽和電流に階段的变化とし

て観測されることが理論計算で示されたことになる。このことは前述されているプローブ電流の実測値に現れる階段的变化が電子ビーム成分によるものであることを理論的に裏付けていることになる。

5. まとめ

IEC 放電におけるマイクロチャンネルの生成過程および、その基礎的特性を研究するために、One-ring 陰極を用いて、IEC にとっては低い負印加電圧(-0.9kV, -1.3kV)で陰極付近の浮遊電位と電流-電圧特性のプローブ測定を行った。陰極1では、浮遊電位の位置分布の左右対称となり (Fig. 4(a))、マイクロチャンネルは陰極開口部の中心付近にのみに生成されることが分かった。浮遊電位のピークは、陰極1で水素ガス圧力 0.85Pa において-139V、陰極2では 1.48Pa において-203Vであった。開口部の面積の小さい陰極の方が、高い水素気圧で低い浮遊電位が得られた。最後に、陰極2の中心軸上のプローブの電流-電圧測定結果において、イオン飽和領域に段差部分が現れ、これは、電子ビームによるものと考えられる。

参考文献

- 1) O. A. Lavrent'ev et al., Ukrainskii Fizicheskii Zhurnal, Vol.8, p.440 (1962).
- 2) P. T. Fransworth, Space Charge Device for producing Nuclear Reactions, Patent. CA654306, US3258402 (1962).
- 3) R. L. Hirsch, J. Applied Physics, Vol.38, p.4522 (1967).
- 4) R. L. Hirsch, Physics of fluids Vol.11, p.2486 (1968).
- 5) 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).
- 6) K. Yoshikawa et. al., J. Plasma Fusion Res. Vol.83, No.10, pp.795-811 (2007).
- 7) M. Ohnishi, プラズマ・核融合学会誌 Vol.73, p.1080 (1997).
- 8) T. Nishigaki, Journal of Advanced Science, Vol.22, No.3&4 (2010).
- 9) H. Amemiya, Journal of Plasma and Fusion Research Vol.81, No.7 July (2005).
- 10) H. Amemiya, The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEA), Wako 351-01 (1992).
- 11) 提井信力, プラズマ基礎工学 (1985).

