

定常 glow He plasma に対する探針の特性

玉野 和保, 北山 正文, 山脇 富三
小林 誠, 西井 正清

An Electrostatic Probe Technique for the Measurement of Low Glow Plasma

By Kazuho TAMANO, Yoshifumi KITAYAMA,
Tomisō YAMAWAKI, Makoto KOBAYASHI
and Masakiyo NISHII

Plasma diagnostics is very important on the control of the thermonuclear fusion reactor. Several methods of plasma diagnostics are reported by many investigator.

This paper describes on the study of characteristics of the electrostatic probe on the stable glow plasma which is confined by weak Z-magnetic field.

As the result of the characteristic curves, the plasma electron temperature is nearly 10^5 (°K).

目 次

- I 緒 言
- II 実験装置及び実験方法
- III 実験結果及び検討
 - III-1 Langmuir probe の特性
 - III-2 Double probe の特性
 - III-3 Coaxial probe の特性
- IV 検 討
- V 結 言

I 緒 言

近年熱核融合炉の実現に対する研究及びその基礎としての plasma 物理学の発展は目をみはるものがあり、それともなう plasma 診断法に対する研究もかなりの発展が見られる¹⁾。特に plasma 診断法の確立は高温域の plasma において困難な問題である plasma の不安定の制御そして今後問題となるであろう熱核融合

plant の炉制御等において重要な位置を示すと思われる。

plasma の診断法には従来より各種探針による診断法、Micro wave 診断法、発光分光診断法、Laser を用いた光散乱および干渉診断法そして最近では荷電及び中性粒子による診断法等が提案されている。これらの診断法は対象とする plasma の密度そして温度によって又、要求される plasma parameter によって、その

用いられる診断法は異なっているが、本報では弱いZ磁場によって軽く閉込めた定常 glow He plasma において、空間的分解能が優れている事そして取扱いが簡単で感度が良い事で従来より plasma 物理学における諸問題の解析に良く用いられている探針診断法について、特に Electrostatic probe の諸特性の測定結果について報告する。

II 実験装置および実験方法

plasma の平衡を得る装置については現在数多くの方法が提案されており、その各特性についても詳しく研究がなされている。ここでは各種の plasma を発生させその動特性の研究に用いるように設計した直線型放電管を用い、それにZ磁場によって軽く閉込められた定常 glow plasma をまづは対象とし実験を行った。

Fig. 1 及び Photo 1 に実験装置の概要を示す。

plasma は放電管端に取付けた電子銃により数十(eV)の電子を封入された $10^{-3} \sim 10^{-4}$ (torr)のHe gas中に打込み低電離定常 glow 放電を形成し、solenoidによる数十(gauss)のZ磁場によって軽く閉込めたものを対象とした。電子銃は Tungsten 線によるすだれ

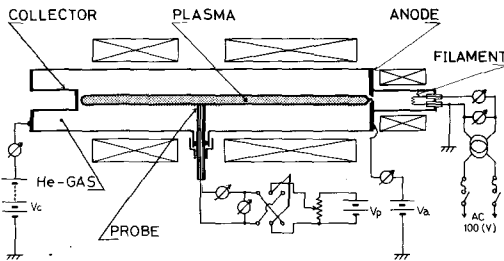


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

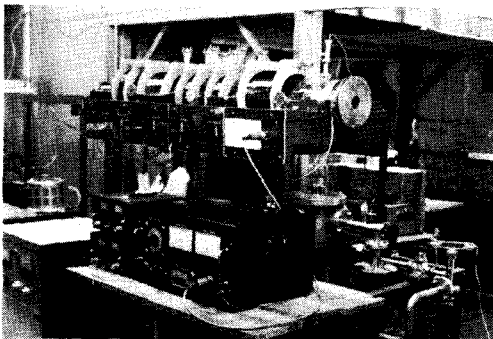


Photo 1 View of plasma discharge tube and power supply.

状 Filament と 10(mm ϕ)の引出口を持った Anode として電子beam 収束用の coil とから成っている。又得られた電子 beam は collector により放電管内に定常 glow beam plasma を形成する。ここで用いた放電管は内径 150 (mm ϕ) として放電路長 1300 (mm) の pylex glass 製の管である。一方、plasma の診断に用いた探針は Fig. 2 及び Fig. 3 に示される様な直径 0.2 (mm) の Tungsten 線を glass によって気密絶縁し、それを Epoxy 樹脂によって真ちゅう管に気密充てんしたものを用いた。ここで Fig. 2 は Langmuir 及び Coaxial probe として用い、そして Fig. 3 は Double probe を示している。これらの探針は Fig. 1 に示される様に放電路のほぼ中央に設けられた探針挿入抗に取付けられている。探針には直流電圧を Single probe の場合には中央心線と接地端との間に印加し、Coaxial probe の場合には心線と真ちゅう管との間にそして Double probe の場合には2本の心線間に印加し、おのおの plasma 電流そして封入 gas 圧を変えてそれに対して probe 電圧—電流特性を測定した。

III 実験結果及び検討

III-1 Langmuir probe の特性

Fig. 4 及び Fig. 5 は Single probe の検出部を plasma filament の中央に位置させて測定した結果である。Fig. 4 は封入 gas 圧 6×10^{-3} (torr) について

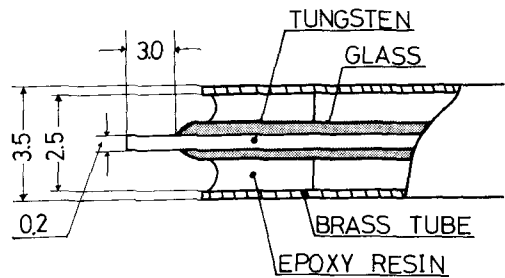


Fig. 2 Scheme of single and coaxial probe.

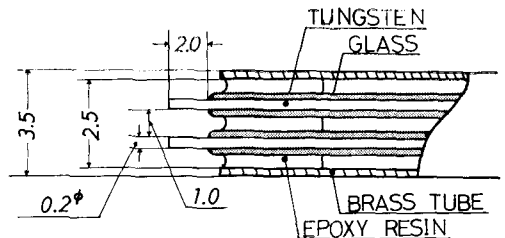


Fig. 3 Scheme of double probe.

collector 電流を40 (mA) 及び60 (mA) 流した場合の探針の電圧—電流特性である。又、Fig. 5 は封入 gas 圧が 1.5×10^{-2} (torr) について同様に2種の collector 電流に対して測定した結果である。この場合、Z 磁場は測定点においてそれぞれ 72 (gauss) である。

これらの結果よりまず電圧—電流特性は直線的な変化はせず、なだらかな部分及び急激な変化の部分を持っていることがわかる。この特性については古くより詳しく研究されており、特に定常低電離 glow 放電の場合については一応の理論は完成している^{2)~5)}。Fig. 6 は平面電極の場合の glow plasma に対する代表的な電圧—電流特性を示したもので図中Aの領域は飽和電子電流領域と称せられ、Cの領域は Ion 飽和電流領域と称せられる。Bの領域はAとBとの各領域の遷移領域でありこの部分によって plasma 電子温度が決定される。又、 V_f については floating potential と呼ば

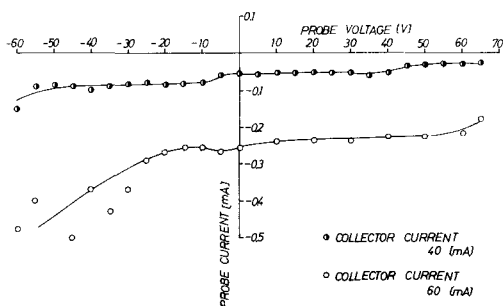


Fig. 4 Experimental result of the voltage and current characteristics on the single probe at 6×10^{-3} (torr) He gas pressure.

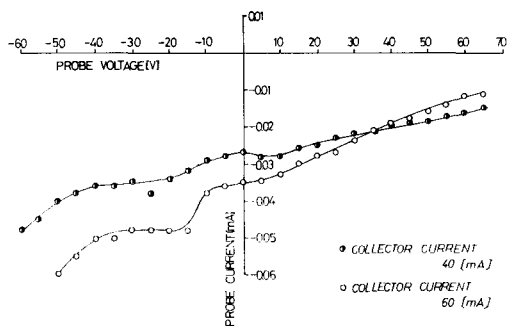


Fig. 5 Experimental result of the voltage and current characteristics on the single probe at 1.5×10^{-2} (torr) He gas pressure.

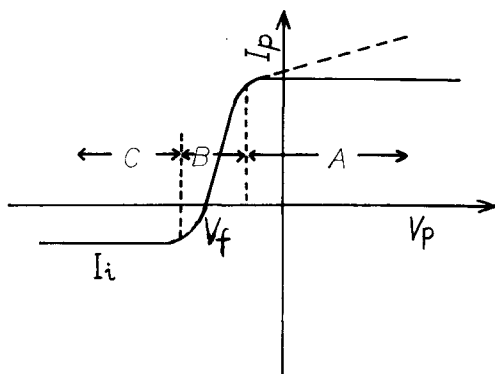


Fig. 6 Typical voltage and current characteristic on the single probe.

れている。これらの点を考慮して測定結果を見ると、まづ floating potential が現われていない点に気づく。この場合については70 (V) 以上の所に存在していると考えられる。しかし、他の数多くの実験例と比較した結果、その様な高電位になる事は無いと考えられ、今後の課題となると思われる。次に Fig. 6 に示したBの領域に相当する点について考えてみる。Fig. 4 及び Fig. 5 とほぼ探針電圧が $-10 \sim -20$ (V) の付近に変曲点が現われており他の実験例と比較しほぼ妥当な値であると思われる。これらの結果より plasma 電子温度を求めてみると He gas 圧が 6×10^{-3} (torr) の場合、collector 電流が40 (mA) に対して 7.1×10^4 ($^{\circ}\text{K}$), 60 (mA) に対して 4.0×10^5 ($^{\circ}\text{K}$), そして He gas 圧が 1.5×10^2 (torr) の場合、collector 電流が40 (mA) に対して 3.1×10^4 ($^{\circ}\text{K}$), 60 (mA) に対しては 9.1×10^4 ($^{\circ}\text{K}$) となった。従ってこれから He gas 圧が低い方が plasma 電子温度は高いし、しかも collector 電流が大きいほど plasma 電子温度は高いと言える。しかし、これらは探針として平面電極を仮定した結果からの算出法を用いており円筒探針としては算出法にも現在まだ問題がある。

III-2 Double probe の特性

探針として Double probe を用いて Single probe と同じ位置における測定を行った結果について述べる。

Fig. 7 は He gas の圧力が 6×10^{-3} (torr) について Single probe と同様に行った結果である。Fig. 8 については He gas の圧力は 1.5×10^{-2} (torr) で行ったものである。この場合も測定点での磁場は 72 (gauss) に設定した。Fig. 9 に代表的な Double probe の電圧—電流特性を示す。この場合、第1及び第3象限の特性はほぼ対称となり、飽和電流が得られる。又、

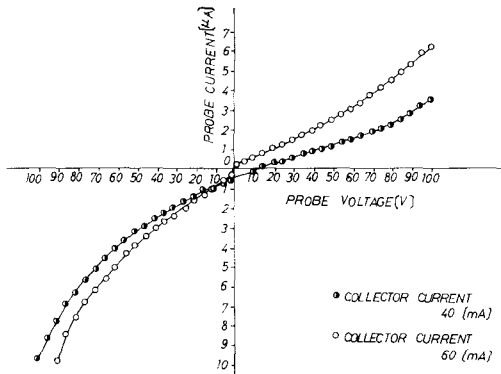


Fig. 7 Experimental result of the voltage and current characterist on the double probe at 6×10^{-3} (torr) He gas pressure.

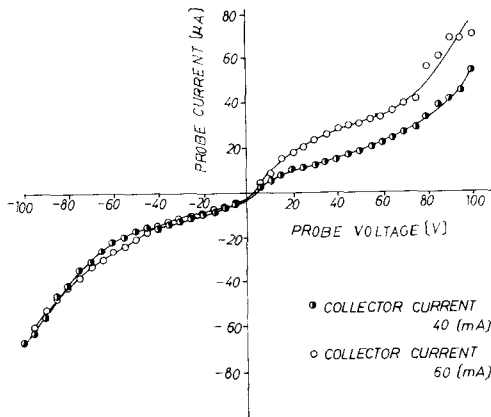


Fig. 8 Experimental result of the voltage and current characterist on the double probe at 1.5×10^{-2} (torr) He gas pressure.

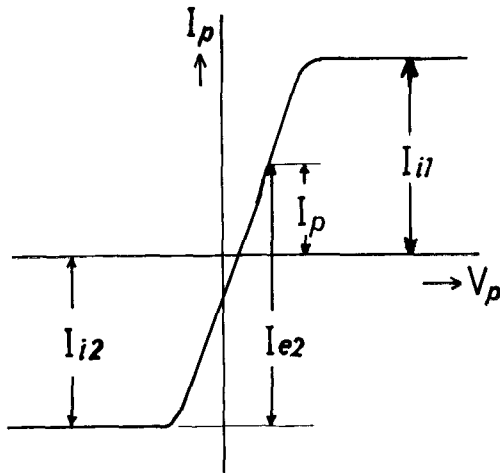


Fig. 9 Typical voltage and current characteristic on the double probe.

この傾斜部分より plasma 電子温度が算出される事はすでに多くの研究者によって確立されている⁶⁾。

Fig. 7 及び Fig. 8 について見ると双方とも $\pm 20 \sim \pm 50$ (V) 付近に飽和点が見られる。しかし、この場合あまり明確でなく電流の増加が激しい様に思われる。これについては探針から plasma への電流の流入があるのではないかと推測されるが今後この様な点についても考慮していかなければならないと考えている。

以上の結果より plasma の電子温度を算出してみると、He gas 圧が 6×10^{-3} (torr) の場合は collector 電流が 40(mA) に対して、 8.5×10^4 ($^{\circ}$ K), 60(mA) に対して、 1.2×10^5 ($^{\circ}$ K), そして He gas 圧が 1.5×10^{-2} (torr) の場合は同様に 40 (mA) に対して 9.3×10^4 ($^{\circ}$ K), 60(mA) に対しては 5.6×10^5 ($^{\circ}$ K) となった。この結果について Single probe の場合と比較してみると plasma 電子の温度の値においてはほぼ良い一致を見せており collector 電流に対する依存も一致している。しかし、gas 圧に対する依存は逆の結果が得られている。

この点については実験条件の再現性そして測定時間内に plasma に変化が生じているがその制御の点等について現在種々の問題を持っており結論を早急に出す事は出来ない様に思われる。

III-3 Coaxial probe の特性

次に従来提案されている探針法に対して Single probe と Double probe の特徴を兼ねそなえた探針の開発を行うためにまづ Double probe の 1 つの電極の形状を変えて非対称の電極を持った探針について考えてみた。

用いた探針は Single probe の被覆として用いている真ちゅうの管と心線間に電圧を印加したものをを用い測定は今までのと同様の条件で行った。

測定結果を Fig. 10 及び Fig. 11 に示す。

この測定法による探針電圧—電流特性は心線電位が正の時と負の時とは当然予想される様に非対称となり、特に心線電位が負の場合は心線電位が正の場合に比べてほとんど流れない程度に小さくなるため心線電位が負の場合の特性は無視出来る。

一方心線電位が正の場合は Single probe 及び Double probe と同様 $20 \sim 50$ (V) 付近に飽和点が見られる。

この飽和に関しては探針の電極配置からほぼ Double probe の場合と同じ現象によるものではないかと思われる。

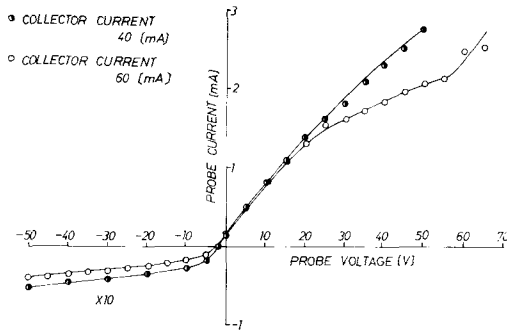


Fig. 10 Experimental result of the voltage and current characteristic on the coaxial probe at 8×10^{-3} (torr) He gas pressure.

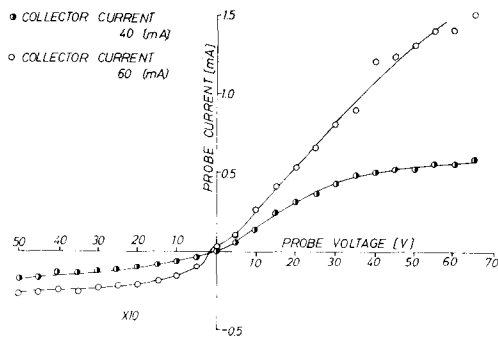


Fig. 11 Experimental result of the voltage and current characteristic on the coaxial probe at 1.5×10^{-2} (torr) He gas pressure.

これらの推測から心線電位が正の場合の特性をそのまま負の場合と対称にし Double probe の理論をあてはめて plasma 電子温度を算出してみると He gas 圧が 8×10^{-3} (torr) の場合で collector 電流が 40 (mA) に対して、 1.3×10^5 ($^{\circ}\text{K}$)、60 (mA) に対しては 1.2×10^5 ($^{\circ}\text{K}$)、そして He gas 圧が 1.5×10^{-2} (torr) の場合は 40 (mA) に対して、 4.6×10^5 ($^{\circ}\text{K}$)、60 (mA) に対しては 5.1×10^5 ($^{\circ}\text{K}$) が得られた。この結果について見ると今までのとはすべて逆の結果になっており単に Double probe の理論をあてはめる事は危険に思われる。

本報では定性的分析にとどめ、今後は定量的解析を行って行く予定である。

IV 検 討

定常 glow plasma において 3 種類の探針について測定を行った。これらの結果から各探針の比較を行っ

てみよう。探針による plasma の診断はその原理上特性の変化が明確でなければならない。本実験に用いた探針に限ってはその特徴が明確でありしかも再現性のある点については Double probe 及び Coaxial probe であろう。これについては plasma の potential の変動が特に Single probe については影響を受けやすい事から説明されるであろう。又、得られる信号の大きさからは Single 及び Coaxial probe が、一つの電極が大きく取れるために優れていると思われる。

この様な点から Coaxial probe はかなり優れた点を持っていると思われる。又、plasma の parameter の瞬時測定のため、もし Coaxial probe にほとんど Double probe の理論が適用出来るならば測定する手数が半分に軽減され算出も簡単化出来る便利さがあり現在の plasma parameter の測定のはん雑さを軽減出来るものと思われる。

3 種類の探針によって求められた plasma 電子の温度について考えてみる。本実験において Single 及び Double probe の結果からは gas 圧に対する依存は異なっているが collector 電流に対してはその増加とともに電子温度も増加している。これらの結果については測定条件の再現性の点から充分説明は出来ないと思われるが定性的には collector 電流の増加に伴う電子温度の増加は説明出来る。この様な点から本実験では He plasma における電子温度はほぼ 5×10^4 ($^{\circ}\text{K}$) から 5×10^5 ($^{\circ}\text{K}$) の間にあると結論出来る。

V 結 言

本報では低電離定常 glow He plasma において Single, Double 及び Coaxial probe の諸特性を測定した。その結果 Single probe と Double probe の特徴を生かした測定法として、又、測定値から plasma parameter の算出の簡易さが期待される Coaxial probe が期待に近い特性を示すことが得られた。しかし、実験条件の再現性及び Coaxial probe の定量的解析が今後問題点として残ると思われる。

又特性曲線から plasma 電子温度の算出を行いその結果 5×10^4 ($^{\circ}\text{K}$) から 5×10^5 ($^{\circ}\text{K}$) の間にある事が判った。

本報を書くにあたって実験装置の製作そして実験結果を得る事についていろいろと協力していただいた本学電子工学科梅本隆治君及び、研究室の諸君に心より感謝いたします。

Reference

- 1) 玉野, 北山; 広島工業大学研究紀要, **6**, (1), 109 (1972)
- 2) I. Langmuir and H. M. Mott-Smith; Gen. Elect. Rev., **27**, 449 (1924)
- 3) F. Wenzl; Z. Angew. Phys., **2**, 59 (1950)
- 4) G. Wehner and G. Medicus; J. App. Phys., **23**, (9), 1035 (1952)
- 5) 武田進; “プラズマの基礎” (朝倉書店, 1969, p. 203)
- 6) L. Malter and W. M. Webster; R. C. A. Rev., **12**, 191 (1951)