

# ワッシャーガンを用いたフロープラズマ源開発

46205 藺田 将人

(指導教員 小野 靖 教授)

KeyWords: plasma source, washer gun, electrostatic ion energy analyzer, NBI

## 1 序論

### 1.1 プラズマワッシャーガン

安価で保守が容易なプラズマ源は、運動エネルギーを自在に制御してイオン・電子ビームを利用する応用機器には欠くことができない。多くのプラズマ源は、金属電極からの熱電子と中性粒子との衝突による電離によってプラズマを生成する手段を用いている。しかし、金属電極の寿命が短い、不純物が多いという欠点があり、これらを改良したワッシャガンを用いたプラズマ源が開発されている。

### 1.2 中性粒子ビーム (NBI) 加熱

現在のトカマク研究の目的は、核融合発電炉出力を成立させるために、自己点火の条件である 10keV 以上の温度を達成することである。そこで、外部からプラズマを加熱する様々な方法が考案されている。その方法の1つが、中性粒子ビーム (NBI) 加熱である。

中性粒子ビーム加熱は次の過程で行われる。(1) 印加電圧で、イオン源からイオンを引き出し、加速する (2) 中性化セルで、加速された高速イオンを中性化する (3) プラズマ中の低速イオンと高速中性粒子の荷電交換現象によりプラズマが加熱される

### 1.3 本研究の目的

本研究では、コンパクトトラス (CT) 磁気閉じ込め装置の立ち上げと初期加熱、さらには中性粒子ビーム入射装置用のプラズマ源としてプラズマワッシャーガンに再注目し、CT 磁気閉じ込め実験装置 TS-4 で生成される CT 高性能化のために加熱・電流駆動に用いることを想定し、ワッシャーガンの放電特性を調査する。また、ワッシャーガンをイオン源とする安価で保守が容易な低電圧大電流型の中性粒子加熱装置の構築を想定し、ワッシャーガンプラズマの密度を計測することによりイオン源として適しているかどうかを検討する。

## 2 TS-4 装置におけるワッシャーガンの適用

### 2.1 ワッシャーガンプラズマのイオンエネルギー分布計測

#### 2.1.1 実験方法

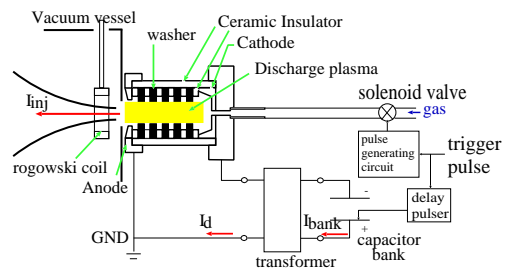
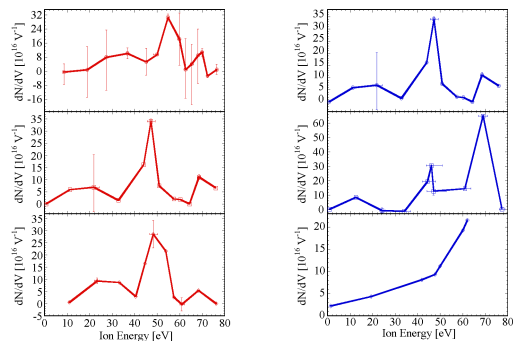


図 1: ワッシャーガンシステム

図 2 に TS-4 に取り付けられたワッシャーガンの概念図を示す。主に anode 部分、cathode 部分、washer stack 部分からなりそれぞれ SUS304 製である。ガスパフには、電磁弁を用い、電磁弁へのトリガ信号と放電電源へのトリガのタイミング ( $\tau_{delay}$ ) を変えることにより放電時のガス圧を変えることができる。計測は、静電イオンエネルギー分析器を用いてイオンエネルギーを計測した。

#### 2.1.2 実験結果



(a) ガス圧依存性 (b) 充電電圧依存性

図 2: イオンエネルギーのガス圧・充電電圧依存性

図 2 にガス圧および充電電圧 ( $V_{charge}$ ) の違いによるイオンエネルギーの違いを示す。(a) はガス圧を変えた場合であり、上から  $\tau_{delay}=7.8, 8.0, 8.2$  [msec] での計測結果である。 $\tau_{delay}$  が大きいほどガス圧が高いことを意

味する。 $V_{charge}$  は 10[kV] で共通である。(b) は充電電圧を変えた場合であり、 $\tau_{delay}$  は 8.0[msec] で共通で、上から  $V_{charge}=10,12,14$ [kV] での計測結果である。

どの図においてもピークを示すイオンエネルギーが 45 ~ 70[eV] の範囲でピークした特性を示すことがわかる。また、充電電圧が高いほど高くなる傾向にあることがわかる。

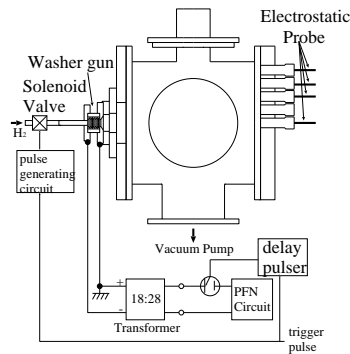


図 5: ワッシャーガンの特性測定装置 構成図

## 2.2 磁場中への入射実験

### 2.2.1 実験方法

ワッシャーガンの入射方向に対して垂直な磁場をかけ、上記の実験と同様に静電イオンエネルギー分析器でイオンエネルギー分布を計測した。磁場の強さ ( $B$ ) は、0.00448, 0.00724, 0.0100[T] の 3 通りで計測を行った。

### 2.2.2 実験結果

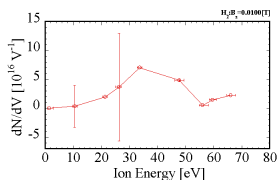


図 3:  $B=0.0100$ [T] 時のイオンエネルギー分布

図 3(a) に代表として  $B=0.0100$ [T] のときのイオンエネルギー分布を示す。ここでは、 $\tau_{delay}=8.0$ [msec],  $V_{charge}=10$ [kV] で計測を行っている。磁場なしのものとは明らかにイオンエネルギーが減少しているとともに、エネルギー幅が広がっていることがわかる。次に、磁場強度とコレク

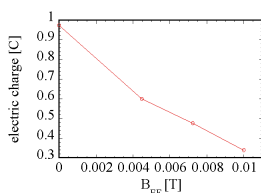


図 4: 磁場強度とイオン電流の時間積分値の関係

タで捕獲した電荷量の関係を図 4 に示す。磁場強度にほぼ比例するように電荷量が減少していることがわかる。しかし、僅かながらも磁場中に侵入できることが示された。

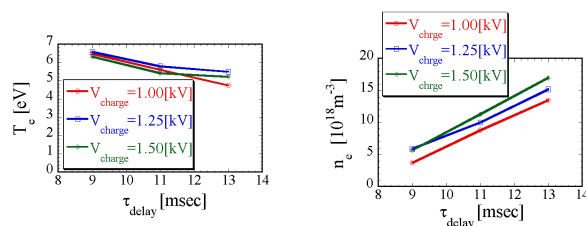
## 3 ワッシャーガンの NBI 用のイオン源としての特性解析

### 3.1 測定装置の構成

図 5 に示すように参照放電電圧は PFN により供給し、ガスは電磁弁による制御でボンベから供給する。第 3 節と同様に ( $\tau_{delay}$ ) を変えてガス圧力を制御する。半径方向 4 点に取り付けられたトリプルプローブ型静電プローブを用いてプラズマの電子温度と密度を測定

する。軸方向に可動式であるので、容器内プラズマの空間分布を測定することができる。

## 3.2 測定結果



(a) 電子温度  $T_e$  のガス圧依存性 (b) 電子密度  $n_e$  のガス圧依存性

図 6: 電子温度、電子密度のガス圧依存性

図 6 に各放電電圧での電子温度  $T_e$ 、電子密度  $n_e$  のガス圧依存性を示した。電子温度は放電電圧やガス圧で大きく変化することはなく、ほぼ一定値をとると考えられる。電子密度は、放電電圧では大きく変化しないが、ワッシャーガンのガス圧で大きく変化し、少なくとも  $5 \times 10^{18} \sim 2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  程度の範囲では変化させられることが分かった。電子密度の制御にはガス圧 ( $T_{delay}$ ) の制御が有効だと考えられる。

## 4 まとめ

TS-4 装置において、ガスパフ式のワッシャーガンシステムを構築し、静電イオンエネルギー分析器を製作して、イオンエネルギー分布を計測した結果、50[eV] 付近にピークした特性を示すことが分かった。その特性は充電電圧が高くなるほど大きくなる傾向にある。磁場中への入射実験から 0.014[T] 程度の磁場強度なら入射が可能であることが示唆された。

また、ワッシャーガンをイオン源とする低電圧高電流型中性粒子加熱装置の構築を想定し、ワッシャーガンプラズマの電子密度を計測し、それがイオン源として最適であるかどうかを検討した結果、約  $10^{18} \text{m}^{-3}$  程度であり、イオン源として望まれる密度であることが示唆された。さらに、ガス圧、充電電圧を変えることにより、ワッシャーガンの射出口直後において  $5 \times 10^{18} \sim 2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  の範囲でイオン密度が制御できることが分かった。