

NBI 用高周波負イオン源の開発

田内 康

山口大学工学部

1 はじめに

1.1 負イオン源について

制御熱核融合炉の運転には加熱が必要である。加熱する方法として ICH (Ion Cyclotron Heating) や ECH (Electron Cyclotron Heating)、NBI (Neutral Beam Injection) などの手法が挙げられる。この中で、高エネルギーの入力ができ、また最も信頼のおけるものが NBI 加熱装置である。NBI 加熱装置は、イオン源、加速装置、中性化セルからなっている。ITER などの高エネルギーの入力が必要な核融合装置には、負イオン源を使用したものが必要となる¹⁾。現在の核融合炉の N-NBI 加熱装置の負イオン源は、直流放電プラズマに磁気フィルターを適用し、なおかつセシウム (Cs) を使用したものである。そして現在の必要とされる引出し負イオン電流値を達成している。しかしながら、今後の長時間運転やメンテナンスを考慮すると、寿命の短い、タングステンフィラメントを利用した直流放電には、限界がある。そこで、我々の研究室においては、高周波放電プラズマを利用した負イオン源を検討している。

1.2 負イオン生成について

水素負イオンは、次の 2 段階生成が最も効率が良いと言われている。

(1) $H_2 + ef \rightarrow H_2^+ + ef'$ 振動励起分子生成過程

(2) $H_2^+ + eI \rightarrow H^- + H$ 負イオン形成過程

H_2^+ は振動励起分子 (準位は 5 以上)、 ef は高速電子 (20eV 以上)、 eI は低速電子 (電子温度 1eV 以下)、 H_2 は基底準位の水素分子、 H^- は水素負イオン、 H は水素原子である。また、水素負イオンは 1eV 以上のエネルギーを持った電子と衝突して壊されるので、(1) と (2) は別々の領域で反応させる必要がある。核融合には、重水素ガスを用いるが、重水素負イオンと水素負イオンの生成機構は同様と考えている。

1.3 プラズマの空間的制御について

異なるプラズマを隣り合わせる制御法として磁気フィルター法、メッシュグリッド法がある。磁気フィルター法は、プラズマ空間中にシート状の磁場を設置する方法であり、現在の NBI 用負イオン源で直流放電と共に使用されている。メッシュグリッド法は、プラズマ中にメッシュを設置して、それに負バイアスを印加する方法でありプロセスプラズマ装置に利用されている²⁾。どちらも、プラズマの生成領域 (上流) に比べ、拡散プラズマ領域 (下流側) の電子温度を低くなることが確認できている。両手法とも、色々な電子輸送モデルが検討されている。



(a)ICP 用電極フランジ



(b)CCP 用電極フランジ

図 1 プラズマ生成の電極

1.4 高周波プラズマについて

高周波放電プラズマは、13.56MHz や 2.45GHz といった周波数の電磁波を用いたものがあり、大口径のプラズマが簡単にできるなどの利点からすでに半導体プロセスの場などで利用されている。2.45GHz などのマイクロ波電界と共鳴磁場を用いた ECR(Electron Cyclotron Resonance)プラズマや高周波電磁界を用いた RF プラズマがある。本研究では特に RF 放電プラズマを検討しているが、生成法の違いから容量結合型プラズマ (CCP) と誘導結合型プラズマ (ICP) がある(図 1 参照)。CCP は 2 極電極間の電場を変化させることにより電子の加速減速を繰り返し電子と中性粒子の衝突によりプラズマを生成する。ICP は、コイルの電流の向きを変化させることにより磁場を変化させ同様にプラズマを生成する。

2 本研究の目的

本研究の目的は高周波(13.56MHz)プラズマ源を用いた NBI 用負イオン源の開発である。そのためには、低圧力動作 (1 mTorr 程度)の大電流の負イオン引出しが必要である。負イオンを効率よく生成するためには、前記のように、プラズマの領域分割が必要になる。また Cs を併用する場合には、金属表面の仕事関数を低くするために加熱が必要であり熱源を持たない RF プラズマでは考える必要があるし、また、定期的な除去作業が必要になるので、使用しない方向で検討を行う。

これまでの実験結果から、高周波に対しては磁気フィルター効果があまり効かないことが判っている³⁾。そこで、磁気フィルター法やメッシュグリッド法といった各種プラズマの空間的制御法において、これまでの実績のある直流放電との実験結果を比較しながら検討を行うことで実験を進め、高周波放電による NBI 用負イオン源の開発を行う。

3 実験装置

図 2 に実験装置の概観図、図 3 に実験装置の概略を示す。図は、磁気フィルターと CCP のプラズマ源であるが、この他にプラズマ生成法として ICP や直流放電、制御法としてはメッシュを利用することができる。プラズマ源は、RF アンテナのあるプラズマ生成領域 (上流) と、磁気フィルターを挟んで向かい側の拡散プラズマ領域(下流)から成っている。実験装置は、直径は 20cm のステンレス製円筒容器であり、容器外周には、プラズマ閉じ込め用の磁石をラインカスプ状に設置している。プラズマは高周波電源(13.56MHz)にマッチングボックスを介して RF アンテナに電力を供給することで生成している。

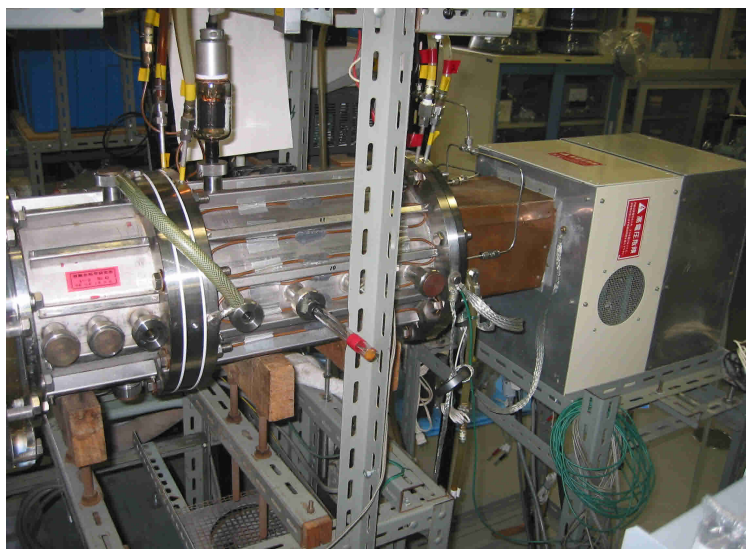


図 2 実験装置概観図
(右はマッチングボックス)

プラズマパラメータの測定には、容器後方より挿入したシングルプローブやダブルプローブを用いて電圧電流特性を測定し、その結果から求める。なお、負イオン電流測定には容器後方にファラディカップ型負イオン分析器を設置し測定を行う。

また、高周波の大電力入力特性を調べるときには、発生する熱量が大きいためパルス入力に対応する。そのため計測系を図4に示す。これは、計測器であるデジタルオシロスコープの参照サンプリング信号と電源入力のRFおよびパルス信号を2台の波形発生装置の信号を元に同期する。この回路を利用することで高価なボックスカー積分器を使用しなくても13.56MHzの一周期内のプラズマパラメータの位相依存性を見ることも出来る。

4 実験結果

図5に実験結果の一部を示す。このことにより高周波放電にメッシュグリッド法を用いた場合、水素負イオンの2段階生成機構の条件となる、上流で高温領域、下流で1eV以下の低温領域が生成されていることを確認した。しかしながらプラズマパラメータの軸方向分布から必ずしも有利ではない。今後は負イオン密度の軸方向測定するなどして検討を行っていきたい。また、高周波放電においては電子密度が低く、

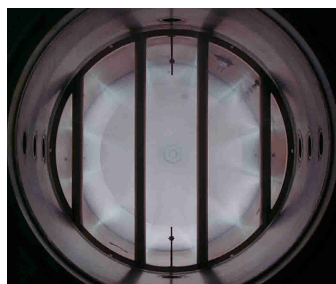
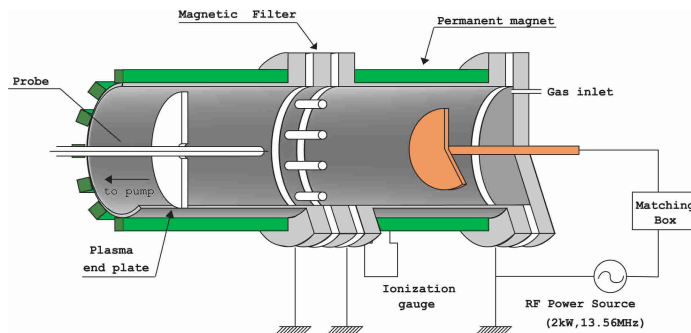


図3 実験装置概略図と生成したプラズマの写真

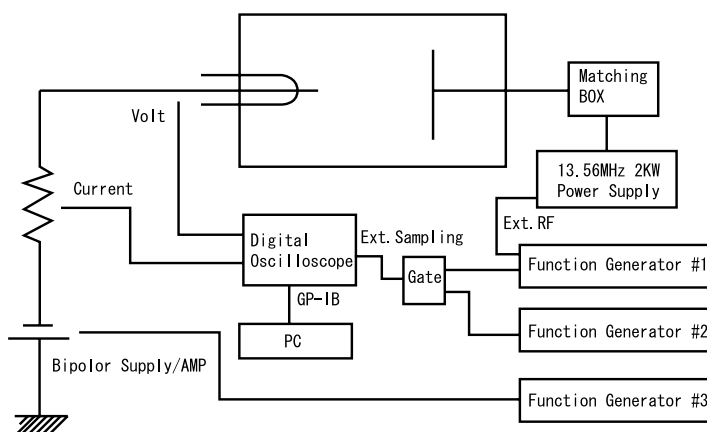


図4 パルス入力に対応した測定回路

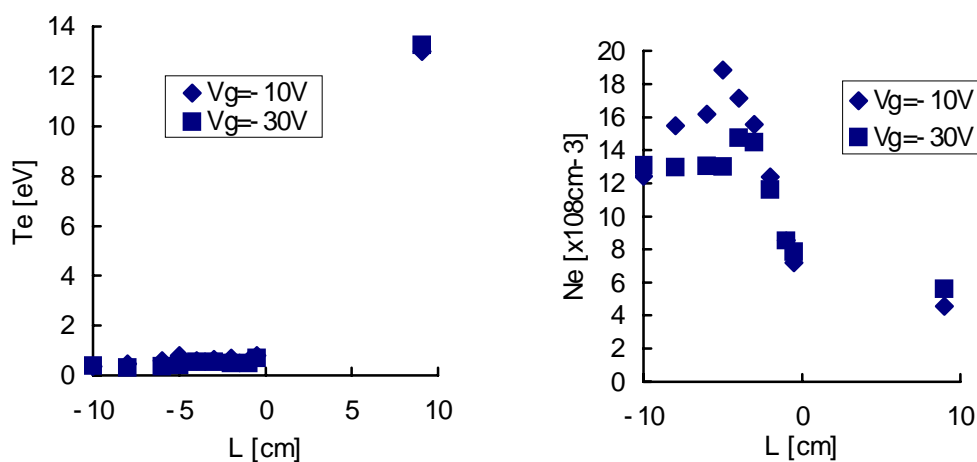


図5 メッシュグリッド法とRFプラズマを用いた場合のプラズマパラメータの軸方向依存性

(H₂ 6mTorr RF Power=200W)

負イオン生成量もそれに伴って低くなっていると思われ、現在の所負イオン電流の測定が出来ていない。なお、時間フィルター（高速電子の方が拡散速度が速いので、プラズマを切ると一時的に低速の電子のみになる事）を利用することで、負イオンが生成していることは、確認している。詳細は講演にて述べる。

5 今後の予定

今後の予定としては、下記の5件を当面の課題とし、検討を行っている。

1. ICP と CCP との比較

これまでの実験から CCP のプラズマ生成はアンテナ表面のシースにおいて生成していると考えている。ICP においては、コイルの中心で、プラズマを生成すると考えられるのでプラズマを安定して生成できると考え易いが、コイルに大電流が流れるため、電流導入部において銅損（渦電流）が生じるため必ずしもそうなると言えない。また、磁気フィルターの持つ磁場の影響により、プラズマ生成が不安定になる場合もあり検討を要する。

2. メッシュグリッド法の検討

我々の研究室においては、明確な制御モデルを説明できていない。従って、高周波プラズマの実験結果が妥当かの評価が出来ていない。そこで、直流放電プラズマにおいて詳細を検討している。

3. VHF (100MHz) プラズマによる負イオン生成の検討。

電子温度の周波数依存性が報告されている。そこで、本研究においても VHF プラズマを生成し NBI 用の負イオン源の確認を行い、有効性を検討する。しかしながら、周波数が上昇すると、誘電損や渦電流と言った損失が大きくなる。従って、入力電力に対して、どのような評価を行えば良いかを検討する。また、有効な電力を供給する方法についても調査を行いたい。

4. 角型容器での RF プラズマ生成実験で、容器依存性について検討する。

現在、異なった形のプラズマ源としてマルチカスプ磁場と外部磁気フィルターを利用した角型プラズマ源を準備している(図6)。この容器においては、これまでと異なるプラズマ閉じ込め用や磁気フィルターの磁場配置でのプラズマ生成が可能である。現在のプラズマ源とプラズマパラメータの較検討を行う。

5. プラズマ源内の負イオン密度分布の測定を行い、プラズマパラメータの軸方向依存性と比較検討する。
Nd-YAG レーザを用いた負イオン計測法を使用して、高周波プラズマ源内の負イオン密度分布を測定する。

参考文献

- 1)K.W.Ehlers: J.Vac.Sci.Technol. A1, 974(1983).
- 2)R.Ikada et al.: Proc. of the 20th Symp. On Plasma Processing, 57(2003).
- 3)Y.Tauchi, O.Fukumasa : 2003 IEEE Int. Conf. on Plasma Science, 210(2003)

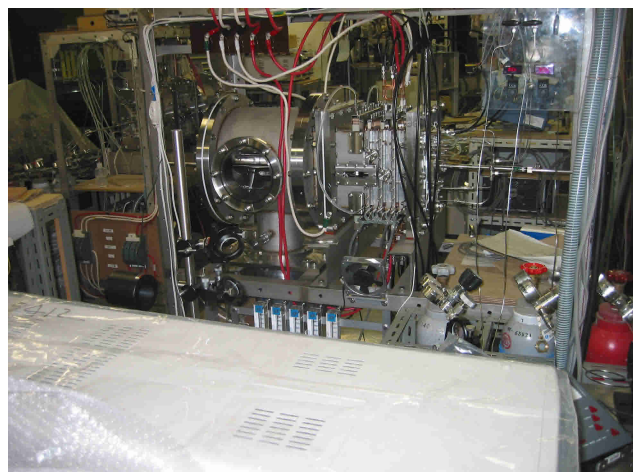


図6 角型プラズマ実験装置の概観図
(手前はNd-YAGレーザー)