

ヘリカル型リジターノコイルによる大直径磁化プラズマの生成

河合良信*・末次祐介**・中島寿年***・中村良治

(1986年2月25日受理)

Production of a Magnetized Plasma of Large Diameter with a Helical-Type Lisitano Coil

By

Yoshinobu KAWAI, Yusuke SUETSUGU, Hisatoshi NAKASHIMA
and
Yoshiharu NAKAMURA

Abstract: Characteristics of a plasma produced by electron cyclotron resonance using a helical-type Lisitano coil are investigated. Plasma parameters are as uniform and quiescent as that produced by a slotted-type coil. A high density plasma beyond the plasma cut off is obtained by adjusting a stub tuner.

概 要

ヘリカル型リジターノコイルを用いて生成される ERC (電子サイクロトン共鳴) プラズマの特性を調べた。スロット型リジターノコイルを用いた場合と同様、一様で静かなプラズマがえられる。スタブチューナの調節によりプラズマカットオフ以上の高密度プラズマが生成される。

1. はじめに

現在、スペースプラズマ研究における重要課題の一つは、オーロラ現象に代表されるような、非一様電場・磁場中のプラズマ現象の解明である。一方、核融合プラズマ研究においては、プラズマ粒子・熱輸送機構の解明が急務となっている。これらの物理的基礎過程

* 九州大学大学院総合理工学研究科

** 高エネルギー物理学研究所

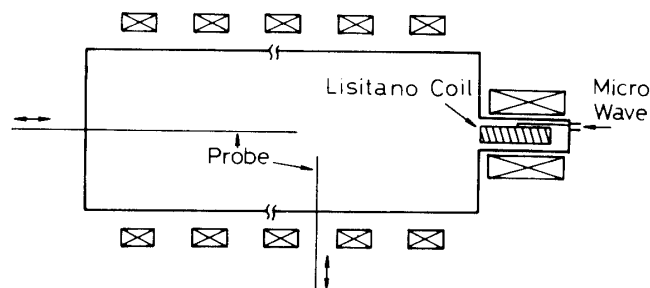
*** 九州大学応用力学研究所

を明らかにするためには、実験室内において直径のある程度大きい一様プラズマを生成し、できるだけ理想化された状況のもとで詳細な実験を行うことが必要である。

リジターノらは、マイクロ波放電用アンテナとして二種類のアンテナ、いわゆるスロット型リジターノコイルとヘリカル型リジターノコイルを開発した[1, 2]。何れも、アンテナの直径が加えるマイクロ波の周波数と無関係に決定できるという特徴をもっているので、直径の大きなプラズマの生成が期待できる[3, 4]。我々は、スペースプラズマ専門委員会の共同研究として、ヘリカル型リジターノコイルを用いて、電子サイクロトロン共鳴(ECR)による大直径プラズマの生成を行っている。これまでに、電子密度 $10^9 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 、電子温度 $3 \sim 4 \text{ eV}$ 、直径 $30 \sim 40 \text{ cm}$ の一様プラズマが得られることを示した[5]。ここでは、プラズマパラメータの半径方向分布測定、真空時およびプラズマ生成時の容器内マイクロ波強度分布測定および高密度プラズマの生成実験の結果を示す。更に、九大における、スロット型リジターノコイルを用いた場合の実験結果[3, 4, 6]と比較する。

2. 実験装置

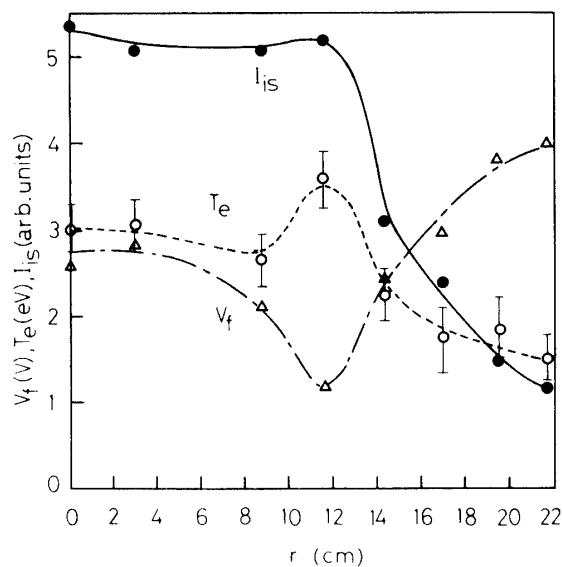
実験は、第1図に示されているように、宇宙研の磁化プラズマ装置(直径 45 cm 、長さ 2.3 m 、最大磁場強度 200 G)を用いて行った。容器の一端に枝管を取りつけ、ヘリカル型リジターノコイル(直径 6 cm 、長さ 19.5 cm)を設置し、これに周波数 2.45 GHz 、出力 1.2 kW のマイクロ波を加え、ECRによりプラズマを生成する。リジターノコイル付近の磁場強度は、そこでの電子サイクロトロン周波数が、マイクロ波の周波数 2.45 GHz に等しくなるように設定してある[5]。マイクロ波系とプラズマ系との整合はスタブチューナによって取られる。プラズマのパラメータは可動ラングミュアプローブにより測定される。また、マイクロ波の強度分布は、直径 1 cm の小型ループアンテナの受信信号を、中心周波数 2.45 GHz のバンドパスフィルターを通し、ダイオードにより検波して測定する。使用した気体はアルゴンで、圧力は $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ Torr}$ の範囲で実験を行った。



第1図 実験装置の模式図

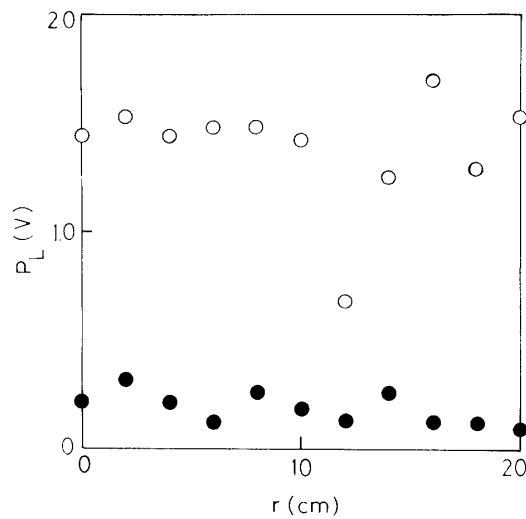
3. 実験結果と検討

生成されたプラズマの特徴を見るために、イオン飽和電流 I_{is} 、電子温度 T_e 、浮遊電位 V_f の半径方向分布を測定した。典型的な測定結果を図2に示す。図は直径約25 cm の一様プラズマが生成されていることを示す。またこの図は、プラズマの浮遊電位が $r=12$ cm 近くで低くなっていることを示している。このことは、 $r=12$ cm 付近に高エネルギー電子が存在することを意味している。スロット型リジターノコイルを用いた実験でも、上と同様な結果が観測されている[4]。このように、ヘリカル型リジターノコイルにより生成されるプラズマは一様性が良く、非常に静かである ($\delta n/n \approx 1\%$)。



第2図 プラズマパラメーターの半径方向分布。磁場強度 $B=180$ G, 圧力 $=7.3 \times 10^{-5}$ Torr

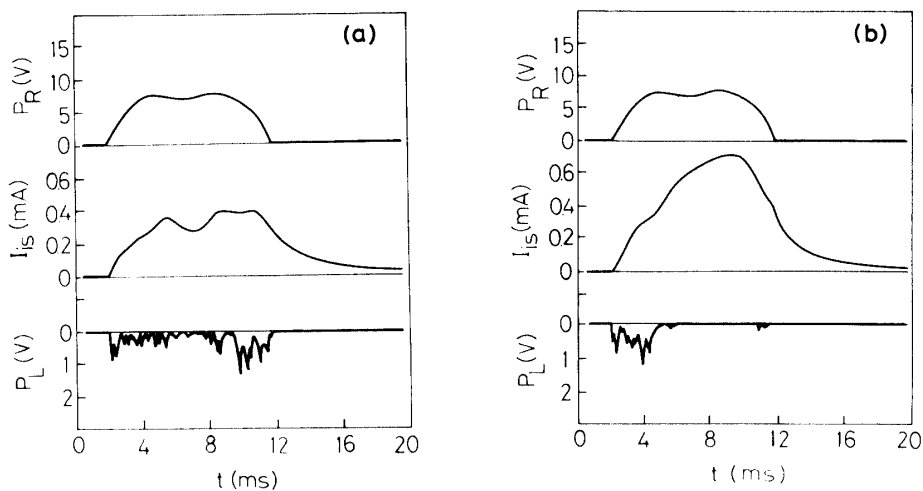
次に、小型のループアンテナを半径方向から挿入し、マイクロ波の半径方向の電磁場強度分布を測定した。容器内の電磁波伝播の様子を知ることは、プラズマの生成状況や生成されたプラズマ中の不安定性を考える際に重要である。結果を図3に示す。白丸、黒丸は、それぞれ、真空時およびプラズマ生成時に対応している。真空の場合、マイクロ波強度は、壁近くで少し乱れているが、半径方向に一様な分布をしており、マイクロ波が容器内に一様に伝播していることを示している。また、マイクロ波強度が容器壁近くで局所的に小さくなることは、スロット型の場合の測定でも得られている[6]。これは、リジターノコイルの壁の影響と考えられる。プラズマ生成時の受信強度は、図からわかるように、真空時の12%近くにまで小さくなり、大部分のマイクロ波がプラズマ生成に消費されていることがわかる。また、この図はプラズマ密度がマイクロ波のカットオフ密度 ($=7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$) に達していないことも示している。図3は、ループ面を鉛直にした場合の結果であるが、



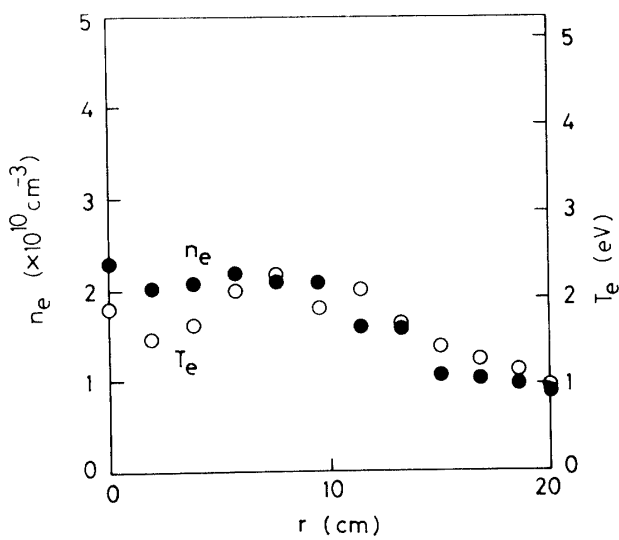
第3図 ループアンテナ信号 (P_L) の半径方向分布. ○はプラズマが存在しない時で, ●はプラズマが存在する時の値である.
 $B=66$ G, $P=3 \times 10^{-4}$ Torr

水平にした場合でも同様の結果が得られた。

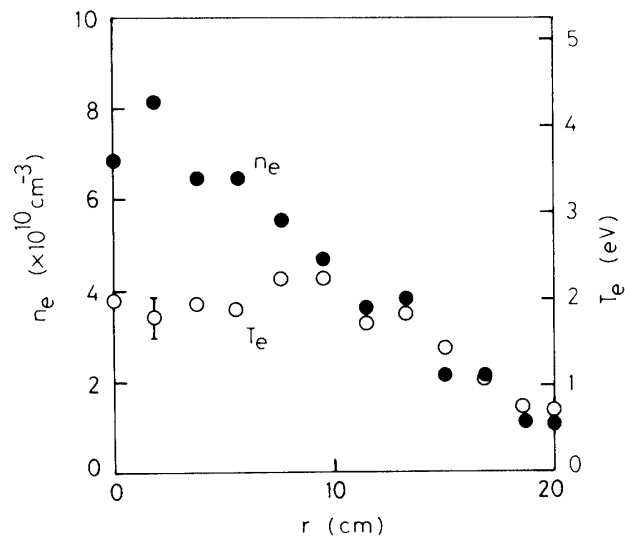
最後に, スタブチューナーを調節することによって, 高密度プラズマの生成を試みた. スタブチューナーは, プラズマとマイクロ波のインピーダンス整合を行うものである. スタブチューナーを変化させる前後の反射マイクロ波強度 P_R , 中心でのイオン飽和電流 I_{is} およびループアンテナの受信強度 P_L の時間波形をそれぞれ図4 (a), (b)に示す. 上記のマイクロ波強度分布の測定は(a)の状態で行ったものである. (b)のイオン飽和電流は(a)のそれよりも約2倍ほど大きくなっているのがわかる. また, (b)の場合, I_{is} のピーク近くでは, ループアンテナにマイクロ波が受信されていない. このことは, マイクロ波のカットオフ密度以上のプラズマが生成されていることを示す. 図5 (a), (b)は, それぞれスタブチューナーを調節する前後の電子密度 n_e と電子温度 T_e の半径方向分布である. この測定でも, (b)の場合, 中心の密度がカットオフ密度以上になっている. 一方電子温度はほとんど変化しなかった. ただし, プラズマ密度が一様な部分の直径は約10 cmと(a)の場合の約1/2になっている. このことは, スタブチューナーを調節することによって, コイルの軸近くにマイクロ波電場を集中させ, 高密度のプラズマを生成できることを示唆するものである. ヘリカル型リジターノコイルの直径を大きくすれば更に大直径で高密度のプラズマが得られるであろう. 図5 (b)に見られるカットオフ密度以上の高密度ECRプラズマはスロット型の場合でも得られており, このことは, ヘリカル型コイルでも高密度のプラズマが得られることを示すものである.



第4図 ループアンテナの信号波形 (P_L), マイクロ波の反射波形 (P_R), イオン飽和電流波形 (I_{is}). $B=66\text{ G}, P=3\times 10^{-4}\text{ Torr}$



第5図(a)



第5図(b)

第5図 電子の密度 (n_e) と温度 (T_e) の半径方向分布. $B=66\text{ G}, P=3\times 10^{-4}\text{ Torr}$

4. 結論と今後の課題

得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 生成されたプラズマの半径方向分布は一様で、スロット型リジターノコイルによって生成されるプラズマと同様の分布をしている。
- (2) マイクロ波は真空容器内にほぼ一様に放射されている。
- (3) 大部分のマイクロ波はプラズマ生成に消費されている。
- (4) スタブチューナーを調節することにより、マイクロ波のカットオフ密度以上の高密度プラズマが得られる。

以上のように、ヘリカル型リジターノコイルによってもスロット型リジターノコイルを用いた場合とほぼ同様の、静かで一様性のよいプラズマが得られることがわかった。今後は、直径の大きなリジターノコイルを用いて、より一様性のよい大直径高密度プラズマを生成する実験を行う予定である。

謝 辞

本実験に対して激励してくださいました九州大学応用力学研究所の矢嶋教授と宇宙科学研究所の伊藤教授に感謝致します。またこの実験はスペースプラズマ専門委員会の共同研究として行われた。

参 考 文 献

- [1] G. Lisitano, R. A. Ellis, Jr., W. M. Hooke and T. H. Stix, Rev. Sci. Instrum. **39** (1968) 295.
- [2] G. Lisitano, M. Fontanesi and E. Sindoni, Appl. Phys. Lett. **16** (1970) 120.
- [3] Y. Kawai and K. Sakamoto, Rev. Sci. Instrum. **53** (1982) 606.
- [4] Y. Suetsugu and Y. Kawai, Jpn. J. Appl. Phys. **23** (1984) 237.
- [5] 河合良信, 中島寿年, 真島清人, 中村良治, 宇宙科学研究所報告, 特集第5号 (1983) 61.
- [6] Y. Suetsugu and Y. Kawai, Jpn. J. Appl. Phys. **23** (1984) 1101.