

# マイクロ波による直径磁化プラズマの生成

河合 良信\*・中島 寿年\*・真島 清人・中村 良治

(1982年10月27日受理)

## Production of a magnetized plasma of large diameter with a microwave

By

Yoshinobu KAWAI, Hisatoshi NAKASHIMA, Kiyoto MASHIMA

and Yoshiharu NAKAMURA

**Abstract:** A magnetized plasma of large diameter is produced with the electron cyclotron resonance in a helical Lisitano coil. The density and the electron temperature of the plasma are  $(1\sim 5) \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$  and  $(3\sim 4)\text{eV}$ , respectively. The diameter of the plasma is  $(30\sim 40)\text{cm}$ .

### 概要

ヘリカル型リジタノコイル(内径6cm)による電子サイクロトロン共鳴を用いて、大直径磁化プラズマの生成に成功した。得られたプラズマの密度  $(1\sim 5) \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 、電子温度  $(3\sim 4)\text{eV}$  でありプラズマの直径は  $(30\sim 40)\text{cm}$  である。

### 1. はじめに

スペースプラズマ現象を実験室で模擬実験する際に、しばしば問題になるのが境界条件である。無磁場の場合には、宇宙科学研究所のスペースチェンバーのように容器が大きければ、プラズマ源[1][2]が小さくてもチェンバー全体に拡散し一様なプラズマが得られる。しかし外部磁場が存在する時には、プラズマは磁力線に沿って流れるので断面積の大きいプラズマを生式するためには大きなプラズマ源が必要となる。一つの方法として大面積の酸化膜陰極とその直前に置かれたグリッドとの放電が開発され、磁気再結合[3]やホイッスラー波の伝播[4]の実験が行われた。この方法は低いガス圧でもプラズマを生成できる利点はあるが、(1)酸化膜の温度を800度位まであげなければならないので大電力を消費する、(2)酸化膜面上の温度不均一がそのまま密度分布に反映される、(3)チェンバ

---

\* 九州大学応用力学研究所

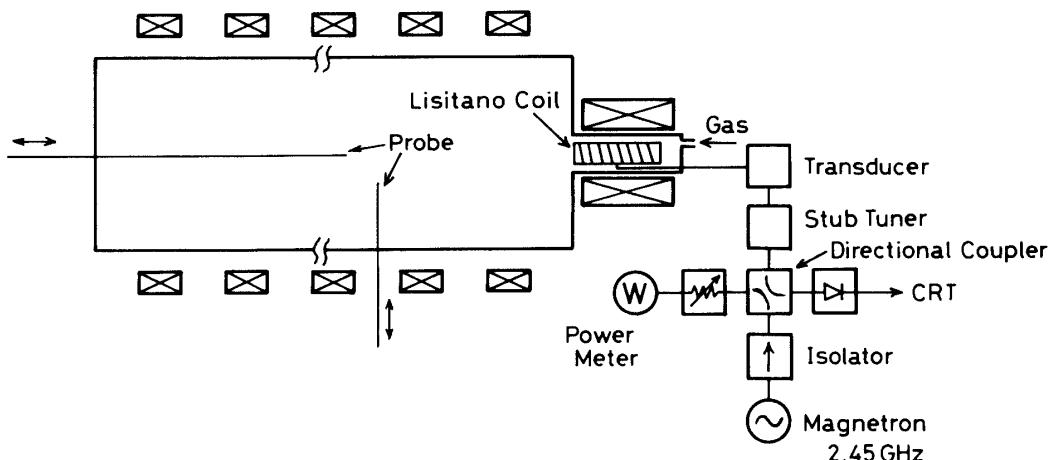
一内を大気にした場合には酸化膜を塗り直さなければならない等の欠点がある。

電子サイクロトロン共鳴加熱法を利用したリジタノコイル (Lisitano coil) [5] は、容易にプラズマを生成できるので基礎研究用プラズマ源として使用されてきた。特にヘリカル型リジタノコイルは共鳴幅が広いので多く利用されている[6]。キャビティや導波管と異なり、リジタノコイルの直径は印加するマイクロ波の周波数に無関係に選択できるという特長を持っているので直径の大きいプラズマの生成が期待できる[7]。

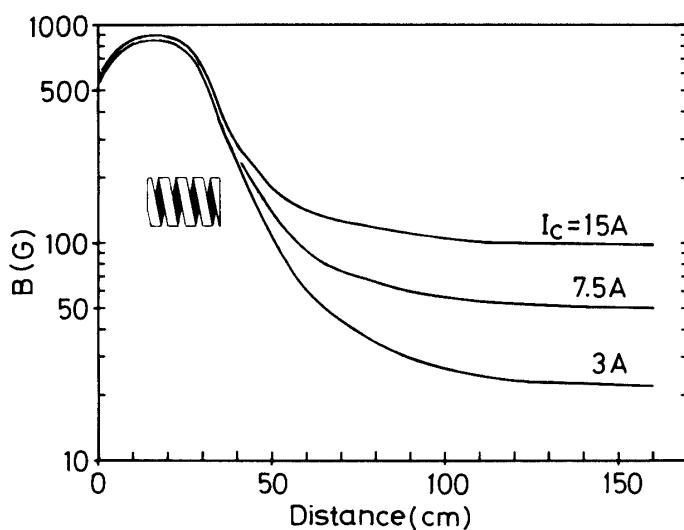
コイルを用いる方法としては RF 放電 (周波数は数十 MHz) [8] があるが、ここでは市販の電子レンジを改良することにより発振器が入手しやすいことと、磁力線を広げることにより断面積を大きくするためマイクロ波 (2.45 GHz) を用いた。

## 2. 実験装置

実験装置の模式図を第1図に示す。真空容器はステンレススチール製で、長さ 230 cm,



第1図 実験装置の模式図



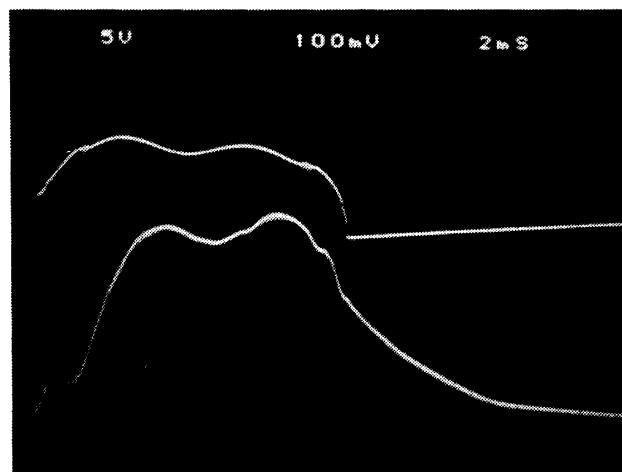
第2図 チェンバー中心での軸方向磁場強度分布。 $I_c$  は チェンバーの磁場コイル電流。

内径 45 cm である[4]。この一端に、図に示されているように直径 6 cm のヘリカル型リジタノコイルを取付け、周波数 2.45 GHz、出力 1.2 kW のマイクロ波を印加する。この場合リジタノコイルのスリット幅は 2 mm である。マイクロ波源としては簡単に入手出来る市販の営業用電子レンジに改良を加えたものを使用した。マグネットロンの出力を導波管で取り出した。反射波がマグネットロンに逆もどりして波損するのを避けるため、マグネットロンの後段にアイソレーターを取り付けてある。マイクロ波出力は 50 Hz で変調されている。

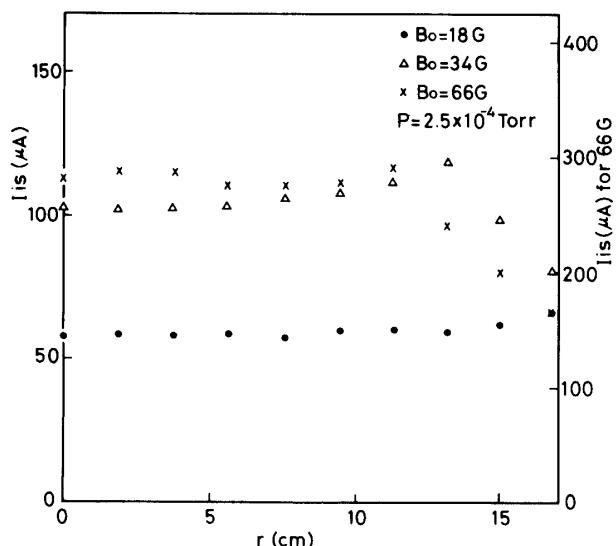
リジタノコイルの中心部の磁界の強さを、電子サイクロトロン周波数がマイクロ波の周波数 2.45 GHz になるよう別の磁場コイルを置いて調節した。一方、真空容器内での磁場は第2図に示した測定結果に見られるように一様である。今回実験した一様磁場の範囲は 18~100 G であった。マグネットロンは磁場コイルによる磁界の影響を避けるため、直線導波管により装置本体から約 2.5 m 離して設置されている。リジタノコイルに供給されるマイクロ波の入射波と、コイルからの反射波の波形は第1図に示されているように、方向性結合器とクリスタルダイオードにより測定される。また入射波の電力は減衰器を通してから電力計で求められる。マイクロ波回路系とプラズマとの整合は導波管型スタブチューナーで取られた。リジタノコイルには同軸モードでマイクロ波を供給する必要があるので、スタブチューナーの後に導波管一同軸変換器を取り付け、導波管モードを同軸モードに変換した。生成されたプラズマのパラメータは、チャンバーの径方向と軸方向に可動なプローブで測定した。プローブは直径 6 mm の平板プローブである。使用した気体はアルゴンである。

### 3. 実験結果

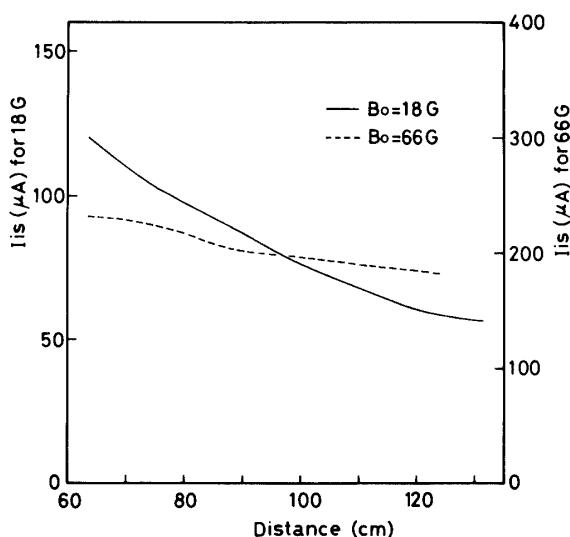
マイクロ波を印加すると、電子サイクロトロン共鳴加熱により放電が起り、プラズマが生成された。この場合、プローブに流れるイオン飽和電流  $I_{is}$  が最大で、かつノイズが最小となるようにスタブチューナーを調整した。放電の典型的な波形を第3図に示す。図にお



第3図 マイクロ波の反射波形(上の曲線)とイオン飽和電流波形(下の曲線)。  
ガス圧は  $2.5 \times 10^{-4}$  Torr で、磁場は 18 G.



第4図 イオン飽和電流の管径方向分布。ガス圧は  $2.5 \times 10^{-4}$  Torr.  $B_0$  は一様な領域の磁場。



第5図 イオン飽和電流の軸方向分布。距離はリジタノコイルの先端から測った距離。ガス圧は  $2.5 \times 10^{-4}$  Torr.

いて、上図はマイクロ波の反射波形で、下図がイオン飽和電流波形である。イオン飽和電流  $I_{is}$  はプラズマ密度  $n$  に比例するから、密度はマイクロ波の入射後急速に増加し、その後約 6 ms の間ほぼ一定に保たれている。プラズマノイズは、 $\delta n/n \approx 1\%$  であった。この時測定したプローブのラングミュア特性から、密度 =  $1.6 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 、電子温度 = 3.5 eV を得た。また浮動電位 = -5 V であった。第3図はアフターグロープラズマが存在することも示している。密度の減衰時間は約 2.6 ms で、この値はプラズマの長さを  $L$ 、アフターグロープラズマのイオン音波速度を  $C_s$  として、 $L/C_s$  にほぼ等しい。

次にプラズマ密度の管径方向分布を調べるために、プローブのイオン飽和電流の管径方向分布  $I_{is}(r)$  を測定した。第4図はその結果の一例である。この図からわかるように、 $I_{is}(r)$  は平坦分布をしており、弱い磁場の場合には管壁近くを除いて一様である。磁場を強くしてゆくと、平坦な部分が少しずつ狭くなっている。磁場 66 G でのプラズマの直径は約 24 cm になっている。一方、プラズマ密度は磁場が強くなると高くなっている。

第4図に見られるような管径方向に一様分布したプラズマが軸方向にはどんな分布をしているのかを調べるために、モータ駆動装置を用いてイオン飽和電流の軸方向分布  $I_{is}(Z)$  を測定した。第5図はその一例である。磁場を強くすると管径方向へのプラズマ損失が減少するため、 $I_{is}(Z)$  もかなり一様になることがわかる。磁場強度が 18 G の時の  $dn/ndz$  は  $(1/90) \text{cm}^{-1}$  であった。弱磁場の場合でも実験の内容によっては十分使用出来ると考えられる。

#### 4. 結論と今後の課題

本実験は開始したばかりで、ここでは予備的結果しか報告出来なかつたが、ヘリカル型リジタノコイルの使用により、静かかなり一様性の良い大直径磁化プラズマが生成されたことは結論として言える。この装置はスペースプラズマ共同利用装置の一つになるので、所内外の研究者により何かの実験に役立つことを期待している。

現在使用しているガスの圧力は  $10^{-4}$  Torr 程度であるが、今後は  $10^{-5}$  Torr 程度の低い圧力でのプラズマ生成を試みたいと考えている。また他端の磁場を強くし、ミラー型磁場配位にした時のロスコーン不安定性を調べる予定である。

#### 謝 辞

本実験に対して激励して下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] 河辺隆也, 河合良信, 坂翁介, 中村良治, 東大宇宙航空研究所報告 8 (1972) 186.
- [2] 中村良治, 中村正治, 伊藤富造, 東大宇宙航空研究所報告 13 (1977) 597.
- [3] R.L. Stenzel, W. Gekelman and N. Wild, J. Geophys. Res. 87 (1982) 111.
- [4] 中村良治, 野村雄二, R.L. Stenzel, 東大宇宙航空研究所報告 16 (1980) 1223.
- [5] G. Lisiitano, R.A. Ellis, Jr., W.M. Hooke and T.H. Stix, Rev. Sci. Instrum. 39 (1968) 295.
- [6] G. Lisiitano, M. Fontanesi and E. Sindoni, Appl. Phys. Lett. 16 (1970) 120.
- [7] Y. Kawai and K. Sakamoto, Rev. Sci. Instrum. 53 (1982) 606.
- [8] B. Lembége and A. Gonfaloni, Plasma Phys. 20 (1978) 879.