

## 超電導マグネットを用いた強磁化プラズマ発生装置

(ULMAP-FU-I) の試作

出原敏孝<sup>※</sup>、印牧知広<sup>※</sup>、八木寿郎<sup>※</sup>、石田美雄<sup>※</sup>

Experiments on the Ultra Highly Magnetized Plasma Device (ULMAP-FU-I)  
Using a Superconducting Magnet

Toshitaka IDEHARA, Tomohiro KANEMAKI, Hisao YAGI  
and Yoshio ISHIDA

The highly magnetized plasma device (ULMAP-FU-I) is set up, following our plan reported previously. The performance of the device and parameters of the generated plasma are compared with those expected in our plan.

### 1. 序 論

最近、制御熱核融合の達成のために精力的な努力が払われ、明るい見通しが与えられつつある。最終的な融合炉に到達するためのいくつかの路線の内、最も有望視されているのは炉心プラズマを強磁場によって閉じ込める方式で、実験用装置としてはトカマク装置がその代表的なものである。現段階では炉心プラズマを加熱し、着火点に到達するための研究と、炉材料および超電導磁場コイルの研究等、炉周辺の問題点の研究が並行して独立に行われている。われわれは、小規模ながらも、超電導マグネットによって発生した強磁場を実際にプラズマに印加して強磁化プラズマを発生し、将来炉心プラズマが置かれるであろう状況を実現して、そのふるまいを調べる目的で、強磁化プラズマ発生装置の製作を計画

※ 応用物理学科

した。(1)

また、プラズマ密度を小さく抑えてこの装置を作動すれば、今までにほとんど実現されていないプラズマ・パラメーターの領域、即ち、イオンのサイクロトロン周波数  $f_{ci}$  が電子プラズマ周波数  $f_{pe}$  を上まわるような領域とか、イオンの平均ラーマー半径  $r_i$  がデバイ長  $l_d$  より小さくなる領域が実現できる。このような強磁界下のプラズマに特有の新しいプラズマ・パラメーター領域におけるプラズマ物性、特にプラズマ波動の研究がこの装置で可能となる。

この装置の第三の利点は、消費電力が極めて少ない点である。常電導コイルを用いた従来の装置では、磁場の発生に大量の電力を消費した。このため、大学内での使用可能な電力を上まわり、装置の実現が不可能になる場合があった。この点、超電導コイルを用いれば、常電導コイルのほぼ十分の一の消費電力で、強磁場が発生できるので、一大学における許容電力内におさまるばかりでなく、省エネルギーの観点からも有意義であるので、将来の大型プラズマ実験装置は、この方式に切り換える必要があるように思われる。

われわれは、このような目的のために、強磁化プラズマ発生装置 (ULMAP-FU-I) を設計し、その概要を先に報告した。(1) その設計に沿って、装置を製作し最近ほぼ完成した。本報告においては、完成した装置の性能とその動作例について述べ、設計段階における目標値と比較する。2 節に試作した装置の概要を述べ、3 節に装置の性能および動作例を示し、4 節で初期の目標値との比較検討を行なう。

## 2. 装置の概要

試作した装置の概要を述べよう。図1 は先に報告した装置の本体の設計図である。図に示されているように、装置の本体は超電導マグネット、クライオスタット、プラズマ容器の三つの部分よりなり、クライオスタットとプラズマ容器はそれぞれ4 インチ油拡散ポンプによって排気されている。超電導マグネットには、外部より定電流電源によって電流が供給される。以下に、各部分の構造について詳しく述べよう。

### 2-1 超電導マグネットおよび励磁用電源

超電導マグネットは10 個のコイルに分れ、各コイルは図2 に示すように、パークライトのわくに Nb-Ti 線 (FSW-FM-1A 古河電工製 線径 0.35 mm) を巻いて製作した。隣り合うコイルは、わくの上下に設けた高さ 3 mm の突起を相手のコイルのくぼみに、

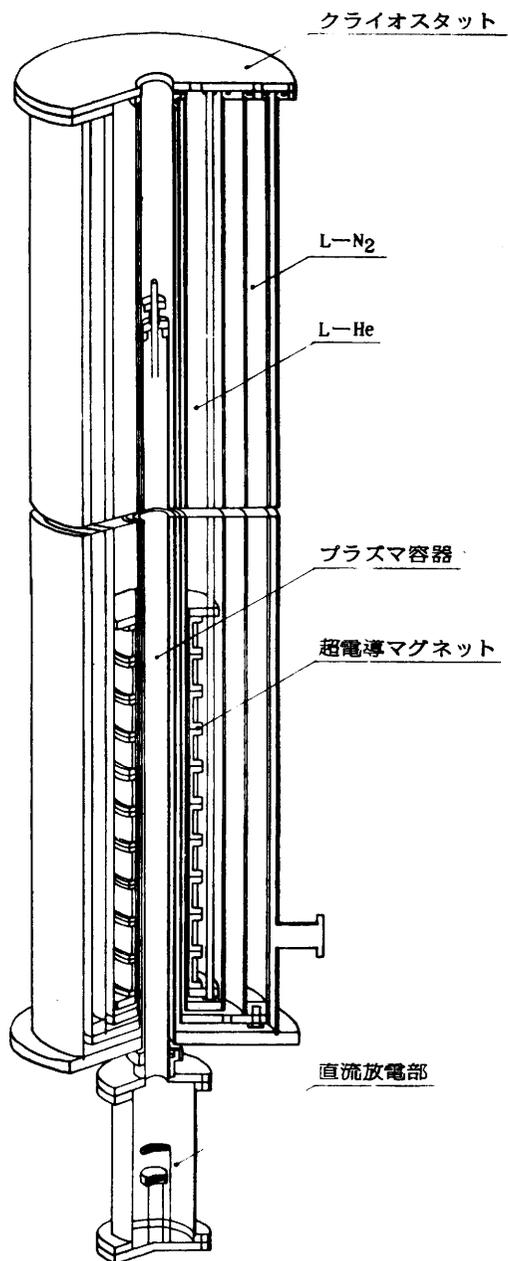


図 1 強磁化プラズマ発生装置の設計図

はめ込むことによって、固定することができる。コイルの内径は 8.8 cm 長さは 3.0 cm で、一層 77~78 ターンの 15 層よりなり、コイルの外径は 9.3 cm となっている。各コイル間にスペーサーを入れることによって、コイルの配置を変れば、発生する磁場の空間分布を任意に変えることができる。コイル間にスペーサーを入れずに、最も密接した状態で配置した場合、全長が 45 cm となる。

(写真 1) また、コイル電流の導入端子が、4 個取り付けられているので、コイルを三つのグループに分けて、各グループの電流を独立に変化することができ、このことによっても、磁場の空間分布を変えることができる。現段階では、二台の励磁用電源によって磁場を発生するので、二つのグループに分けることができる。電源はいずれも定電圧定電流電源であり、最大定格はそれぞれ 35 V 300 A および 8 V 50 A である。

## 2-2 クライオスタット

上記の超電導マグネットは、クライオスタットの L-He 層に収納され、L-He によって超電導状態にされる。L-He 層は L-N<sub>2</sub> 層と真空層によって、外界から熱シャ断されている。L-He 層は外径 7.6 cm のステンレス管と内径 16.1 cm のステンレス管に囲まれた中空の円筒型で、高さは 158 cm であり、内容積約 30 l を有する。また、L-N<sub>2</sub> 層は外径 21.6 cm のステンレス管と内径 26.1 cm のステンレス管に囲まれた、L-He 層と同じく中空の円筒型で、真空層をはさん

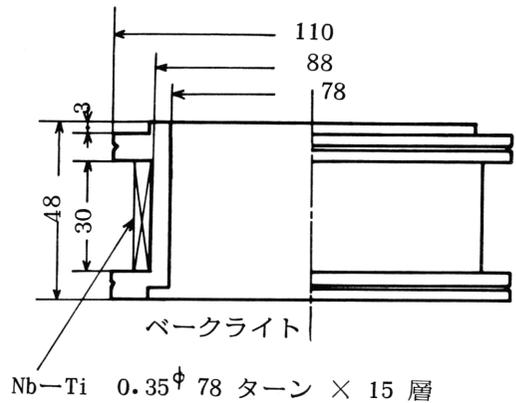


図 2 超電導コイル

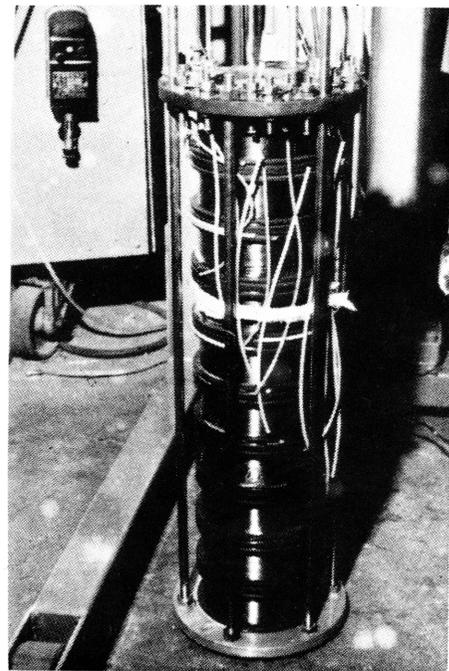


写真 1 製作した超電導  
マグネット

で、L-He 層を取り囲み、高さ 158.8 cm で、内容積がほぼ 28 l である。この層の底面には、厚さ 1.0 cm の銅板が取り付けられ、L-He 層の内側に取り付けられた外径 6.4 cm 厚さ 3.0 mm の銅管を、熱伝導によって L-N<sub>2</sub> 温度近くまで冷し、L-He 層の底面と内面を熱シャ断している。この銅管の上部には、長さ 20 cm のステンレス管が取り付けられて、外界からの熱の侵入を防いでいる。

上記の両層は、外径 5.1 cm のステンレス管と内径 28.4 cm のステンレス管で作られた高さ 161.8 cm の中空円筒型の真空容器の中に組み込まれ、周囲を 4 インチの油拡散ポンプで  $10^{-6}$  Torr 台の真空中に排気している。かくして、クライオスタットは、外径 29.0 cm 高さ 165.3 cm となり、中心に内径 4.6 cm の中空の室温部を有する。真空層は各層の上部に取りつけたフランジと外径 33.2 cm のステンレス円板の間の 7 個の O-リングによって、気密が保たれている。

ステンレス円板には、写真 2 に示すように、L-N<sub>2</sub> 層に L-N<sub>2</sub> を入れるための直径 1.0 cm の穴 6 個が設けられている。また、L-He 層に通ずる個所には、L-He を入れるためのウィルソン・シールをほどこした、内径 12 mm の穴、液面計等を入れるための同じくウィルソン・シールをほどこした内径 15 mm の穴 2 個、および気化した He の回収のための 1 インチの真空バルブとリーク・バルブが取り付けられ、電流容量 100 A の気密導入端子 4 個が設けられている。

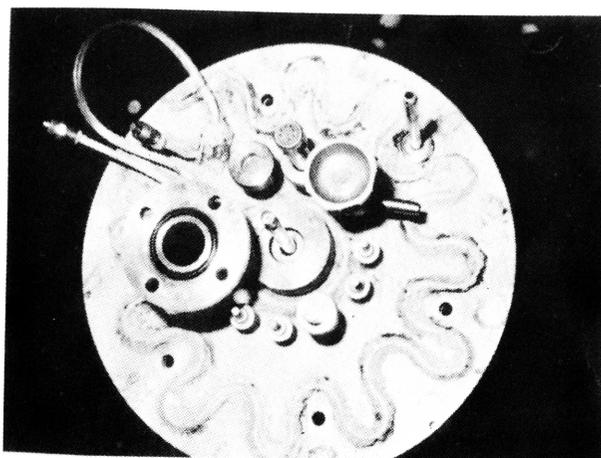


写真 2 クライオスタットの上面

### 2-3 プラズマ容器

プラズマ容器は、外径 4.3 cm 厚さ 2.0 mm 長さ 130.0 cm のステンレス管でできたプラズマ拡散部と、その下端に取りつけられた内径 9.8 cm 長さ 35.6 cm のステンレス管でできたプラズマ源とからなり、プラズマ拡散部がクライオスタットの中空室温部に入れられている。4 インチの油拡散ポンプで背圧  $10^{-6}$  Torr 台に排気される。ニードル

・バルブより、Ar または He ガスを注入し、直流放電によってプラズマを発生し、タングステン・メッシュでできた陽極より、プラズマを強磁界の領域へ拡散させる。かくして強磁化プラズマを発生させる。この領域には、外径 10 mm の同軸型プローブが入っており容器の管軸上を距離 45 cm にわたって動かすことができる。このプローブを用いて、プラズマ・パラメーターの測定およびプラズマ中の振動、波動の受信を行なうことができる。

2-4 気化した He の回収系等

L-He は本学部附属の超低温物性実験施設より供給され、気化した He はクライオスタット上面の 1 インチ・バルブより、容積 6 m<sup>3</sup> のガス・ホルダーに貯えた後、実験の進行と並行して、同施設へ返送して回収する。L-He の注入および回収を障害なく行なうため、図 3 に示すような排気系を構成した。各作業におけるバルブの開閉を表 1 に示した。

写真 3 は装置全体を組み込んで、真空排気系および He 回収系をセットしたときの様子である。

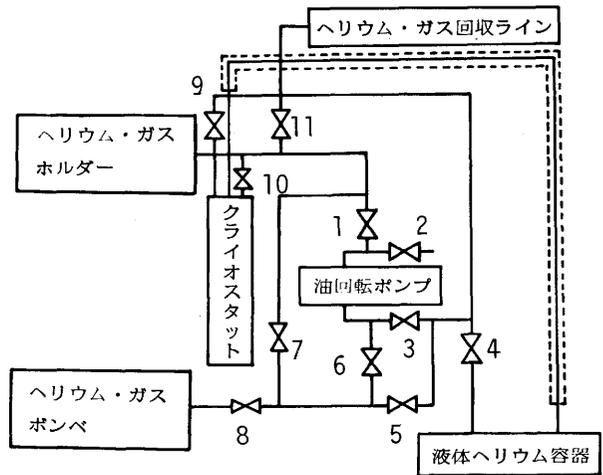


図 3 ヘリウム・ガスの回収系

表 1 ヘリウム回収系のバルブ操作

作業	バルブ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1. He ガスホルダーと回収系の排気		C	0	C	C	C	0	0	C	C	C	C
2. 予冷後のL-N <sub>2</sub> の追い出し		C	0	0	C	C	C	C	C	0	C	C
3. L-He 容器内のHeでHe層を1気圧にする		C	0	C	C	C	C	C	C	0	C	C
4. L-He の注入		C	0	C	0	C	C	C	C	C	0	0
5. L-He 容器の残留 L-He の回収		C	0	C	C	C	C	C	C	C	0	0
		0	C	0	0	C	C	C	C	C	0	0
		C	0	C	C							
6. 実験後のL-He の回収		0	C	0	C	C	C	C	C	C	0	0
										0	C	

(注：0 はバルブ開、C はバルブ閉)

### 3. 装置の性能および動作例

製作した装置の性能と動作例およびこれに対する若干の検討を以下に述べよう。

#### 3-1 クライオスタットの性能

真空層の真空度は、寒剤を注入しない状態で  $8 \sim 10 \times 10^{-6}$  Torr L-N<sub>2</sub>、L-He 両層に、L-N<sub>2</sub> を注入した状態では寒剤によるトラップの効果で  $2 \sim 7 \times 10^{-6}$  Torrとなり、L-N<sub>2</sub> 層に L-N<sub>2</sub> を、L-He 層に L-He を注入したときには、さらに真空度が良くなり、 $1 \times 10^{-6}$  Torr となる。したがって、両層への熱の侵入は壁面より熱輻射によって、侵入する部分と、クライオスタットの上面より熱伝導によって侵入する部分が重要な項となる。両者の効果によって単位時間内に侵入する熱量  $\dot{Q}$  と、この結果消費される寒剤の量を概算してみた。

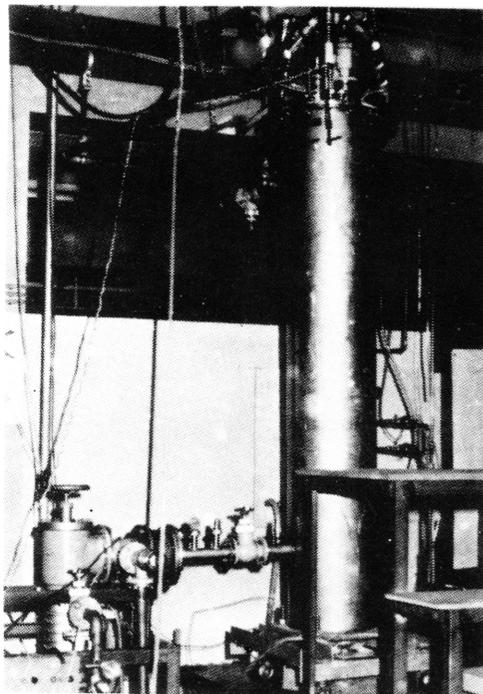


写真 3 装置の全容

熱伝導による侵入速度  $\dot{Q}_1$  は、物質の断面積  $A$  が一定の場合には、

$$\dot{Q}_1 = \frac{A}{z} \int_{T_1}^{T_2} K(T) dT = \frac{A}{z} \bar{K} (T_2 - T_1) \quad (1)$$

となる。ここで  $z$  は温度  $T_1$  と  $T_2$  の箇所間の距離  $\bar{K}$  は平均の熱伝導率を表わす。

熱輻射による侵入速度  $\dot{Q}_2$  は、シュテファン・ボルツマンの公式に従って

$$\dot{Q}_2 = C E A (T_2^4 - T_1^4) \quad (2)$$

となる。ここに、 $T_1$   $T_2$  は向いあう面の温度を表わし、 $A$  はその面積を表わす。管面の場合は、 $A$  は近似的に内側の管面の面積を表わす。 $E$  は管面の場合、次式で表わされる平均の熱放射率である。

$$\bar{E} = \frac{E_1 E_2}{E_2 + (1 - E_2) E_1 A_1/A_2} \quad (3)$$

ここで、 $E_i$ 、 $A_i$  は温度  $T_i$  の面の放射率と面積を表わす。

装置のパラメーターを代入して  $\dot{Q}$  を計算した。L-N<sub>2</sub> 層においては、ステンレス管による熱伝導とステンレス管面間の熱輻射が主要な項となる。

$$\dot{Q} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = 298/z + 6.9 \quad (\text{cal/sec}) \quad (4)$$

ここに、 $z$  は L-N<sub>2</sub> の液面からクライオスタットの上部までの距離である。

一方、L-He 層においては、ステンレス管とコイルのリード線 (Cu) の熱伝導とステンレス管面間およびステンレス管と銅管の間の熱輻射が主要な項となる。しかるに、後者  $\dot{Q}_2$  は前者  $\dot{Q}_1$  に対して無視でき、

$$\dot{Q} = 331/z \quad (\text{cal/sec}) \quad (5)$$

となる。 $z$  は L-He の液面とクライオスタットの上部との間の距離を表わす。

侵入してきたこれらの熱量が L-N<sub>2</sub> および L-He の気化熱 (それぞれ、 $38.5 \text{ cal/cm}^3$ 、 $0.62 \text{ cal/cm}^3$ ) によって奪われるとすれば、寒剤の消費速度  $S$  が計算できる。その結果は、

$$S(\text{L-N}_2) = 27.9/z + 0.6 \quad (1/h) \quad (6)$$

および

$$S(\text{L-He}) = 1920/z \quad (1/h) \quad (7)$$

となる。

以下に、L-N<sub>2</sub> 層での実験結果と比較しよう。図 4 の△印と○印は、それぞれ L-N<sub>2</sub> 層および L-He 層に注入した L-N<sub>2</sub> の液面とクライオスタットの上面との間の距離  $z$  の時間的变化を表わしている。L-N<sub>2</sub> 層においては、 $z$  の値が大きいき、すなわち、液面が下ってくると、消費速度が減少する傾向が見られる。また、L-He 層の液面が L-N<sub>2</sub>

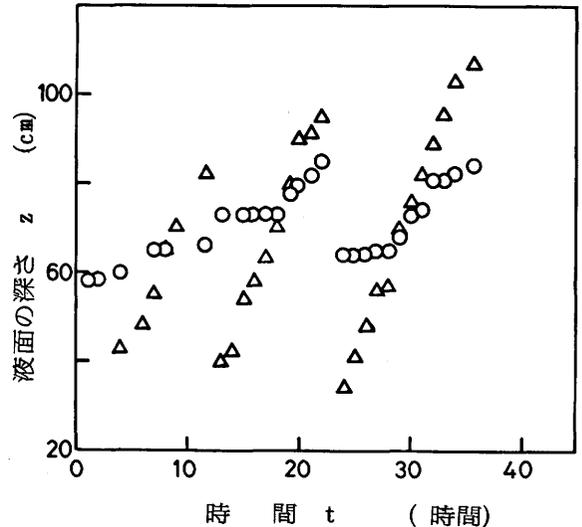


図 4 L-N<sub>2</sub> の液面の時間的变化

層の液面より下にある (○印が△印の上にある) 場合には、L-He 層での消費速度は小さいが、液面の高さが逆転すると消費速度が急に大きくなることがわかり、L-N<sub>2</sub> 層の熱シヤ断の効果が有効であることを示している。

図 5 には、図 4 の△印のデータより求めた L-N<sub>2</sub> 層での消費速度  $S$  を、液面の高さを表わすパラメーター  $z$  の関数としてプロットした。 $z$  が大きいとき (液面が下がったとき)  $S$  の値が小さくなる傾向が見られる。

実線は計算式 (6) をプロットしたもので、実験結果と定性的に一致している。

一方、L-He 層での L-He の消費速度は、計算式 (7) からわかるように、かなり大きく、 $z = 100$  cm と見積っても、 $S \sim 20$  l/h となる。実際に、L-He 層の予冷に要する消費量を加えて、30 l の L-He で約一時間の実験しかできず、今後改良の余地がある。

### 3-2 発生した磁場強度の空間分布

超電導マグネットによって、クライオスタットの管軸上に発生した磁場強度の空間分布をガウスメートルで測定した。図 6 は、10 個のコイルの内両端の 2 個づつを外し、中心の 6 個によって発生した磁場の強度  $B$  をコイルの下端からの距離  $z$  の関数として、プロットしたものである。コイル電流  $I$  に比例して  $B$  が増大している。

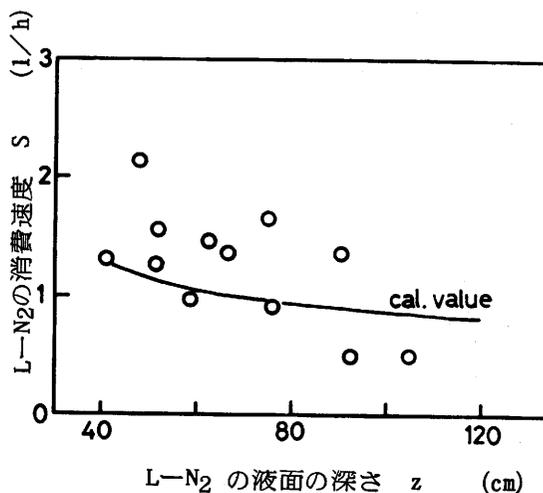


図 5 L-N<sub>2</sub> の消費速度の変化

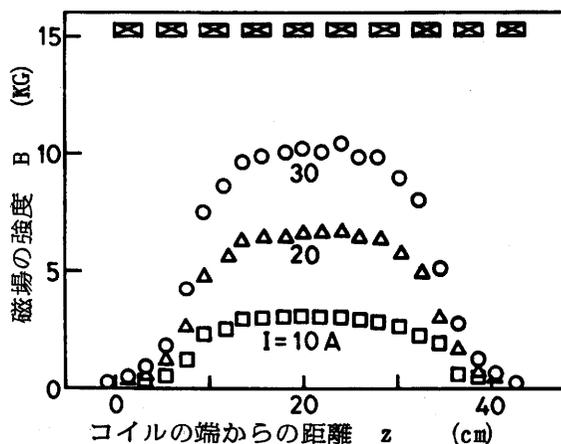


図 6 磁場強度の空間分布 (コイル 6 個)

次に、磁場強度が最大値を示す点、 $z=20$  cm の点にガウスメーターのプローブを固定して、最大磁場強度  $B_0$  の  $I$  の変化に対する変化を測定した。図 7 にその結果を示す。

$I=50$  A のとき  $B_0=17.5$  KG の値を得た。

図 8 は、下端の 2 個のコイルだけを外し 8 個のコイルで発生した磁場強度の分布を表わす。ほぼ 20 cm の距離にわたって、変動率 5% 以下の比較的一様性の良い磁場が得られた。実線は計算値を示している。点線は 10 個のコイルすべてを用いた場合に発生することが予想される磁場強度の分布の計算値である。下端の 2 個のコイルが不調であるため、このような分布は得られていない。

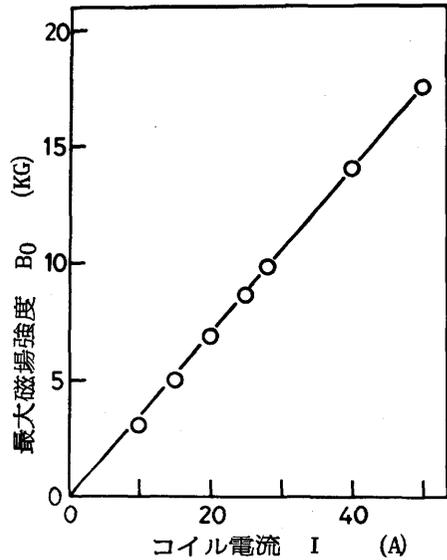


図 7 最大磁場強度のコイル電流の変化による変化

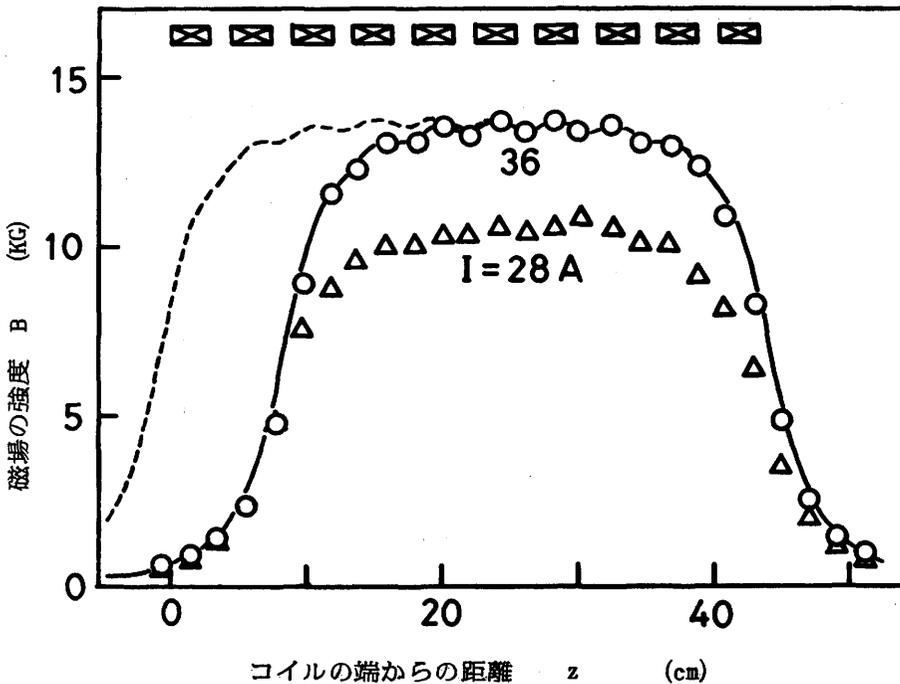


図 8 磁場強度の空間分布 (コイル 8 個の場合)

### 3-3 発生したプラズマのパラメーターおよび装置の動作例

直流放電によってプラズマを作り、これを強磁場の領域へ拡散させて、強磁化プラズマを発生させる実験を行なった。タングステン・メッシュでできた陽極が、図 8 の  $z = -10$  cm の点に置かれ、この位置からプラズマが拡散する。図 9 に、最大磁場強度  $B_0$  を示す点、即ち、 $z = 20$  cm の点でのプラズマ・パラメーター（プラズマ密度  $n$  と電子温度  $T_e$ ）を  $B_0$  の関数として、プロットした。プラズマ源の放電電流  $I_d$  を一定値に保った ( $I_d = 220$  mA このとき、放電維持電圧  $V_d$  は  $B_0$  の増加と共に 132 V から 62 V まで減少した) にもかかわらず、密度 ( $\Delta$ 印) は  $B_0$  と共に大幅に減少した。これは、磁場のミラー効果によって、プラズマが強磁界の領域へ侵入できなかつた為であると考えられる。このため、高密度プラズマを得るためには、プラズマの発生方法を検討する必要がある。われわれの所期の目的は、新しいプラズマ・パラメーターの領域を実現することであり、このためには、むしろ低密度の方が好都合である。

一方、電子温度  $T_e$  ( $\circ$ 印) は、図のように  $B_0$  の増加と共に増加した。これは、プラズマ源で発生したプラズマの内、エネルギーの高い成分のみが強磁界の領域に侵入するためであると思われる。

表 2 に、装置の動作例の一つを示す。

## 4 設計値との比較および今後の課題

(1) クライオスタットの性能は、目標値には及ばず、一回の実験可能時間が約一時間しかとれなかつた。今後、熱伝導による L-He 層への熱の侵入を押えて、実験時間を二時

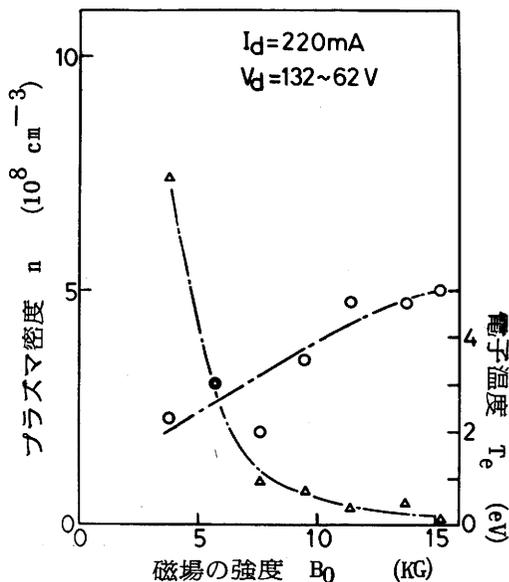


図 9 プラズマ・パラメーターの  $B_0$  の変化による変化  
 $\Delta$ 印、 $\circ$ 印はそれぞれプラズマ密度、電子温度を表わす

表 2 装置の動作例

ガス圧	$p \sim 10^{-3}$ Torr (He)
磁場強度	$B = 15.2$ KG
磁場の一様性	$< 5\%$ (20 cm)
電子サイクロトロン周波数	$f_{ce} = 42.6$ GHz
イオン・サイクロトロン周波数	$f_{ci} = 5.8$ MHz
プラズマ密度	$n = 1.1 \times 10^7$ cm $^{-3}$
電子プラズマ周波数	$f_{pe} = 30$ MHz
電子温度	$T_e = 5$ eV
イオン温度	$T_i \sim 0.1$ eV
デバイ長	$l_d = 5 \times 10^{-1}$ cm
イオンの平均ラーマー半径	$r_i = 6 \times 10^{-3}$ cm

間程度とれるように改良すべく、リード線およびステンレス管の断面積を小さくする。

(2) コイル 2 個が不調であったため、設計時のような磁場強度の一様性は得られなかった。今後、コイルを整備して、10 個のコイルによって、磁場を発生することができるようにする。最大磁場強度の設計値 31 KG は得られそうにないが、現在得られている最大磁場の値 17.5 KG のさらに、3 割程の増加が期待される。われわれの磁場は、パルス磁場ではなく定常磁場であるので、得られた磁場強度の値は常電導空心コイルでは実現が困難な値である。消費電力が極めて少ないことを考え合わせると、超電導マグネットをプラズマ発生装置に用いるわれわれの方式は、従来の方式に比べて、利点が多い。

(3) 表 2 に示した装置の動作例からわかるように、新しいプラズマ・パラメーターの領域、 $f_{ci} > f_{pe}$  なる領域は実現されていないが、イオンの平均ラーマー半径  $r_i$  がデバイ長  $l_d$  より小さくなる領域は実現されたので、この領域でのプラズマ波動の実験が可能である。

本学部附属超低温物性実験施設の立川敏明氏と古河電工 K K 中研の池田 長氏には、本装置の設計、製作にあたり、適切な御助言をいただいた。また、本学部応用物理学科 昭和 52 年度卒論生 中島 聡君、昭和 53 年度卒論生 西原嘉隆君、長谷川篤司君 には、

装置の製作および計測の点で協力を願った。ここに、付記して感謝の意を表する。

#### 参 考 文 献

- (1) 出原敏孝、八木寿郎、石田美雄： 福井大学工学部研究報告 第 26 卷  
第 1 号 昭和 53 年 3 月 PP 57～66.

