磁場中の高周波プラズマ (低域混成共鳴付近でのイオンの加熱)

石塚 浩, 大野久雄, 板倉昭慶

(教育大理)

(47年10月28日 受理)

Abstract

Plasma production was studied using a 1 KW 130 MNz electromagnetic wave, a coupling coil placed in a metal vacuum-chamber, and a uniform magnetic field. Plasma densities higher than 10^{12} cm^{-3} were obtained in helium for gas pressures above about 10^{-3} torr. The ion- and electron-temperature reached 25 eV near the magnetic field strength satisfying the condition for the occurrence of lower hybrid resonance. There the efficiency for power transfer was estimated to be several tens of percent.

§ 1. はじめに

核融合の実現には電子よりもイオンを加熱しなければならない事は論をまたない。従ってイオンの加熱は緊急かつ重要な課題である。プラズマ基礎実験の面でも、イオン温度の高いプラズマを容易に作れることは、極めて望ましい。

VHF PLASMA IN A MAGNETIC FIELD

- ION HEATING NEAR THE LOWER HYBRID RESONANCE -

Hiroshi Ishizuka, Hisao Ono and Akiyoshi Itakura

磁場中の高周波プラズマ

従来、高温電子を得て、これによりイオンを加熱することも考えられたが、イオンと電子の質量比が大きいため現実的ではない。電子ビームが低周波振動をも励起するような条件下ではイオン加熱が生じるが、プラズマが乱流的となるのは問題を含むであろう。イオンサイクロトロン共鳴加熱は、効率がよくないのが現状である。

最近注目されている方法に、低域混成共鳴を介する加熱がある。この方法の有利な点は Stix¹⁾ によって指摘され、トロマク等への適用が示唆されている。²⁾ 共鳴の accessibility は理論的に保証され、³⁾ プラズマ表面からの波の透過についての理論的、⁴⁾ 実験的研究^{2,5)} も始められた。

実際に加熱を行った実験の報告は、次のようである。

(1) Ioffe Institute⁶⁾

プラズマ：E C R H で生成。水素。

$$4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}, 5 \text{ eV}$$

磁場：ミラー。パルス。

加熱用高周波：116 MHz, 3 kW, 2 μ s

結合部：単巻コイル。直径 8 cm, 長さ 20 cm

温度上昇：($T_i + T_e$) 3倍

(2) Kurchatov Institute⁷⁾

プラズマ：E C R H で生成。水素。

$$2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}, 25 \sim 30 \text{ eV}$$

磁場：一様およびミラー。3 kG, DC。

加熱用高周波：140 MHz, 150 kW $\cdot$ 100 μ s

結合部：単巻きコイル。直径 15 cm, 長さ 20 cm。

温度上昇： $T_i \sim 100 \text{ eV}$

(3) Princeton⁸⁾

装置：Spherator

高周波：2W。平板電極で結合。

温度上昇：電子について測られた。

これらの実験で注目すべき事は、高周波がプラズマに吸収される効率が高いことで、上記の三研究においてそれぞれ、 $\sim 15\%$ 、 $\sim 70\%$ 、 $\sim 50\%$ となっている。波の吸収は、プラズマ粒子の衝突や、有限温度モードのプラズマ波への変換を通して強く起ると考えられ、波動の変換過程が検討されてい

る。⁹⁾

一方, 低域混成共鳴領域での高周波プラズマは, Schlüter^{10, 11)}らによって精力的に研究されていた。彼らは波の周波数や電力, 結合器, ガスの種類や圧力を変えて, 低域混成共鳴磁場で発振器の抵抗性負荷インピーダンスが最小になることを確めた。しかしながら, 生成されたプラズマについては, その共鳴が起るに十分な密度 ($\sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$) に達している, ということしか報告していない。

われわれは, プラズマ生成および加熱における低域混成共鳴の有望さを考え, 未だ明らかにされていない諸量や諸過程の研究を意図して予備実験を始めた。VHFプラズマにおいて, 低域混成共鳴磁場付近でのイオン温度, 電子温度の上昇や, 高率な波の吸収を見出したので, ここに報告する。

§ 2. 実験装置

実験の計画にあたって目途としたのは, まず温度の上昇が確認されるように, 低域混成共鳴によって 10 eV 以上の温度が得られる, ということである。次いでイオンのラーモア半径が数 mm 以下におさまる, という事を要求した。

実験装置の概略を第1図に示す。左右両端の十字管にはさまれた部分は, 内径 10 cm , 長さ約 140 cm の円筒状真空容器であって, 中央にある長さ 5 cm のガラス管部を除き, 肉厚 2 mm の SUS で出来ている。そこには総数 36 ケのポートがあり, 諸部品の据付けに供される。2台の油拡散ポンプによって, 容器内部は $3 \times 10^{-6} \text{ torr}$ に排気され, 実験に際しては He ガスが導入される。

Fig.1 実験装置

磁場中の高周波プラズマ

真空容器の外に14ケのコイルが配置されており、コンデンサーバンクから電流を供給されてパルス磁場を発生する。コイルのうち、両端の各2ケは巻数を変えてあり、端効果を補正して一様磁場領域を伸している。実験に關与する領域内では、磁場の不均一は1%を超えない。

コンデンサーバンクは3.3 kV 2400 μ F で、イグニトロンによって放電とクローバーとを行う。上記コイルを組合せて生じ得る最高磁場は約9 kG、磁場波形は次章第4図に見られる如くである。

高周波発振器は130 MHz, 1 kW CWの出力を持ち、外部からの制御入力によって、立上りと立下りがそれぞれ1 μ s のオン・オフ動作が可能である。負荷インピーダンスの変動が発振器に影響しないよう、波はサーキュレーターを通してから、同軸ケーブルでプラズマとの結合部に導かれる。結合部からの反射波はダミー負荷に吸収される。サーキュレーターの各出力同軸管にはピックアップループが挿入されており、高周波電力やその時間変化が、ダイオードやサーミスタで測定される。

真空容器内に高周波をフィードする結合部は、外径6 mmの銅管を、5.6 mmの平均直径に6巻した、長さ18 cmのヘリックスである。

第2図に示すように、銅管内には冷却用の水を流しつつ用いる。

Fig. 2 高周波結合部

ヘリックスは遅波回路を意味し、またその長さを使用高周波の自由空間波長に比して充分短く採ったのも、低域混成共鳴の実現を二重に保証するためのものである（文献10によれば、結合用コイルの巻数はほとんど実験結果に関係しない）。ヘリックスの両端子は、半波長の平衡線路で結ばれている。この方式は、発振器からの同軸ケーブルの内外両導体を直接ヘリックスの両端子に結んだ場合にくらべ、ガスのブレイクダウンに関して良好な結果を与えた。ヘリックスはインダクタンスを通して接地され、従ってその直流電位は容器壁の電位と同じに保たれる。同軸ケーブルとヘリックスの接続部は銅のシールド・ケースに納め、電波の洩れを極力抑えてある。

本装置において、 10^{-3} torr 台のHeガス中で高周波放電を起すには、その種子が必要であり、100V 100 μ A 程度のビームを入射する電子銃が備えられている。

生じたプラズマの温度測定には、第3図の如きグリッド型エネルギー分析器^{12,13)}が用いられた。

Fig. 3 静電型エネルギー分析器

電子ビームでテストを行った結果、エネルギー分解能はほぼ1 eVである。エネルギー分析器は、容器の軸に沿った二ヶ所に挿入されており、径方向に可動であるとともに、回転によって面の向きが磁場と平行や垂直に変えられる。荷電粒子密度は、静電プローブ、10 GHz マイクロ波、およびエネルギー分析器のデータから推定された。

尚、内径50 mmのリミターが1つ、容器内に設けられている。これは、その電位を適当にえらぶこ

磁場中の高周波プラズマ

とによってプラズマの低周波振動を最小にする目的をもつが、以下に述べる実験に際してはゼロ電位におかれた。

§ 3. 実験結果

高周波発振器をCWで動作させながら、パルス磁場をかける時刻を起点として諸測定を行った。発振器から結合部まで、同軸ケーブルで波を導いたために、その往復において電力が消費され、プラズマの無い状態でダミー負荷に入る電力は最大で700W程度であった。較正された電力計でダミー負荷に入る電力を測り、それがプラズマ無しの時に650Wになるような発振のもとでデータをとった。第4図には磁場の波形を示す。

(1) ブレークダウン

前章に述べた弱い電子ビームの入射のもとに、He ガス圧 $p \geq 1.3 \times 10^{-3}$ torr で放電を生じた。放電は容器軸付近に絞られていることが写真撮映でわかり、一定ガス圧では或る一定磁場で放電がつくこと、放電は磁場の無くなるまで持続することなどが光電子増倍管による観測で知られた。パルスごとの再現性は極めて良好であった。

以下に記す実験結果の大部分は、 2.7×10^{-3} torr のガス圧で得られたものである。

(2) イオン温度, 電子温度

エネルギー分析器のグリットの電位は, 前例¹²⁾と同様に, 電子温度 T_e を測定する際にはプラズマ電位より高く, またイオンを測定する時には低く定めた。捕集電極の電位 (retarding potential) をパラメタとして, 磁場運転でとの捕集電流の波形をシンクロスコープで測定する。捕集電流波形の例を第5図に示す。

(a)

(b)

Fig. 5 エネルギー分析器出力波形
(a) イオン捕集, (b) 電子捕集,
 $z = 90 \text{ cm}$, 横軸は Fig. 4 に同じ

その(a)はイオンを捕集した場合、(b)は電子を捕集した場合であって、各々、掃引ごとに捕集電極電位が変えられている。これらのデータを半対数目盛に整理すると、第6図の如く、直線部が得られる。この部分の勾配から温度を定めた。

イオン温度の測定に際しては、エネルギー分析器の面を磁場と平行に保った。これは、磁場に沿って流れ込む電子成分を最小にするために必要であった。⁷⁾ エネルギー分析器の面と磁場のなす角を種々変えて電子温度を測定したところ、捕集される電子電流がイオン電流より充分大きいような角度では、得られた値はほぼ一定であった。多くの場合、電子温度はエネルギー分析器の面が磁場と 30° をなすような状態で測られた。

エネルギー分析器のチェックとして、磁場無しの放電中で、静電プローブによる測定値との比較を行った。温度と電子密度 n_e について、

	プローブ	エネルギー分析器
T_e	10 eV	10~13 eV
T_i	—	1~2 eV
n_e	$5 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$	—

の結果が得られ、 T_e に関してほぼ一致を見た。

T_i の値がエネルギー分析器の分解能を示しているとするれば、電子ビームによるテストの結果を支持している。

第7図には、ヘリックス中央からの距離 $z = 90 \text{ cm}$ の磁場軸上における T_i および T_e の磁場依存性

Fig. 6 エネルギー分析器電流の半対数特性、 $z = 90 \text{ cm}$ 、軸上、
磁場：(a) 4 kG, (b) 7 kG, (c) 2 kG

を示す。

Fig. 7 プラズマ諸量の磁場依存性，
 $z = 90 \text{ cm}$ ，軸上

4 kG 付近に T_i の山があり，二十数 eV に達している。 T_e もその付近および約半分の磁場強度で高くなっている。 $z = 90 \text{ cm}$ における温度の径方向分布は第 8 図の如くである。ヘリックスに近い点 ($z = 27 \text{ cm}$) においても， T_i の最高値はほぼ 30 eV と測られ，温度の z 依存性は弱いと思われる。

磁場中の高周波プラズマ

Fig. 8 (a)

Fig. 8 (c)

Fig. 8 (b)

Fig. 8 (d)

Fig. 8 T_i および T_e の径方向分布

(3) 荷電粒子密度

10 GHz のマイクロ波の透過を $z = 4.5 \text{ cm}$ で観測した波形を第 9 図に示す。

Fig. 9 10 GHz マイクロ波の透過測定,
コンデンサーバンク充電電圧
(a) 250 V, (b) 1 kV, (c) 2 kV, (d) 3 kV,
(e) は (d) の条件でのバックグラウンド,
横軸は Fig. 4 に同じ

ここでは各掃引ごとに、磁場電源の充電電圧が変えられている。これから、1.6 kG 以上の磁場でカットオフが起きていることがわかる。カットオフは $1.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ の n_e に対応している。われ

磁場中の高周波プラズマ

われは、エネルギー分析器のイオン飽和電流 I_{si} を $\sqrt{T_i}$ で割った量が密度に比例するものとして密度の相対値を求め、カットオフ密度と併せて密度を推定した。 $I_{si}/\sqrt{T_i}$ の磁場依存性と、 $z = 90\text{ cm}$ における径方向分布とが、それぞれ第7図におよび第10図に与えられている。磁場のある時、 $z = 27\text{ cm}$ において、径方向分布の半値巾は約 2 cm と小さかったが、密度は $z = 90\text{ cm}$ と同程度であった。

(4) ヘリックスの放射効率

反射波を検波して時間変化を調べた結果を第11図に示す。

Fig. 11 ヘリックスからのVHF放射効率，
(a) 反射電力，横軸はFig. 4に同じ，
(b) 放射効率

(a)は生の波形であり，(b)は電力計で比較較正した検波特性をもとにして求めた，放射効率である。約 800 G，2 kG，4 kG に山が見られ，最大 80% の放射が見られる。(a)図内の右方弱磁場部には，電子の共鳴によると思われる強い放射があるが，(b)図においてはそれを省略してある。

(5) 概 括

第 7 図に見た如く，弱磁場の場合を除いて，約 2 kG，4 kG の磁場で共鳴の様相が現れる。これらの磁場値と，他の二つの磁場値をえらんで，プラズマ諸量と放射効率 η をまとめると表 1 の如くである。

表 1. プラズマ諸量および放射効率

	0	2 kG	4 kG	7 kG
n_e (cm^{-3})	5×10^8	1.2×10^{12}	$(2 \sim 5) \times 10^{12}$	$10^{11} \sim 10^{12}$
T_i (eV)	1 ~ 2	1 5	2 5	5 ~ 9
T_e (eV)	10 ~ 13	2 5	2 5	10 ~ 13
η (%)	5 0	8 0	7 0	4 0

実験条件：He ガス圧 = 2.7×10^{-3} torr，高周波（ダミー負荷の指示）電力 = 650 W

注：エネルギー分析器の分解能（1 eV）の補正はしていない。

§ 4. 考 察

プラズマ温度，密度の測定法に関し検討の余地は大いにあるが，ここに得られた結果は大綱において誤っていないと思われる。以下，観測された共鳴，温度の上昇，パワーバランスについて考察する。

(1) 共鳴現象

イオンと電子の関与する共鳴は一様な磁場中プラズマでは，

$$\omega = \frac{\omega_{pe} \omega_{ce}}{\sqrt{\omega_{pe}^2 \sin^2 \theta + \omega_{ce}^2}} \sqrt{\frac{m_e}{m_i} + \cos^2 \theta} \quad (1)$$

の条件で起きる。ここに θ は波の伝播方向と磁場のなす角度であり，他の記号は通常用いられる通りである。プラズマコラムの場合，その境界に沿って遅い電磁波を与えると，波はプラズマ内部に進

磁場中の高周波プラズマ

むにつれて向きを変え、伝播方向が磁場とほぼ垂直になって位相速度がゼロに近づく。これがプラズマ加熱の問題でとり上げられる低域混成共鳴であり、そこでは(1)式で $\theta = \frac{\pi}{2}$ とおいた関係が成立つ。今、 $\omega/2\pi = 130 \text{ MHz}$ でこの共鳴が起るためには、磁場 B は n_e の函数として

$n_e \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	$B \text{ (kG)}$
2×10^{12}	8.25
4×10^{12}	5.1
1×10^{13}	4.3
2×10^{13}	4.1
4×10^{13}	4.05

のようでなくてはならない。従って、 n_e の測定値が正しいとすれば、共鳴は $5 \sim 8 \text{ kG}$ に期待されるわけである。

しかし上記のことは、 n_e が磁場に沿って一様な時の話である。云い換えれば、密度勾配 ∇n_e と B とが直交する場合である。若しこの関係がなりたたず、 n_e の等高線と磁場が角 α をもつと、吸収は $\alpha = 0$ の時より低い密度で起る。 $\alpha = 0$ の時の低域混成共鳴層の密度を n_h とかけば、新たな吸収層での密度 n_0 は、

$$n_0 = n_h \left[1 + \frac{m_i}{m_e} \sin^2 \alpha \right]^{-1} \quad (2)$$

となる。²⁾ m_i/m_e は大きな数値であるから、 α が小さくとも α は大きな影響を持ち、われわれの結果をこれで説明するには、 $\alpha = 0.5 \sim 1.2^\circ$ とすればよい。この程度の値は充分あり得るものと考えられる。より大きな α での吸収を見出した報告もなされている。¹⁴⁾

約 2 kG における T_e の上昇、約 0.8 kG と 2 kG における高周波吸収の山については、 α に帰すべきか、パラメトリックないしハーモニクな現象とすべきか、まだわからない。

(2) 温度上昇

約 4 kG の磁場で T_i および T_e がほぼ同じ値をもっていることが注目される(第7図, 第8図)。その時に T_i と T_e の空間分布も一致していることは、文献7の結果と異なっている。低域混成共鳴では、電子とイオンに等しいエネルギーの運動が惹き起されるから、それらの衝突によって熱化が起るとすれば、 T_i および T_e が一致するのは理解できる。

温度上昇は、高周波結合部から 90 cm の距離までの測定点で見出され、また高周波がそこまで伝播している事も観測された。Briggs²⁾ らによれば、点源から入れられた波が共鳴層に達する磁場方向

の距離 z_h は，点源から共鳴層までの深さを x_h として，

$$z_h \sim \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} x_h \quad (3)$$

で評価される。今 $x_h \sim 1 \text{ cm}$ に対し， $z_h \sim 90 \text{ cm}$ であって，実験結果と矛盾しない。

(3) パワー・バランス

結合部ヘリックスに供給されている高周波電力は 800 W と推定される。その可成りがプラズマに入った後に吸収されるか失われるかしたことは，ヘリックスの放射効率の測定からわかる。

プラズマ粒子が磁場に沿う両極性拡散で失われるとして， 4 kG の磁場においてプラズマが持ち去るパワーを概算しよう。 1.4 m の長さに半径 2 cm のプラズマがあって，荷電粒子密度が $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ とすると，プラズマコラム内の粒子数は約 9×10^{15} ケである。 25 eV の温度， $2.7 \times 10^{-3} \text{ torr}$ で拡散時間は $1.5 \times 10^{-4} \text{ s}$ となるので，この時間で粒子が逃げるとすると，プラズマの損失パワーは 450 W となり，ヘリックスから放射された高周波電力 560 W と同じオーダーになる。従って放射電力の相当部分がプラズマに吸収されたと云えよう。

磁場無しではプラズマ粒子が容器壁に両極性拡散すると考えると，プラズマの持ち去るパワーは 12 W となって放射電力 400 W とは合わない。これは，測定出来なかったヘリックス領域で粒子密度が高く，そこでのプラズマ損失量が大きいためであろう。事実，無磁場で放電を持続させた時には，ヘリックス部の真空容器壁があたたまつた。放射の最も大きい 800 G ， 2 kG 付近でのパワーの行方はまだ把握出来ない。

プラズマ内のエネルギーを知るために反磁性測定が望ましいが，パルス磁場を用いていることと，VHF 自身でプラズマを生成しているという事情のため実行できなかった。

§ 5. む す び

一様磁場内において，VHF 帯の高周波によるプラズマ生成を実験的に調べた。高周波はヘリックスにより注入され， 10^{-3} torr 台の He ガス中で， 10^{12} cm^{-3} を超える密度のプラズマが得られた。 1 kW の高周波電力の数％がヘリックスから放射され，低域混成共鳴に対応する磁場付近でイオンの温度が最もあがり， 25 eV に達した。電子温度はその磁場ではイオン温度にほぼ等しく約半分の磁場にもピークを持った。これらの温度は磁場に沿ってあまり変わらず，径方向にゆるやかな山が見られた。

今後，定常磁場を用いた実験が，種々のパラメータを変えつつ，また測定のクロスチェックを行いつつ，なされる予定である。ここに述べた予備的実験の結果は，特に低域混成共鳴におけるプラズマ生

成，イオンの加熱に望みを抱かせるものである。

最後に，有益な御教示をいただいた小島昌治教授，および同研究室の皆様へ感謝します。

文 献

- 1) T.H.Stix: Phys. Rev. Letters 15 (1965) 878
- 2) R.J.Briggs and R.R.Parker: Phys. Rev. Letters 29 (1972) 852
- 3) T.H.Stix: The Theory of Plasma Waves (McGraw Hill, N.Y., 1962)
- 4) V.E.Golant: Soviet Physics-Technical Physics 16 (1972) 1980
- 5) W.M.Hooke and S.Bernabei: Phys. Rev. Letters 28 (1972) 407
- 6) B.V.Galaktionov et al: Soviet Physics-Technical Physics 15 (1971) 1809
- 7) V.M.Glagolev et al: Wisconsin Conf. IAEA/CN-28/L6 (1971)
- 8) 核融合研究委員会資料 (吉川庄一氏講演ノート) 昭47.8.8.
- 9) V.M.Glagolev: Plasma Physics 14 (1972) 301, 315
- 10) H.Schlüter and C.J.Ransom: Ann. Phys. (N.Y.) 33 (1965) 360
- 11) C.R.Skipping et al: Phys. Fluids 12 (1969) 1886
- 12) H.Ikezi et al: Phys. Rev. Letters 22 (1969) 923
- 13) S.A.Andersen et al: Phys. Fluids 14 (1971) 728
- 14) B.V.Galaktionov et al: Soviet Physics-Technical Physics 15 (1971) 1813