ミラー磁場内でのマイクロ波による電子の加速^{*)}

名大プラズマ研 本沢忠夫、田中茂利^{**)}

池地弘行、高山一男

(1965年3月20日受理)

§1 はじめに

プラズマ研究所の基礎実験部門では現在、大電力のマイクロ波によりテスト・プラズマ(TP)をつくって諸々の現象を調べるためにTPMと称する装置を建設中であるが、これから述べようとすることは、そのために今迄行ってきた予備実験でえられた成果の報告である。

この実験ではプラズマの代りに電子銃でつくり出された電子流を使い、ミラー磁場中での電子とマイクロ波との相互作用について情報をえることを目的としている。具体的には、空洞共振器内に外部コイルでミラー磁場をつくっておき、その中へ電子流を打ち込んだとき、共振器中に注入されたマイクロ波がその電子の加速にどう効いてくるかを調べた。

その実験で使った装置とか、その方法、結果などについてももう少し詳しく次節以下で述べることにする。

§2 装置と実験方法

この実験で使った装置の概略は第1図に示したようなものである。

*) Acceleration of Electrons by the Field of a Microwave
in a Magnetic Mirror Field

**) Tadao HONZAWA, Shigetoshi TANAKA, Hiroyuki IKEZI and
Kazuo TAKAYAMA

(Institute of Plasma Physics, Nagoya University)

(第1図) 装置の概略図

内径 $15\text{ cm}\phi$ 、外径約 $60\text{ cm}\phi$ 、長さ 5.5 cm の5つの部分からなる空心コイルブロック I、II によって軸対称の磁場をつくる（以下ではこの中心軸を z 軸とよぶ）。この磁場の形はコイルの分割部分の取捨選択によって色々に変えうるが、ここでは主にコイル 6 及び 7 を捨ててえられる磁場 ($MF-16.6\text{ A}$) とコイル 4 及び 5 を捨ててえられる磁場 ($MF-16.6\text{ B}$) を採用した。夫々を第2図に示す。

磁場の強さについては、直流電源の能力として最大 400 A の電流をコイルに流しうるので、全部のコイルを採用したときは最大磁場にして 5000 gauss 余り、一方のコイル・ブロックを使ったときでも 4000 gauss 近くの磁場をつくることことができる。

2つのコイル・ブロックを使ったときできるミラー磁場の領域に円筒型空洞共振器が設置してある。その大きさは径 $13\text{ cm}\phi$ 、長さ 25 cm 程度である。筒の両方の蓋には中心に径 $1.5\text{ cm}\phi$ の穴があけてある。これを通して共振器内のガスがひかれ、電子流がその中に打ち込まれる。また胴体の中央部の横腹にあけた穴からマイクロ波がその中に注入される。マイクロ波の周波数は 9370 Mc/s 、即ち 3 cm 程度の波長であり、そして TE mode である。マイクロ波の波長に較べて共振器は可成り大きいから、その内部ではきれいな定在波はたちにくく電場の強さはむしろ

ミラー磁場内でのマイクロ波による電子の加速

(第2図)

2種類の磁場
(MF-No. 6A
とB)

ミラー比Rは

$$\begin{cases} R_{\max} = 1.68 \\ R_{\min} = 1.25 \end{cases}$$

I_B : コイル電流

ろ一様に近いと考えられる。

マイクロ波はマグネトロン発振器によってパルス的に作り出される。その発振器はパルスのピークのところで最大出力 40 KW、duty 10^{-3} の能力をもつ。パルスの幅としては 1, 2, 3.5 μsec の中いずれかを撰べるようになっている。パルスの繰り返し数も 200~1000 cps の範囲で変えられる。

電子流は円筒型共振器の一方の蓋の前面の z 軸上に設置された電子銃^{*)}によって打ち出される。その銃は傍熱型の酸化物陰極と加速用の陽極のほかに電流を制御するための電極及びビームの広がり調節するための電極を備えている。加速電圧としては 2.2 KVまで上げて使うべきものであるが、この実験では、エネルギーが低い程マイクロ波の影響を受け易いということを考慮して、主に 200~300 Vで使用した。そのような状態では打ち出し電流は 100 μA 以下である。陽極の打ち出し穴の口径は 0.5 cm ϕ である。ビームの広がりは無磁場の状態で $\pm 10^\circ$ 程度、勿論磁場をかければ充分しぼれる。

*) この電子銃は進行波管用のもの。東芝中研の相浦氏のご好意による。

電子流の測定は、共振器に対して銃と対称的な位置におかれた Faraday cup を使って行った。その cup は 3 枚の Mo メッシュとコレクターから成る構造をしており、電子のエネルギーの撰別が可能である。コレクターに集った電流は直流的には電流計や X-Y レコーダで、またパルスの際にはオシロスコープで測定される。

真空ポンプとして $4''$ のもの 2 つを用いているので共振器の両側で 1×10^{-6} torr の高真空がえられる。共振器内のガス圧を変える実験においては、電子銃側のポンプを働かせたままにして高真空に保ち、測定器側のポンプを止め、必要に応じてこちらからガスを入れるようにした。しかしその実験においても電子と残留ガスとの衝突に対する平均自由行路が共振器の大きさに較べて小さくならない範囲にとどめた。

§ 3 実験の結果

ミラー磁場内でのマイクロ波による電子の加速

z 軸上の電子銃により磁場に平行に打ち込まれた電子流のエネルギー分布を Faraday cup を使って調べてみると適当な条件の下では例えば第3図に示したようなエネルギー分布がえられる。これからマイクロ波によって電子が可成り加速されていることがわかる。

では、その加速のおこり方が色々な条件でどう変わるかを次にみてみよう。

(1) 加速がおこるための磁場

加速が多少とも観測されたときの磁場の形は必ずミラー型になっている。しかも第2図に示したような左右非対称のミラー磁場の方が対称的なミラー磁場の場合より加速は顕著であった。

次に加速がおこるときのサイクロトロン共鳴帯 ($\omega = \omega_{ce}$) の位置についてみると、それは磁場の形に応じて変るが、いずれにおいても $\partial B / \partial z$ が小さい山の附近にくるとき加速がおきやすい。このことは第2図と第4図との比較から云える。

(第4図) コイルの電流を変えた
ときのコレクター電流の
変化

実験条件: 磁場 MF-16 A

ガス圧 $p \sim 10^{-6}$ torr

$W_{inj} = 300$ eV

マイクロ波

パルス波高 2 K V

パルス幅 $2 \mu s$

繰返し 500 cps

(2) マイクロ波のパルス波高及びパルス幅との関係

パルス波高：マイクロ波のパルス波高を増加させていくと第5図のように0～1.1 KVではエネルギー分布の変化は殆んどみられないが、1.1 KV辺りから高エネルギー電子が現われだしてパルス波高の増加と共にエネルギー分布の傾斜が段々ゆるやかになってくる。

パルス幅：パルスの幅を変えればマイクロ波の電力の時間平均値は変るから、加速のおこり方にも差が現われる。実際、第6図に示した如くパルス幅が3.5 μs と1 μs とでは高エネルギー電子の量において1桁近くの差が観測された。

(第5図) マイクロ波のパルス波高と電子のエネルギー分布

実験条件：磁場 MF-16.6 B

ガス圧 $p \sim 10^{-6}$ torr

$W_{inj} = 300$ eV

マイクロ波、パルス幅 2 μs

繰り返し 500 cps

ミラー磁場内でのマイクロ波による電子の加速

(第6図) マイクロ波のパルス幅と電子のエネルギー分布

実験条件: 磁場 MF-16 A

ガス圧 $p \sim 10^{-6}$ torr

入射エネルギー $W_{inj} = 300$ eV

マイクロ波、パルス波高 1.7 KV、繰返し 500 cps

(3) ガス圧とエネルギー分布との関係

ガス圧は電子の捕捉時間 τ にえいきょうするので加速能率に効くことが期待されるが、 $P = 6 \times 10^{-7} \sim 1.2 \times 10^{-5}$ torr の範囲では顕著な効果はまだ観測されなかった。これは恐らく加速がおこる時間 Δt (=パルス幅) がガス圧のえいきょうをうけているにもかかわらず依然として τ に較べて可成り短いためであろう。ガス圧の効果が現われるためには $\Delta t \geq \tau$ となる必要がある。

§ 4 結果の解釈

前節で述べたように、マイクロ波による電子の加速は磁場の形をミラー型にしたときに限って観測される。このことは、加速がおこるためには電子が可成りの時間、加速領域内に捕捉されることが必要であることを意味している。この節ではその加速がどんな状態で、どんな割合でおこるものかを考えてみたい。

マイクロ波による加速の割合を知るには電子流のエネルギー分布を測定してやればよいが、実際にその分布の時間的な変化まで測ろうとすると色々な困難が伴うので、ここではミラー磁場内の電子ガスを定常状態に保ったときえられるエネルギー分布だけに着目する。

電子のエネルギー W の増す割合を

$$\frac{dW}{dt} = \alpha W \quad \text{即ち} \quad W(t) = W_0 \exp(\alpha t) \quad (4.1)$$

と表わし、 $q(W)$ を単位時間内に $W \sim W + dW$ の電子が供給される数とすれば、定常状態にある捕捉電子の微分エネルギー分布函数 $f(W)$ は

$$\frac{\partial}{\partial W} \{ \alpha W f(W) \} + \frac{f(W)}{\tau} = q(W) \quad (4.2)$$

なる方程式を解いてえられる。ここで τ は電子の寿命である。この式を $q(W > W_0) = 0$ とし、 $W > W_0$ について解けば

$$f(W) = K/W^r \quad (4.3)$$

但し

$$r = 1 + 1/\alpha \tau \quad (4.4)$$

$$K = \frac{1}{\alpha} \int_0^{W_0} q(x) x^{1/\alpha \tau} dx = \text{const}$$

である。

ミラー磁場内でのマイクロ波による電子の加速

例えば第3図に示した典型的なエネルギー分布に対して(4.3)、(4.4)式を適用してみると

$$\gamma = 1.86 \quad \text{又は} \quad \alpha \tau = 1.16$$

となる。しかるに、この場合の実験条件 ($p \sim 10^{-6}$ torr) の下では $\tau \simeq 200 \mu \text{sec}$ となる。¹⁾ よって

$$\alpha \simeq 5 \times 10^3 \text{ sec}^{-1} \quad (4.5)$$

となる。これは言い換えれば $\langle dW/dt \rangle \simeq 1.5 \times 10^6 \text{ eV/sec}$ となり、したがって電子が捕捉されている間にえるエネルギーの平均値は

$$\langle \Delta W \rangle \simeq \langle dW/dt \rangle \tau \simeq 300 \text{ eV} \quad (4.5')$$

となる。しかし以上の議論では時間的に平均化された電力のマイクロ波が連続的に注入されるということを仮定しているが、実際にはマイクロ波は時間幅 Δt でパルス的に注入される。したがって電子はその時間内に $\langle \Delta W \rangle$ だけのエネルギーをえてしまうはずであるから実験の電子のエネルギー増加率は

$$\frac{dW}{dt} \simeq \frac{\tau}{\Delta t} \langle \frac{dW}{dt} \rangle \simeq 10^8 \text{ eV/sec}$$

となる。

次にマイクロ波が空洞共振器内につくる電場 E_μ はそのパルス波高に比例すると考えて、 E_μ と α との関係を見てみよう。第5図にもとづいて色々なマイクロ波のパルス波高の夫々に対応する α を(4.3)、(4.4)を使って求めてみると第7図のようになる。

(第7図) E_μ と α との関係
各曲線は $\alpha \propto E_\mu^n$ (n : 整数) として、各々がパルス波高 20 KV において測定点 P を通過するように比例定数を定めてひいたもの。

この図からマイクロ波の電場 E_{μ} を用いて α は

$$\alpha \propto E_{\mu}^2 \quad (4.6)$$

のように表わされることがわかる。

ではマイクロ波のパルス幅 Δt によって高エネルギー電子の数や加速の能率 α がどう変るであろうか。これを第6図をもとに調べてみる。まず高エネルギー電子の数 $F(W > W_0)$ とパルス幅との関係を、例えば $W_0 = 350 \text{ eV}$ として図示すれば第8図のようになる。これと同様の図が $W_0 = 400 \sim 1000 \text{ eV}$ としたときにもえられる。両者の間の関係を式で表わせば

$$F(W > W_0) \sim A(\Delta t - T_0) \quad (4.7)$$

となる。ここで T_0 は時間の次元をもつ一定値で $0.6 \sim 0.8 \mu \text{ sec}$ 程度である。また係数 A は W_0 と I_B とを指定すればきまる。

次に加速の能率 α へのえいきょうをみると第9図のようになる。 α は Δt が増すと共に増大するが、 Δt が或る程度大きくなると或る飽和値 $\alpha(\infty)$ に近づくようになる。これを式で表わせば

(第8図) Δt と F との関係

ミラー磁場内でのマイクロ波による電子の加速

(第9図) Δt と α との関係

$$\alpha = \alpha(\infty) \left[1 - \exp\left(-\Delta t / T_0^*\right) \right] \quad (4.8)$$

とかける。ここで T_0^* は時間の次元をもった一定値であり、 I_B によって多少変るが、例えば $I_B = 264 \text{ A}$ では $0.8 \mu\text{sec}$ 程度の値になる。 T_0^* の値が先に求めた T_0 の値と同程度の大きさになることは興味深いが、両者が何を意味するかは今のところ明確でない。

最後に、 α が I_B にどう依存しているか、即ち電子サイクロトン共鳴帯がミラー磁場上のどの位置にきたときに電子の加速が能率よくおこるかを考えてみる。このことはミラー磁場内でマイクロ波によっておこされる電子の加速の機構を調べる上で有益な情報を与えてくれるであろう。第6図のパルス幅 $3.5 \mu\text{sec}$ の場合のデータにもとづいて解析してみると、 I_B の函数としての α の値は第10図のようになる。この図から3つの領域(i) $I_B = 262 \pm 5 \text{ A}$ 、(ii) $278 \pm 5 \text{ A}$ 、(iii) $305 \pm 8 \text{ A}$ において、しかもこの順に電子の加速が能率よくおこっていることがわかる。ところで第10図に附記した番号① … ⑦に対応したサイクロトン共鳴帯の位置をみると第11図のようになっている。

$\alpha (\times 10^3 \text{ sec}^{-1})$

(第 10 図) I_B と α との関係

(第 11 図) 電子サイクロトロン共鳴帯のミラー磁場 (MF- $\lambda/6$ A) 上の位置

③: 電子銃の位置に共鳴帯がくる。

ミラー磁場内でのマイクロ波による電子の加速

共鳴帯が①の位置、即ちミラー磁場の山の頂にあるときには入射電子の大部分はそこではね返されて共振器中に入ることなく電子銃の方へ戻って行ってしまいます。これが第4図に示した I_0/I_{inj} の減少の原因である(この場合には I_0 だけでなく I_{inj} にも急激な減少がみられる)。②の位置に共鳴帯がくると、この場合はね返しもおこるが、磁場の変化がゆるいので共鳴帯は幅広く、電子とマイクロ波との相互作用がおこりやすくなる。ところが、⑥に向っては磁場の変化が段々きつくなるので共鳴帯の幅が狭くなり、加速能率も徐々に下がっていく。他方③と⑤のところで α が急減している。③の場合はちょうど電子銃の口の位置が共鳴帯に一致している。このため共振器からもれ出した一部のマイクロ波が銃から飛び出ようとしている電子の進路を妨げていることが考えられる。このことが恐らく α の値を下げているのであろう。⑤の場合は今のところ不明である。

§ 5 結 び

実験のやり方としては、ミラー磁場領域に設置された空洞共振器中に z 軸上の電子銃から 300 eV 程度の電子流を打ち込んで、それをマイクロ波 (TE mode) の電場でゆすって加速をおこさせ、出てくる電子のエネルギー分析をするという単純なものであるが、この実験から定性的ではあるが、ミラー磁場内でのマイクロ波と電子の相互作用について可成りのことが知れた。

- (i) マイクロ波による加速の能率が異常に大きいこと、例えば 40 MW の電力のマイクロ波では $dW/dt \sim 10^8$ eV/sec にもなりうる。
- (ii) 加速の能率がマイクロ波がつくる電場 E_μ の 2 乗に比例しているらしいこと。
- (iii) マイクロ波のパルス幅を広くすると、高エネルギーの電子の数は急激に増すが、加速の能率は或る程度増したら、それより先は飽和してしまうこと。
- (iv) 加速の能率はミラー磁場の強さの勾配がゆるいところにサイクロトロン共鳴帯がきたときにより大きいこと等々。

以上のことを定量的に調べるには、パルス的なマイクロ波を使ったのでは色々な点でむずかしい問題がでてくるので、近い将来には連続的 (cW) なマイクロ波を使って実験する予定である。その際は、空洞共振器の方もマイクロ波の mode がはっきりするように作りかえるつもりである。また測定器としては、現在は軸方向に流れ出る電子流を測る Faraday cup だけであるが、今後は、磁場に垂直な方向に拡散してくる電子を測る cup, また打ち込みの電子流強度を

本 沢 ・ 田 中 ・ 池 地 ・ 高 山

可成り増した時やガスを入れてプラズマをつくった時に共振器内の電子ガスやプラズマから放射されるマイクロ波や軟X線を測るための測定器も取り付けの予定である。こうして、ゆくゆくはマイクロ波によるプラズマの加熱に伴って現われる不安定性、電子流とプラズマとの相互作用などを調べることを考えている。

上に述べた実験を行うにあたって色々とお助力いただいた細川稔氏に対して、ここで改めて謝意を表しておきたい。

参 考 文 献

- 1) 本 沢 : 核融合研究 12 (1964), 4, p 285 .