

# 相対論的大電流電子ビーム とプラズマの相互作用

岡村 良・中村 幸男・河島 信樹

**Abstract :** An experiment is performed to study the interaction of a short pulse width high intensity relativistic electron beam (500 kV, 2kA, 3ns) with a magnetized plasma. With the injection of the beam into the plasma column, the thermal energy of plasma nkT sharply increases and, simultaneously, strong X-ray emission from the wall and microwave emission from the plasma at electron cyclotron harmonics ( $n \cdot f_{ce}$ ,  $n = 2, 3, 4 \dots$ ) are observed. This microwave emission lasts more than several hundreds of microseconds after the termination of the relativistic electron beam. Another type of microwave emission is also observed in this experiment.

## 1. 緒 言

相対論的大電流電子ビーム (REB) は, その高エネルギー密度, 大電力という特色の為, 核融合, レーザー, 粒子源, マイクロ波源, 加速器等, 広い範囲にわたって応用の可能性を持っている. その発生装置は, 1960年代後半から開発され, 現在では, 電子エネルギー12MeV, ビーム電流1.6MA, ビーム全エネルギー2.9MJという大型装置 (aurora) が出現するに致っている. REB を用いた実験も様々な分野において行なわれつつあるが, その中で, プラズマと REB の相互作用を調べる実験は, i) スペースにおける高速電子ビームとプラズマの相互作用 (太陽フレアにおける III 型バーストにみられる電磁波輻射等) ii) 核融合におけるプラズマの加熱 [1] 及び閉じ込めの問題, 等との関連において非常に興味深いものである.

我々は, 相対論的大電流電子ビーム発生装置として, Febetron(600kV max. 10kA max. パルス巾 $\sim$ 3 nsec) を用い, REB とプラズマの相互作用を調べる実験を行なって来た [2]. この装置は, ビーム電流のパルス巾が約3 nsec と, 他の通常の REB 発生装置のそれに比べて約一桁以上短いため, もっと長い時間スケールにおける現象を切り離して実験を行うことができるという特色をもっている. 例えば, 我々の実験条件においては, ビームのパルス巾程度の時間内のイオンの運動が無視できる為, それが関与する不安定性 (ion acoustic instability 等) を排除して考えることができる. 以下, 相対論的大電流電子ビームをプラズマ中に入射した際の, i) REB のプラズマ中での伝播, ii) REB によるプラズマの熱エネルギーの変化, 等についての実験結果を報告する.

## 2. 装置及び実験

実験装置の概略を Fig. 1 に示した. ルビーのジャイアント・パルス・レーザー (300MW max,

パルス巾 $\sim 20$ ns)を真空容器内のポリエチレン・シートに照射しプラズマを生成し、磁場中を拡散させる。プラズマは、レーザーをファイアー後約 $30\mu\text{s}$ で真空容器全体に拡散する。このときのプラズマ密度は、最大 $2 \times 10^{13}/\text{cc}$ 程度であり、プラズマカラムの直径は約6cmである。なおプラズマの密度測定は、100GHzのマイクロ波の干渉により行なった。外部磁場は軸方向にはほぼ一様であり、その強さは、最大1.6kGaussである。真空容器には、内径10cmのシンチュー容器を用いた。真空部軸方向の長さは、約1.2mである。

レーザーをファイアーした後、種々のタイミングに、軸方向左方より電子ビームを入射し測定を行なった。測定は、主として、i) Faraday cup, Magnetic loop X-ray detectorによる電子ビームの伝播の測定, ii) Diamagnetic loopによるプラズマの熱エネルギーの増加の測定, iii) プラズマからのマイクロ波のエミッションの測定 ( $f = 1\text{GHz} \sim 10\text{GHz}$ )を行なった。Faraday cupは、納90個の小さなFaraday cupを同心円状に並べたものでありビームの径方向の分布が測定できるようになっている。Magnetic loopは、静電的にシールドした1巻のループであり、ビームのつくる磁場の変化 ( $dB/dt$ )を測定するものである。Diamagnetic loopは、静電シールドした10巻コイルで、プラズマの反磁性信号により、磁場と垂直方向の熱エネルギーの変化 [ $\Delta(nkT_{\perp})$ ]を測定する。又、装置図に示したように、真空容器には、内径10cmの窓があり、そこからマイクロ波の測定を行なった。

相対論的電子ビーム源として用いたFebetronは、電圧600kVmax, 電流10kVmax, 電流のパルス巾約3nsec(半値巾)という電源特性を有するものであり、15段のMarx generatorにより昇圧した電圧を、パルス巾を短くした後、ダイオード部に加えている (Fig.2参照)。カソードにはステンレスを、又、アノードにはチタニウムの $10\mu\text{m}$ 又は $20\mu\text{m}$ のfoilを用いた。カソード・アノード間に数百kVの電圧が加えられることによりField emissionが起こり、電子ビームが、チタニウム・フォイルを通して真空容器内に入射される。Fig.3に、ダイオード部での電圧波形及びビームの電流波形を示す。横軸はすべて10ns/divである。(a)

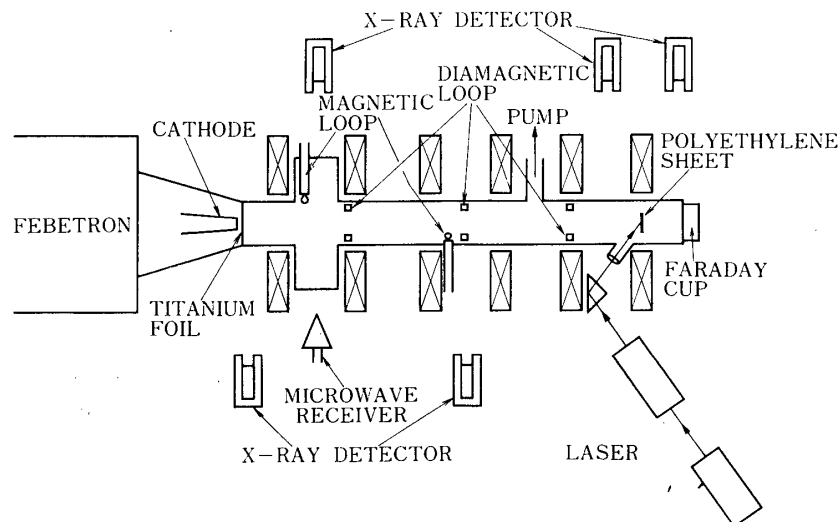


Fig.1 Schematic layout of the experiment

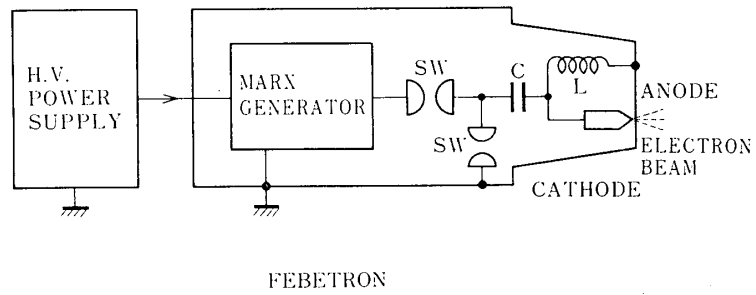


Fig.2 Relativistic electron accelerator system

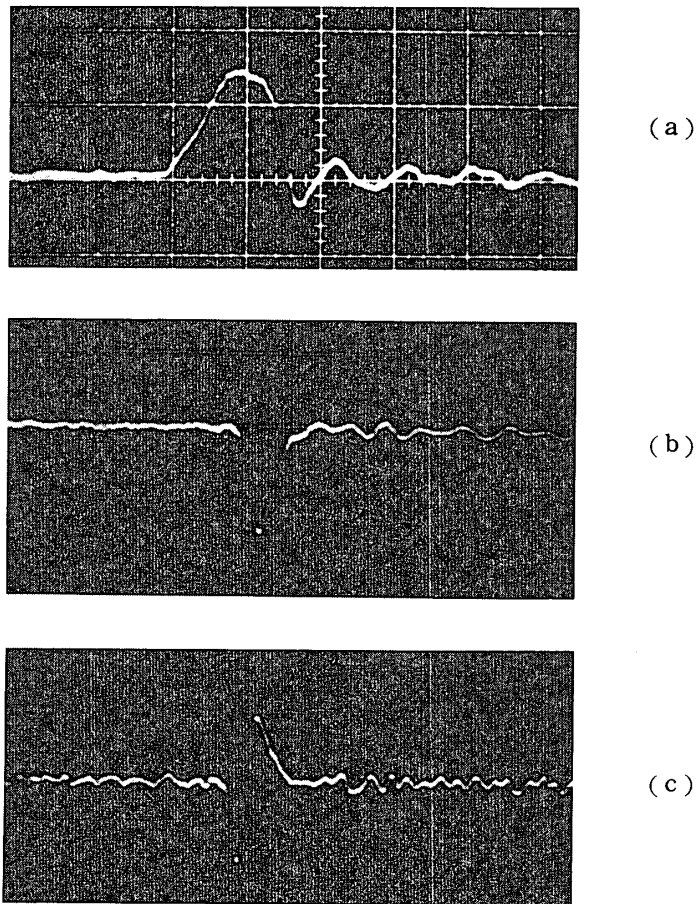


Fig.3 Oscilloscope traces of relativistic electron beam

- (a) Voltage measured by capacitive divider; 10ns/div
- (b) Current measured by Faraday cup; 10ns/div
- (c) Time derivative of the magnetic field produced by the relativistic electron beam in vacuum; 10ns/div

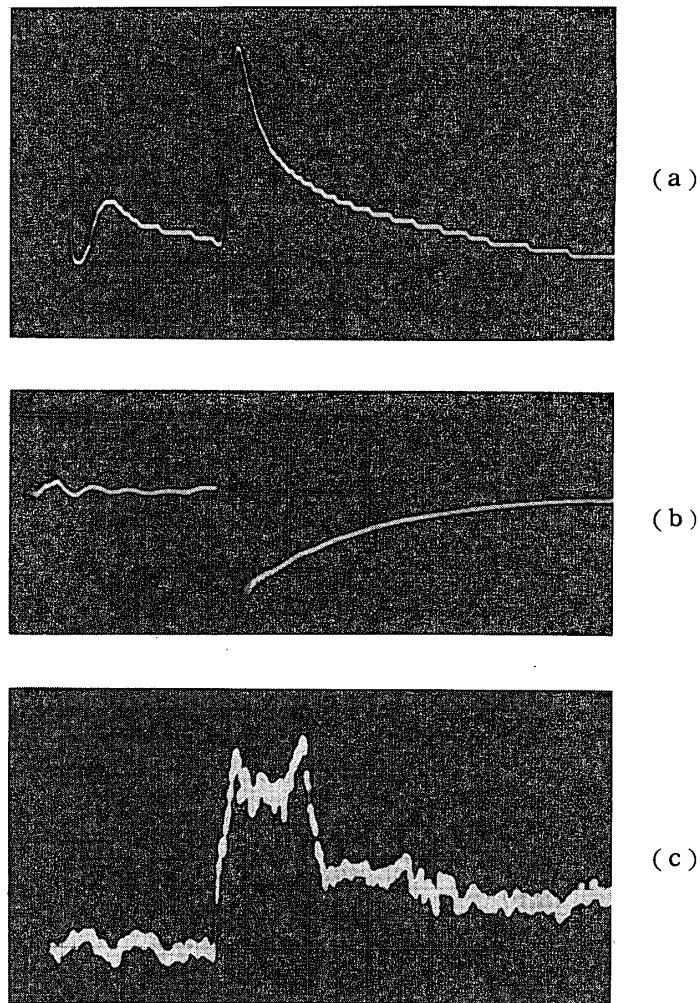


Fig.4 (a) Diamagnetic signal measuring  $nkT_e S$  of plasma;  $12.5\mu\text{s}/\text{div}$ ,  $1 \times 10^{15} \text{ eV}/\text{cm}/\text{div}$   
 (b) X-ray emission from the wall;  $10\mu\text{s}/\text{div}$   
 (c) Microwave emission from the plasma at  $f=5\text{GHz}$ ;  $10\mu\text{s}/\text{div}$ ,  $10\text{dB}/\text{div}$

は、容量分割による電圧を示し、ピークが約 500 kV に相当する。(b) は Faraday cup により測定した電流波形で、半値巾は約 3 nsec である。又、(c) は、電子ビームを真空中に入射した場合の Magnetic loop の Signal であり、これは、ビームの電流波形 (b) の微分波形に相当する。我々の実験の場合、真空中でのビーム電流及びビームの直径は、それぞれ、約 2 kA, 3 cm 程度であった。

プラズマ中に相対論的電子ビームを入射すると、プラズマの反磁性信号の急激な増加が起こり [Fig 4 (a)], 同時に, hard X-ray [Fig 4 (b)] 及びマイクロ波のエミッション [Fig.4 (c)] が観測される。Fig. 4 は、レーザーをファイアーして約  $28\mu\text{s}$  後にビームを入射した場合の波形の一例であり、そのタイミングに対応して、それぞれ急激な変化が現れて

いる。100 GHz のマイクロ波の干渉により、電子ビーム入射によるプラズマの密度変化を測定したところ、急激な密度の増加は観測されなかった。従って、プラズマの反磁性信号の増加  $[\Delta W_{\perp} \cdot S \equiv \Delta(nkT_{\perp}) \cdot S]$  は、ビーム入射によるプラズマの温度上昇によるものだと考えられる。ただし、 $n$ 、 $T_{\perp}$ 、 $S$  は、それぞれ、プラズマ密度、磁場に垂直方向の温度、及び、プラズマカメラの断面積である。我々の実験におけるプラズマの熱エネルギーの増加  $[\Delta(nkT_{\perp})]$  は、最大  $2 \times 10^{15}$  eV/cc 程度であり、これは、ビームの全エネルギーの約 3% がプラズマ中に注入されたことに対応する。hard X-ray [Fig. 4 (b)] は、コリメートしたフォトマルにより測定したものであり、時間分解して測定した結果、電子ビームが通過するタイミングに強い X-ray が観測される場合には、Faraday cup に到達する電子の個数が減少し、しかも、ビームの径方向の分布が極端に広がる。このことから、プラズマ中に入射した場合、電子ビームはかなり広がっており、hard X-ray は、ビーム電子が真空容器の壁に当たって出てくるのではないかと考えられる。レーザーをファイアーした後、各タイミングに電子ビームを入射した場合の、反磁性信号の増加 ( $\Delta W_{\perp} \cdot S$ ) 及び hard X-ray のシグナルの変化の一例を Fig. 5 に示した。このように、hard X-ray は、レーザーファイアー後、特定のタイミング (20~40  $\mu$ sec) に強く出てくる。但し、そのタイミングがプラズマの状態とどのように関連しているのかということとは、まだ明らかではない。

Fig. 4 (c) は、電子ビームをプラズマ中に入射した際のマイクロ波エミッションの信号の

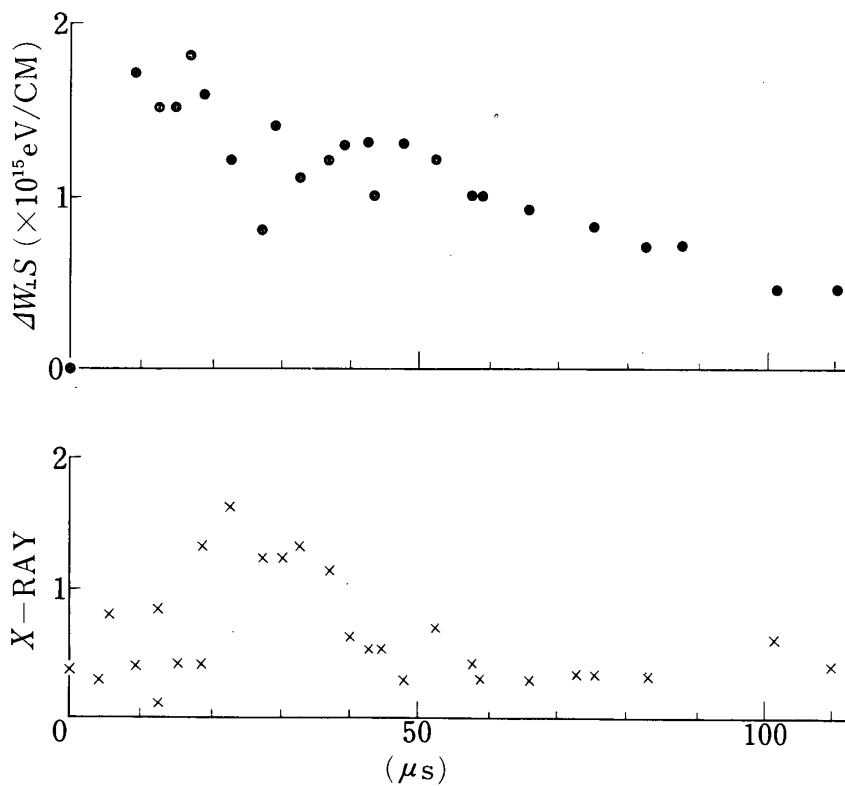


Fig. 5 Diamagnetic signal and X-ray signal v.s. the timing of the injection of REB ( $t$ )

一例であるが、電子ビーム入射後ただちにマイクロ波の放出が起こっている。横軸は $10\mu\text{sec}/\text{div}$ 、縦軸は $10\text{dB}/\text{div}$ である。ビーム入射から約 $15\mu\text{sec}$ の間に特に強いエミッションが見られ、その後、時間的に連続したエミッションが起こっている。最初の $20\mu\text{sec}$ の間の強いエミッション、及び、その後の連続的なエミッションについて整理すると、それぞれ、Fig. 6及びFig. 7のようになる。Fig. 6における実線は、ビーム入射後 $20\mu\text{sec}$ 間のシグナルのピークを、破線は、その間の全エミッション（時間的に積分したもの）を示している。又、Fig. 7は、ビーム入射後 $20\sim 40\mu\text{sec}$ の間の連続的なエミッションの時間平均を表わしている。Fig. 6, Fig. 7ともに、横軸は周波数 (GHz) 縦軸はマイクロ波シグナルの大きさ (dB) を示し、上3段のグラフは外部磁場の強さを変化させたものであり、下2段のグラフはプラズマ生成用のレーザーの出力を変えることにより、プラズマの初期密度を変化させたものである。磁場コイルに流した電流の大きさ ( $I_B$ )、及びレーザーの出力を各段の右肩に示した。又、それぞれの磁場について、電子サイクロトロン周波数 ( $f_{ce}$ ) 及びその整数倍を斜線で示した。これに幅があるのは、磁場が少しミラー配位になっているためである。磁場の強さは、 $I_B=100\text{A}$ に対して、ミラーの中心で約 $1\text{kGauss}$ 、端で $1.3\text{kGauss}$ 程度である。Fig. 6及びFig. 7より、マイクロ波のエミッションには、大きくわけて、3種類のタイプがあることがわかる。即ち、

[ I ] 電子サイクロトロン周波数 ( $f_{ce}$ ) の整数倍のところに出現しているマイクロ波のエミ

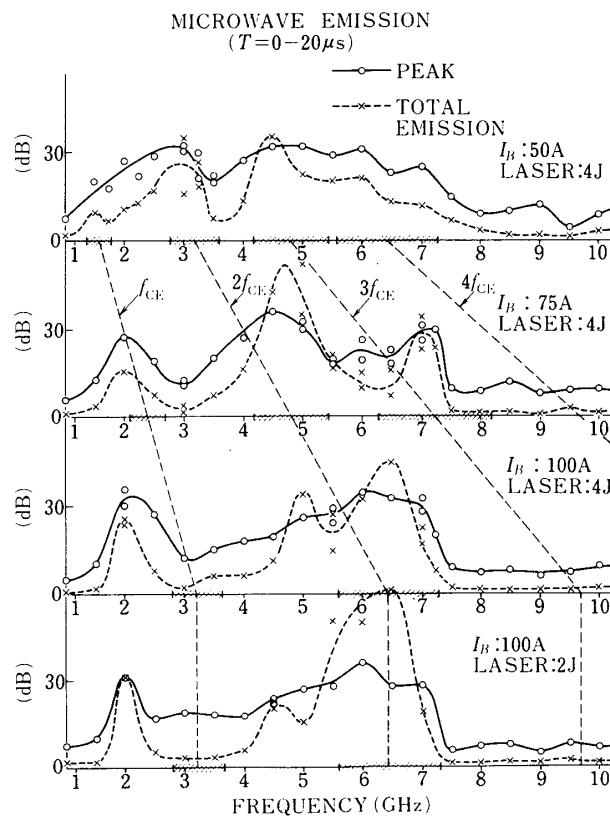


Fig.6 Frequency spectrum of the microwave emission from the plasma ( $T=0-20\mu\text{s}$ )

## ミッション

[II] 2GHz 附近の周波数のマイクロ波のエミッション

[III]  $I_B = 100\text{A}$  において 4.5 ~ 5.5GHz の周波数に観測されるエミッション

又、それぞれの型のマイクロ波エミッションについて特徴的なことを上げると次のようになる。

[I]-1. サイクロトロン周波数  $f_{ce}$  の 2 倍, 3 倍, 4 倍の周波数に強く出ている, 1 倍の周波数には, ほとんど観測されない。

-2. プラズマの初期密度を下げると, 全エミッション量が増大する。

[II]-1. 磁場及びプラズマ密度を変えても周波数 (~2GHz) は変化しない。

-2. 磁場を下げるとエミッションの大きさが減少する。

[III]-1. サイクロトロン周波数の整数倍以外の領域に出ている。

又, [I] のタイプのエミッションについて, 電子ビーム入射後 400 ~ 500  $\mu\text{sec}$  の間のエミッションの様子を Fig. 8 に示した。横軸は 50  $\mu\text{s}/\text{div}$ , 縦軸は 10 dB/div である。(a) ~ (c) は, プラズマ生成用のレーザーの出力を変えてプラズマ密度を変化させたものであり, レーザー出力は, それぞれ 1J, 2J, 3J である。又, (d) は, レーザー出力 3J であるが, 電子ビーム入射のタイミングを変えて (後にずらして) プラズマ密度を減少させた場合の信号である。レーザーをファイアーして電子ビームを入射するまでの時間 ( $t$ ) は, (a) ~ (c) が  $t = 28$

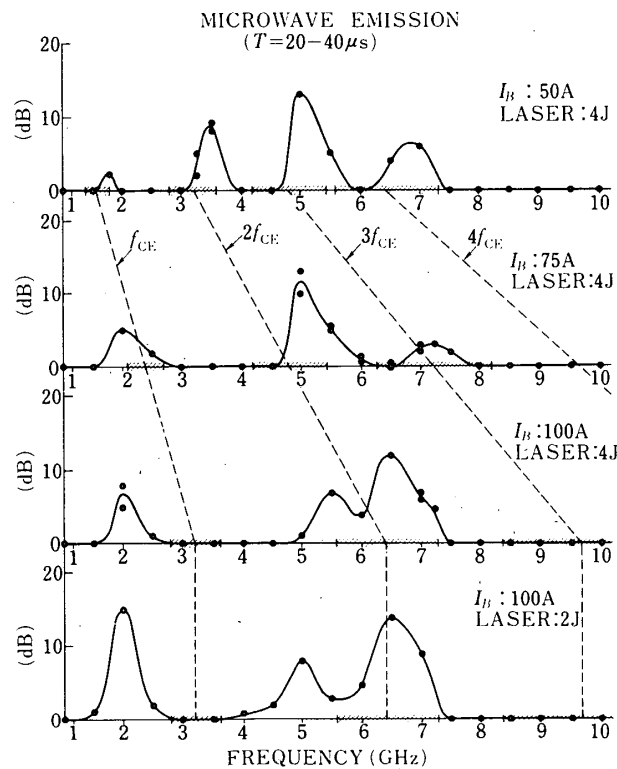


Fig.7 Frequency spectrum of the microwave emission from the plasma ( $T=20-40\mu\text{s}$ )

$\mu\text{sec}$  (d)が $t = 58\mu\text{sec}$ である. Fig. 8からわかるように, [I]のタイプのエミッションは, 電子ビーム入射から  $400\mu\text{sec}$ 以上続いており, 数十 $\mu\text{sec}$ 後にさらに増大する場合も見られる((b),(d)). 又, プラズマ密度が比較的小さい場合, 連続的なエミッションとは別に時間的に短い強いエミッションが観測される ((a),(b),(d)).

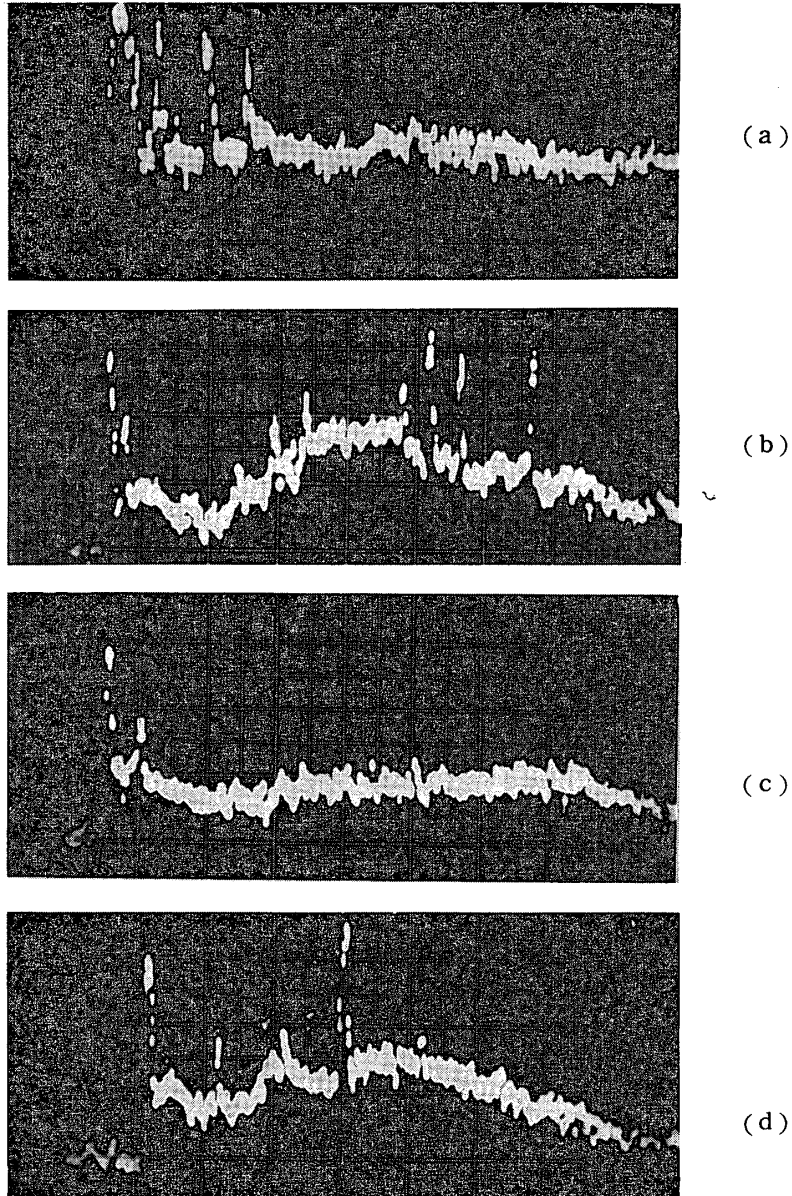


Fig.8 Microwave emission from the plasma at  $f=5\text{GHz}$ ,  $I_B=75\text{A}$

- (a) Laser energy: 1J,  $t=28\mu\text{s}$
  - (b) Laser energy: 2J,  $t=28\mu\text{s}$
  - (c) Laser energy: 3J,  $t=28\mu\text{s}$
  - (d) Laser energy: 3J,  $t=58\mu\text{s}$
- $50\mu\text{s}/\text{div}$ ,  $10\text{dB}/\text{div}$



### 3. 議 論

縦磁場中のプラズマに相対論的大電流電子ビームを入射した場合、プラズマの熱エネルギー ( $nkT_{\perp}$ ) の急激な増加が起こり、同時に壁からの hard X-ray が観測された。又、マイクロ波の干渉による密度測定から、 $nkT_{\perp}$  の増加は、プラズマの温度上昇によることがわかった。プラズマの加熱のメカニズムとしては、i) REB 入射により生ずるプラズマの帰還電流による乱流加熱及び ii) REB とプラズマ電子との二流体不安定による加熱が考えられるが [3]、我々の実験条件 ( $n_p \lesssim 2 \times 10^{13}/\text{cc}$ ,  $n_p$ : プラズマ密度) においては、ビームのパルス巾 ( $\tau_b \sim 3\text{ns}$ ) の間のイオンの運動はほとんど無視できる為 ( $f_{pi}^{-1} \gtrsim \tau_b$ , ただし,  $f_{pi}$ : イオンプラズマ振動数), i) のメカニズムは起こり得ず、従って ii) のメカニズムが支配的ではないかと考えている。又、hard X-ray や Faraday cup の測定により、プラズマ中に REB を入射した場合、プラズマの状態により、REB がかなり散乱を受ける場合があることがわかった。この散乱は、単なる Coulomb 散乱以外のメカニズムを考えなければ説明できないものであるが、そのメカニズムを解明するのは今後の課題である。

さらに、REB 入射により電子サイクロトロン周波数 ( $f_{ce}$ ) の整数倍の周波数のマイクロ波のエミッション ([I] のタイプ) が観測され、これはビーム通過後数百  $\mu\text{sec}$  以上続いている。このエミッションの成因としては、REB により加熱された電子がミラー磁場中にトラップされ、それがなんらかのかたちでスタティックな不安定性をひきおこし、エミッションが放出されるのではないかと予想される。又、同時に観測される、プラズマ密度、外部磁場に依存しない周波数のエミッション ([II] のタイプ,  $f \simeq 2\text{GHz}$  については、金属の真空容器を用いている為、装置固有のモードが存在し、それが観測されているのではないかと考えている。

今後は、REB 入射による加熱のメカニズム、及び、その際の REB 電子の散乱のメカニズムを調べる為、より詳細な実験 (REB によるスタティックな電場の測定等) を行なうとともに、外部磁場をさらに強くしていったときの現象の変化を調べていく予定である。

### 4. 感 謝

この実験にあたり、REB 発生装置「フェベトロン」をお貸しいただき、又、その操作等の面で御指導下さった、宇宙研航空力学部の小口先生、ならびに船曳氏に対して、深く感謝致します。

1975年9月30日 新設部 (科学)

### 参 考 文 献

- [1] C.A. Kapetanacos and D.A. Hammer, Appl. Phys. Lett. 23, 17 (1973)
- P.A. Moller and G.W. Kuswa, Phys. Rev. Lett. 30, 958 (1973)
- P. Korn, et. al. Phys. Rev. Lett. 31, 579 (1973)
- P. Korn, et. al. J. Appl. Phys. 44 (11), 4946 (1973)
- C. Ekdahl, et. al. Phys. Rev. Lett. 33, 346 (1974)
- A.T. Altyntsev, et. al. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, Vienna, 2, 309 (1971)

- V.S. Koydan, et. al. Fifth European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Grenoble, 1161 (1972)
- Yu.I. Abrashitov, et. al. JETP Lett. 18, No.11 395 (1973)
- Yu.I. Abrashitov, et. al. Zh. Enksp. Teor. Fiz. 66, 4 (1974)
- J.P. Vandevender, et. al. Phys. Rev. Lett. 33, 689 (1974)
- [ 2 ] 核融合研究第33卷 3号 3月 (1975)
- R. Okamura and N. Kawashima, Physics Letters (A), **54**, 101 (1975)
- [ 3 ] R.V. Lovelance and R.N. Sudan, Phys. Rev. Lett. 27, 1256 (1971)
- L.E. Thode and R.N. Sudan, Phys. Rev. Lett. 30, 732 (1973)
- V.U. Abramovich and V.I. Sevchenko, Sov. Phys. JETP, 35, 730 (1972)