

JAERI-M  
87-157

JFT-2Mトカマクにおける高周波電流  
駆動中の軟X線放射異方性の測定

1987年10月

川島 寿人・長谷川 満\*・的場 徹・上杉 喜彦  
星野 克道・河上 知秀・山本 巧

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）  
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城  
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,  
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 山田軽印刷所

JFT-2Mトカマクにおける高周波電流駆動中の軟X線放射異方性の測定

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部

川島 寿人・長谷川 満<sup>\*</sup>・的場 徹・上杉 喜彦  
星野 克道・河上 知秀・山本 巧

(1987年9月7日受理)

JFT-2Mトカマクの軟X線エネルギー分析器は、従来からトーラスの接線方向に1系統使用しているが、今回新しく垂直方向に6系統を整備した。これらの計測器を用いてプラズマ電流を担う高速電子の走行方向に対して0°, 90°, 180°の3方向から軟X線放射異方性を高周波電流駆動プラズマにおいて測定した。測定対象は、

- 1) 低域混成波電流駆動のみの場合
- 2) 低域混成波電流駆動時に電子サイクロotron波を加えた場合
- 3) 緩和振動不安定性が発生した場合

である。測定結果から高速電子のふるまいを推測し、理論的な予測と矛盾しないことを明らかにした。

---

那珂研究所：〒311-02 茨城県那珂郡那珂町大字向山801-1

\* 三菱電気株式会社

The Measurement of the Anisotropic Soft X-ray Emission  
during Radio Frequency Current Drive on JFT-2M Tokamak

Hisato KAWASHIMA, Mitsuru HASEGAWA\*, Tohru MATOBA

Yoshihiko UESUGI, Katsumichi HOSHINO

Tomohide KAWAKAMI and Takumi YAMAMOTO

Department of Thermonuclear Fusion Research

Naka Fusion Research Establishment

Japan Atomic Energy Research Institute

Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 7, 1987)

The new 6ch soft X-ray pulse height analyzer (PHA) system for measuring vertical soft X-ray emissions was installed in JFT-2M tokamak. The former single channel soft X-ray PHA system can be measured tangential emissions. These systems are used to measure the anisotropic soft X-ray emissions on radio frequency current drive experiment. The experimental objects are as follows.

- 1) Lower hybrid current drive (LHCD),
- 2) LHCD combined with ECH,
- 3) relaxation oscillation generated by anomalous Doppler effects in LHCD.

We discuss the behavior of the fast electrons estimated from measuring data. It is shown that the experimental results are consistent with the theoretically predictions.

Keywords: Radio Frequency Current Drive, Anisotropic Soft X-ray Emissions, JFT-2M Tokamak

---

\* On leave from Mitsubishi Electric Co.

## 目 次

1 序 論	1
2 実験装置	1
3 実験結果	2
3.1 低域混成波電流駆動 (LHCD) 実験	2
3.2 低域混成波 (LHCD) と電子サイクロトロン波加熱 (ECH) の組合せ実験	3
3.3 緩和振動不安定性の観測	3
4 議 論	4
4.1 LHCD と ECH の組合せ実験における ECH の効果	4
4.2 高速電子の電子速度分布関数の推定	4
5 結 論	6
謝 辞	6
参考文献	7
付 錄	20

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Experimental Apparatus .....	1
3. Experimental Results .....	2
3.1 The Experiment of the Lower Hybrid Current Drive (LHCD) ..	2
3.2 The Experiment of the LHCD combined with Electron Cyclotron Heating (ECH) .....	3
3.3 The Observation of relaxation oscillations generated by Anomalous Doppler Effect .....	3
4. Discussions .....	4
4.1 The effect of ECH in the LHCD+ECH experiment .....	4
4.2 The estimation of the distribution function of the fast electrons .....	4
5. Conclusions .....	6
Acknowledgement .....	6
Reference .....	7
Appendix .....	20

## 1. 序 論

低域混成波によるプラズマ電流駆動（以下LHCDと記す）は多くのトカマク装置で実験されて低密度域で成功している。<sup>1-5)</sup> LHCDの原理は、磁力線に対して一方向に伝搬する進行波と相互作用する高速の共鳴電子が加速され電流を担うことである。この高速電子の速度分布関数は、共鳴エネルギー領域にプラトーを持つ非等方分布になることが予想されている。<sup>6)</sup> この高速電子が本当に非等方分布であるか、またその度合いはどの程度なのかを実験的に調べることが本論文の主な目的である。LHCDで注目されるような高速電子は、主に電子—イオンクーロン衝突により制動放射を励起する。放射光子は異方性を持ち電子の走行方向に対し前方で最大になり、その拡がり角は光子エネルギー  $h\nu = 500$  (keV)において約  $40^\circ$  と狭く指向性が強いことが理論的にも実験的にも示されている。<sup>7, 8)</sup> 電子の走行方向に対する角度の関数として軟X線放射スペクトラムを測定することで、高速電子の速度分布を推定している。<sup>7-9)</sup> JFT-2Mでも高速電子の走行方向に対し、前方、後方、垂直の3方向で軟X線の放射測定をできている。

本論文では、LHCDのみの場合とLHCD中に電子サイクロトロン加熱（以下ECHと記す）を加えた場合について述べる。ECHによる、高速電子の選択加熱は、共鳴粒子の垂直方向のエネルギーを増大させ衝突周波数を減少させることによってLHCDの電流駆動効率を改善し、高効率のECH電流駆動を導くことが理論的に予想されている。<sup>10)</sup> この条件での、電子速度分布関数の変化を知る上で軟X線放射の異方性を実測することは、重要な方法であり、高周波と高速電子の相互作用を実験的に一段と明確にできる。

次章に実験装置および軟X線エネルギー分析器について記述し、3章3.1, 3.2, 3.3節にLHCD実験、LHCD+ECH実験、およびLHCD中の緩和振動不安定性発生の観測結果を示す。4章4.1節ではLHCDとECHの組合せ実験におけるECHの効果について議論し、4.2節では、実測データとモデル計算を合せることで電流駆動中の高速電子の速度分布関数を推定する。最後に5章で結論を述べる。

## 2. 実験装置

第1図にJFT-2M装置の周辺に配置されている加熱装置および計測器を示す。低域混成波（以下LHWと記す）発振システムは、JFT-2のものをそのまま用いている。<sup>2)</sup> 発振周波数750 (MHz)で、最大発振出力は600 (kW)である。LHWは4系統並列のランチャーで励起され、そのパワースペクトラムはパワー密度の最大値が平行方向屈折率  $N_{\parallel} = 2$  にあり、半値幅が約3の拡がりを持つ。ECH装置は、米国バリアン社のジャイロトロン発振管を2本用いている。発振周波数は60 (GHz)で、最大発振出力は各200 (kW)、最大持続時間は100 (msec)である。伝送系は、JFT-2Mの赤道面外側からホーンアンテナで入射している。<sup>11)</sup>

## 1. 序 論

低域混成波によるプラズマ電流駆動（以下LHCDと記す）は多くのトカマク装置で実験されて低密度域で成功している。<sup>1-5)</sup> LHCDの原理は、磁力線に対して一方向に伝搬する進行波と相互作用する高速の共鳴電子が加速され電流を担うことである。この高速電子の速度分布関数は、共鳴エネルギー領域にプラトーを持つ非等方分布になることが予想されている。<sup>6)</sup> この高速電子が本当に非等方分布であるか、またその度合いはどの程度なのかを実験的に調べることが本論文の主な目的である。LHCDで注目されるような高速電子は、主に電子—イオンクーロン衝突により制動放射を励起する。放射光子は異方性を持ち電子の走行方向に対し前方で最大になり、その拡がり角は光子エネルギー  $h\nu = 500$  (keV)において約  $40^\circ$  と狭く指向性が強いことが理論的にも実験的にも示されている。<sup>7, 8)</sup> 電子の走行方向に対する角度の関数として軟X線放射スペクトラムを測定することで、高速電子の速度分布を推定している。<sup>7-9)</sup> JFT-2Mでも高速電子の走行方向に対し、前方、後方、垂直の3方向で軟X線の放射測定をできている。

本論文では、LHCDのみの場合とLHCD中に電子サイクロトロン加熱（以下ECHと記す）を加えた場合について述べる。ECHによる、高速電子の選択加熱は、共鳴粒子の垂直方向のエネルギーを増大させ衝突周波数を減少させることによってLHCDの電流駆動効率を改善し、高効率のECH電流駆動を導くことが理論的に予想されている。<sup>10)</sup> この条件での、電子速度分布関数の変化を知る上で軟X線放射の異方性を実測することは、重要な方法であり、高周波と高速電子の相互作用を実験的に一段と明確にできる。

次章に実験装置および軟X線エネルギー分析器について記述し、3章3.1, 3.2, 3.3節にLHCD実験、LHCD+ECH実験、およびLHCD中の緩和振動不安定性発生の観測結果を示す。4章4.1節ではLHCDとECHの組合せ実験におけるECHの効果について議論し、4.2節では、実測データとモデル計算を合せることで電流駆動中の高速電子の速度分布関数を推定する。最後に5章で結論を述べる。

## 2. 実験装置

第1図にJFT-2M装置の周辺に配置されている加熱装置および計測器を示す。低域混成波（以下LHWと記す）発振システムは、JFT-2のものをそのまま用いている。<sup>2)</sup> 発振周波数750 (MHz)で、最大発振出力は600 (kW)である。LHWは4系統並列のランチャーで励起され、そのパワースペクトラムはパワー密度の最大値が平行方向屈折率  $N_{\parallel} = 2$  にあり、半値幅が約3の拡がりを持つ。ECH装置は、米国バリアン社のジャイロトロン発振管を2本用いている。発振周波数は60 (GHz)で、最大発振出力は各200 (kW)、最大持続時間は100 (msec)である。伝送系は、JFT-2Mの赤道面外側からホーンアンテナで入射している。<sup>11)</sup>

軟X線計測器は2カ所に設置しているが、第2図にJFT-2Mプラズマとの幾何学的配置関係を示す。接線方向測定用の検出器（“Tangential detector”）は従来から使用している1系統の検出器を配置している。<sup>12)</sup>これによりプラズマ電流と反対方向に規定される高速電子の走行方向に対し、前方と後方の軟X線放射をLHWの伝搬方向とプラズマ電流を反転することにより測定している。垂直方向測定用の検出器（“Vertical Detector”）は、今回新しく設置したもので、詳細構造を第3図に示す。空間6点をトーラスの赤道面で10(cm)置きに測定できるように6系統の検出器を配置している。但し今回の実験には、プラズマ中心を通る1系統のみを使用している。検出器の種類としてはGe(I)(ORTEC-GLP-10300-S, 結晶直径10(mm), 結晶活性幅7(mm))を用いている。本検出器のエネルギー分解能はMn-K<sub>α</sub>の線源エネルギー5.9(keV)における半値幅で約0.2(keV)である。光電効率の高いエネルギー域は、3~200(keV)であり、それ以上のエネルギー域では、指数関数的に減少する。垂直方向測定用計測器の構成は、JFT-2M本体側からまずゲートバルブを介し、可変第1コリメータおよび校正用線源(<sup>57</sup>Co), 可変第2コリメータ、低エネルギー域吸収用ベリリエム(厚0.2(mm)あるいは0.3(mm)), および検出器の順になっている。検出器はバックグラウンドX線の回り込みを防ぐため鉛で遮蔽されている。

第4図に電子回路系およびデータ処理系を示す。高速マルチチャンネルアナライザ(原研モジュール1114A, 1115)は、以前に製作した原研モジュール1105<sup>13, 14)</sup>の改良型であり、特にECL素子をTTL素子に置き換えて電流消費量を減らし、メモリーを単体のモジュール1115にして64kバイトに増設している。アナライザ自身の特性は、1105と同等である。データ処理は単体処理(PC-8801およびPC-9801パーソナルCAMAC)と、JFT-2Mモニター信号処理システム<sup>15)</sup>を使用して2系統で行っている。

### 3. 実験結果

#### 3.1 低域混成波電流駆動(LHCD)実験

第5図にトロイダル磁場B<sub>t</sub>=1.07(T), D型プラズマ, D<sub>2</sub>ガス, LHW発振出力P<sub>LH</sub>=70(kW)の条件におけるプラズマパラメータの時間変化を示す。LHWは、放電開始後0.5(sec)で加えられ、0.5(sec)間持続する。この間、プラズマ電流I<sub>p</sub>=170(kA), ループ電圧V<sub>1</sub>~0(V), 平均電子密度 $\bar{n}_e=2\times10^{18}(m^{-3})$ となる。高速電子のふるまいは、70.6(GHz)と78.4(GHz)の周波数域での電子サイクロトロン放射強度I<sub>ECE</sub>, および軟X線計測器で得た3方向の60~400(keV)の軟X線放射光子数の和(今後はそれぞれ、前方をW<sub>SX//F</sub>, 垂直をW<sub>SX⊥</sub>, 後方をW<sub>SX//B</sub>と記す)の時間変化で示してある。この内、W<sub>SX//F</sub>(実線)の放電は他の一連のパラメーターと同一放電であるが、W<sub>SX//B</sub>(破線)は電流を反転した放電を示す。W<sub>SX⊥</sub>は、両放電を重ねて示してあり(実線と破線)その時間変化がほぼ同等である。また、電流を反転した場合の他の一連のパラメーターの時間変化は、反転した場合とほとんど変わらない。即ち、電流を反転してもプラズ

軟X線計測器は2カ所に設置しているが、第2図にJFT-2Mプラズマとの幾何学的配置関係を示す。接線方向測定用の検出器（“Tangential detector”）は従来から使用している1系統の検出器を配置している。<sup>12)</sup>これによりプラズマ電流と反対方向に規定される高速電子の走行方向に対し、前方と後方の軟X線放射をLHWの伝搬方向とプラズマ電流を反転することにより測定している。垂直方向測定用の検出器（“Vertical Detector”）は、今回新しく設置したもので、詳細構造を第3図に示す。空間6点をトーラスの赤道面で10(cm)置きに測定できるように6系統の検出器を配置している。但し今回の実験には、プラズマ中心を通る1系統のみを使用している。検出器の種類としてはGe(I)(ORTEC-GLP-10300-S, 結晶直径10(mm), 結晶活性幅7(mm))を用いている。本検出器のエネルギー分解能はMn-K<sub>α</sub>の線源エネルギー5.9(keV)における半値幅で約0.2(keV)である。光電効率の高いエネルギー域は、3~200(keV)であり、それ以上のエネルギー域では、指数関数的に減少する。垂直方向測定用計測器の構成は、JFT-2M本体側からまずゲートバルブを介し、可変第1コリメータおよび校正用線源(<sup>57</sup>Co), 可変第2コリメータ、低エネルギー域吸収用ベリリエム(厚0.2(mm)あるいは0.3(mm)), および検出器の順になっている。検出器はバックグラウンドX線の回り込みを防ぐため鉛で遮蔽されている。

第4図に電子回路系およびデータ処理系を示す。高速マルチチャンネルアナライザ（原研モジュール1114A, 1115）は、以前に製作した原研モジュール1105<sup>13, 14)</sup>の改良型であり、特にECL素子をTTL素子に置き換えて電流消費量を減らし、メモリーを単体のモジュール1115にして64kバイトに増設している。アナライザ自身の特性は、1105と同等である。データ処理は単体処理(PC-8801およびPC-9801パーソナルCAMAC)と、JFT-2Mモニター信号処理システム<sup>15)</sup>を使用して2系統で行っている。

### 3. 実験結果

#### 3.1 低域混成波電流駆動(LHCD)実験

第5図にトロイダル磁場B<sub>t</sub>=1.07(T), D型プラズマ, D<sub>2</sub>ガス, LHW発振出力P<sub>LH</sub>=70(kW)の条件におけるプラズマパラメータの時間変化を示す。LHWは、放電開始後0.5(sec)で加えられ、0.5(sec)間持続する。この間、プラズマ電流I<sub>p</sub>=170(kA), ループ電圧V<sub>1</sub>~0(V), 平均電子密度n<sub>e</sub>=2×10<sup>18</sup>(m<sup>-3</sup>)となる。高速電子のふるまいは、70.6(GHz)と78.4(GHz)の周波数域での電子サイクロトロン放射強度I<sub>ECE</sub>, および軟X線計測器で得た3方向の60~400(keV)の軟X線放射光子数の和(今後はそれぞれ、前方をW<sub>SX//F</sub>, 垂直をW<sub>SX⊥</sub>, 後方をW<sub>SX//B</sub>と記す)の時間変化で示してある。この内、W<sub>SX//F</sub>(実線)の放電は他の一連のパラメーターと同一放電であるが、W<sub>SX//B</sub>(破線)は電流を反転した放電を示す。W<sub>SX⊥</sub>は、両放電を重ねて示してあり(実線と破線)その時間変化がほぼ同等である。また、電流を反転した場合の他の一連のパラメーターの時間変化は、反転した場合とほとんど変わらない。即ち、電流を反転してもプラズ

マ変化しないので前方、後方のスペクトラムの比較が可能である。 $I_{ECE}$  および  $W_{SX\perp}$  は、LHW印加時には、0.02～0.03 (sec) の間、時間と共に減少し、その後一定値に落ち着き、LHWが切れるとき増加する。 $W_{SX//F}$  は印加後～0.05 (sec) まで増加しその後一定となる。 $W_{SX//B}$  は印加前後で変化が少ない。

この時の3方向の軟X線放射エネルギースペクトラムを第6図(a), (b), (c)に示す。(a)図が後方、(b)図が前方、(c)図が垂直から見たスペクトラムで、8放電の平均値である。実線がLHW印加中、破線が印加前を示す。後方から見たスペクトラムは、勾配がLHW印加前に比較して印加中の方が急峻になり高エネルギー域での計数率は減少し低エネルギー側で増える傾向にある。前方から見たスペクトラムは勾配が緩やかで、LHW印加前後であまり変化しない。しかしその計数率はLHW印加により全体的に約2倍増加している。垂直から見たスペクトラムは、勾配が前方と後方の中間の傾きを持ちLHW印加により計数値が全体的に減少する。この軟X線放射異方特性は、元々逃走電子放電に近い非一様速度空間を持つプラズマにLHWを加えることでその傾向が大きくなつたことを示す。

### 3.2 低域混成波電流駆動 (LHCD) と電子サイクロトロン加熱 (ECH) の組合せ実験

LHCDとECHの組合せ (LHCD+ECH) 実験は、パルス幅  $t_d = 0.1$  (sec), ECHの入射電力  $P_{ECH} = 100$  (kW) で行った。第7図は、電子サイクロトロン共鳴層がプラズマ柱の外側端に位置する磁場  $B_t = 1.33$  (T) におけるプラズマパラメーターの時間変化である。この放電においてプラズマはD型、 $D_2$ ガスでLHWの発振出力  $P_{LH} = 100$  (kW) である。プラズマ電流は、 $I_p = 100$  (kA) の一定値に保たれている。平均電子密度は  $\bar{n}_e = 2 \times 10^{18}$  ( $m^{-3}$ ) である。LHCDにより小さくなつたループ電圧はECHによって更に低下し、 $I_{ECE}$  には増加が見られる。軟X線放射は  $W_{SX\perp}$  と  $W_{SX//B}$  が 20 (m sec) 程度で顕著に増加する。 $W_{SX\perp}$  はそれ以後飽和レベルを維持するが、 $W_{SX//B}$  はそれ以後 ECH が切れるまで徐々に増加し続ける。他方  $W_{SX//F}$  は約70%減少して飽和する。

3方向の軟X線エネルギースペクトラムを第8図(a), (b), (c)に示す。実線がLHCD中にECHを加えた場合、破線がLHCDのみの場合を表す。それぞれ8から10放電の平均値である。また、第9図に中心磁場強度に対するECHの共鳴エネルギーの変化を示す。 $B_t = 1.33$  (T) では共鳴エネルギーは約100 (keV) である。第8図(c)の垂直から見たスペクトラムは、50～400 (keV) の測定エネルギー域全体に於いて ECH によって増加している。後方から見たスペクトラムでは、40～50 keV以上の高エネルギー成分が増加している。前方から見たスペクトラムは、逆に測定エネルギー域全体で僅かに減少するが、その割合は、垂直、後方スペクトラムの増分に比べてはるかに小さい。これは LHCD により駆動された高速電子が ECH による相対論的電子サイクロトロン高調波と効果的に結合して垂直方向のエネルギー成分を増加させたことを示している。<sup>16)</sup>

### 3.3 緩和振動不安定性の観測

第10図にループ電圧が完全にゼロまで低下しないで電場の残る場合の  $W_{SX\perp}$  と  $W_{SX//F}$  の時間変化を示す。LHCD中および後に緩和振動が観測され、 $W_{SX\perp}$  と  $W_{SX//F}$  で逆位相で生ずる。この緩

和振動は電子サイクロトロン放射にも現れている。緩和振動発生前後10 (m sec) の時間間隔で前方と垂直から見た軟X線スペクトラムを第11図(a), (b)に示す。データは5放電の平均値を表す。前方から見たスペクトラムは、100 (keV) 程度までは緩和振動発生前後で変化が少ないが、それ以上のエネルギー域では緩和振動と同時に元々あったテール部が急激におさえられる。一方、垂直から見たスペクトラムは、緩和振動発生時に100 (keV) 以上の高エネルギー領域が増大している。<sup>17, 18)</sup> 同様のふるまいは、PLTやAlcator-Cにおいても観測されている。これらの観測で重要なことは垂直方向への粒子のピッチ角散乱に対する規則的な作用のあることである。つまり、波と粒子の相互作用によってひきおこされる異常ドップラー効果<sup>19, 20)</sup>などの作用が考えられる。異常ドップラー効果による不安定性の発生する境界速度は  $V_{\text{crit}} = V_{\text{th}} (\omega_{\text{ce}} / \omega_{\text{pe}})^{\lambda_{1/2}}$  で与えられる。<sup>19, 20)</sup> ここで  $\lambda = 1 n (\omega_{\text{ce}}^2 / \omega_{\text{pe}}^2 / \delta)^{1/2}$ ,  $\delta$  はテールとバルクの電子密度比である。JFT-2Mの実験条件 ( $B_t = 1.3$  (T),  $\bar{n}_e = 1 \times 10^{18}$  (m<sup>-3</sup>),  $T_e = 1$  (keV),  $\delta \sim 10^{-3}$ )において、境界エネルギー  $E_{\text{crit}} = 1/2 m V_{\text{crit}}^2 \sim 160$  (keV) となる。実測スペクトラムで変化の大きいエネルギー領域はこの境界エネルギー以上である。

## 4. 議論

### 4.1 LHCDとECHの組合せ実験におけるECHの効果

LHCD + ECH実験における軟X線放射の時間変化は高速電子の放射する指向性の強い高エネルギー光子の挙動を表している。まず、 $W_{\text{SX}\perp}$  の増分は ECHによる直接的な加熱に対応しており、 $W_{\text{SX}\parallel B}$  の時間変化の後半の増分は、ピッチ角散乱の時間が約78 (m sec) (付録参照) であり、ECHによる垂直エネルギーの増大からの寄与に相当する。他方、 $W_{\text{SX}\parallel F}$  の減少の原因は、第1にループ電圧が ECH印加時に更に降下することで加速電界が減少して平行方向のエネルギー減少が考えられ、第2に平行方向エネルギーに変化がなくても、ECH印加による垂直方向成分の増加により放射異方性による見かけ上の減少が考えられる。以上2つの原因のいずれが今回の場合、より効果的であるかは、詳細な実験データを得て解析しなければ判定できない。しかしながら、少なくとも ECHがLHCDにより生成した高速電子(磁力線方向に大きなドリフト速度を持つ)に磁場と垂直方向に運動量を与えていると結論づけることができ、電流駆動効率の向上が期待できる。

### 4.2 高速電子の速度分布関数の推定<sup>21)</sup>

実測したスペクトラムデータとモデル計算による軟X線放射スペクトラムの異方性の比較から電流駆動にかかる高速電子の速度分布関数を推定する。実測データは、LHCDのみの場合、および ECHをえた場合の2つを選ぶ。モデル計算としては、今回第1段階として非等方分布を表すのに3温度モデルを用いることとする。

和振動は電子サイクロトロン放射にも現れている。緩和振動発生前後10 (m sec) の時間間隔で前方と垂直から見た軟X線スペクトラムを第11図(a), (b)に示す。データは5放電の平均値を表す。前方から見たスペクトラムは、100 (keV)程度までは緩和振動発生前後で変化が少ないが、それ以上のエネルギー域では緩和振動と同時に元々あったテール部が急激におさえられる。一方、垂直から見たスペクトラムは、緩和振動発生時に100 (keV)以上の高エネルギー領域が増大して<sup>17, 18)</sup>いる。同様のふるまいは、PLTやAlcator-Cにおいても観測されている。<sup>17, 18)</sup>これらの観測で重要なことは垂直方向への粒子のピッチ角散乱に対する規則的な作用のあることである。つまり、波と粒子の相互作用によってひきおこされる異常ドップラー効果<sup>19, 20)</sup>などの作用が考えられる。異常ドップラー効果による不安定性の発生する境界速度は  $V_{\text{crit}} = V_{\text{th}} (\omega_{\text{ce}} / \omega_{\text{pe}})^{1/2}$  で与えられる。<sup>19, 20)</sup>ここで  $\lambda = 1 \text{ n} (\omega_{\text{ce}}^2 / \omega_{\text{pe}}^2 / \delta)^{1/2}$ ,  $\delta$  はテールとバルクの電子密度比である。JFT-2Mの実験条件 ( $B_t = 1.3 \text{ (T)}$ ,  $\bar{n}_e = 1 \times 10^{18} \text{ (m}^{-3}\text{)}$ ,  $T_e = 1 \text{ (keV)}$ ,  $\delta \sim 10^{-3}$ )において、境界エネルギー  $E_{\text{crit}} = 1/2 m V_{\text{crit}}^2 \sim 160 \text{ (keV)}$  となる。実測スペクトラムで変化の大きいエネルギー領域はこの境界エネルギー以上である。

## 4. 議論

### 4.1 LHCDとECHの組合せ実験におけるECHの効果

LHCD + ECH実験における軟X線放射の時間変化は高速電子の放射する指向性の強い高エネルギー光子の挙動を表している。まず、 $W_{\text{SX}\perp}$  の増分は ECHによる直接的な加熱に対応しており、 $W_{\text{SX}\parallel\text{B}}$  の時間変化の後半の増分は、ピッチ角散乱の時間が約78 (m sec) (付録参照) であり、ECHによる垂直エネルギーの増大からの寄与に相当する。他方、 $W_{\text{SX}\parallel\text{F}}$  の減少の原因は、第1にループ電圧が ECH印加時に更に降下することで加速電界が減少して平行方向のエネルギー減少が考えられ、第2に平行方向エネルギーに変化がなくても、ECH印加による垂直方向成分の増加により放射異方性による見かけ上の減少が考えられる。以上2つの原因のいずれが今回の場合、より効果的であるかは、詳細な実験データを得て解析しなければ判定できない。しかしながら、少なくとも ECHがLHCDにより生成した高速電子（磁力線方向に大きなドリフト速度を持つ）に磁場と垂直方向に運動量を与えていると結論づけることができ、電流駆動効率の向上が期待できる。

### 4.2 高速電子の速度分布関数の推定<sup>21)</sup>

実測したスペクトラムデータとモデル計算による軟X線放射スペクトラムの異方性の比較から電流駆動にかかる高速電子の速度分布関数を推定する。実測データは、LHCDのみの場合、および ECHをえた場合の2つを選ぶ。モデル計算としては、今回第1段階として非等方分布を表すのに3温度モデルを用いることとする。

第12図に運動量空間における軟X線放射のベクトル関係を示す。外部磁場  $\vec{B}_0$ 、入射電子の運動量  $\vec{P}_0$ 、放射光子の運動量  $\vec{k}$  の方向が示されている。考へている空間点からの放射光子数は運動量空間での制動放射微分面積を運動量空間で積分することにより得られる。

$$\frac{dN(k, \theta_R)}{dk dt} \propto \int_{-P_{\max}}^{P_{\max}} \int_0^{P_{\max}} \int_0^\pi p_\perp d\varphi dp_\perp dp_{\parallel} f(p_0, \theta_R) \frac{d\sigma}{dk d\theta_0} v_0 \quad (1)$$

ここで  $k$  は  $mc^2$  で規格化した光子エネルギー、  $p_0$  は  $mc$  で規格化した入射電子の運動量、  $v_0$  は入射電子の速度、  $\theta_0$  は  $\vec{P}_0$  と  $\vec{k}$  の成す角度、  $\theta_R$  は外部磁場  $\vec{B}_0$  と  $\vec{k}$  の成す角度を示す。また制動放射の微分面積  $d\sigma / dk d\theta_0$  は、相対論を考慮したボルン近似式を用いている。<sup>22, 23)</sup>  $f$  がこれから推定しようとする高速電子の速度分布関数である。

高速電子のモデル分布関数は3温度モデルとして以下の様に定義する。

$$\left. \begin{aligned} f(p) &= C_N \exp \left( \frac{p^2}{2T_\perp} - \frac{p_{\parallel}^2}{2T_{\parallel F}} \right) \quad p_{\parallel} > 0 \\ &= C_N \exp \left( \frac{p^2}{2T_\perp} - \frac{p_{\parallel}^2}{2T_{\parallel B}} \right) \quad p_{\parallel} < 0 \\ &= 0 \quad p_{\max} < p_{\parallel}, p_\perp \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

但し  $p = mv\gamma$ ,  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$

ここで、  $T_{\parallel F}$  は前方温度、  $T_{\parallel B}$  は後方温度、  $T_\perp$  は垂直温度、  $P_{\max}$  は電子の運動量として取り得る最大値、  $C_N$  は規格化定数である。ここで定義した  $T_{\parallel F}$ ,  $T_{\parallel B}$ ,  $T_\perp$  は相対論効果の顕著なエネルギー域に於いては、真の温度より高い値にずれていき定量的評価は無理となるので注意する必要がある。

以上により、空間の1点からの軟X線放射スペクトラムが求まるので、実測データと比較するために空間的に積分すればよい。しかしながら、今回の実測データは放射光子の空間分布を求めていないので、ここでは空間的に一様と仮定して計算をする。実測データと比較するためのモデル計算パラメーターとしては、  $T_{\parallel F}$ ,  $T_{\parallel B}$ ,  $T_\perp$  および  $P_{\max}$  をとる。  $P_{\max}$  は実測することも可能であり、推定精度も向上するものと思われるが、今回は  $G_e(I)$  検出器の測定範囲を越えているため実測できていない。実測データとモデル計算の比較は、勾配温度  $T_{\parallel F}^*$ ,  $T_{\parallel B}^*$ ,  $T_\perp^*$  および前方と後方の60 (keV)における放射強度比  $I_F/I_B$  で行う。勾配温度は光子エネルギー  $E$  が60 ~ 120 (keV)の領域で求める。  $I_F/I_B$  を用いるのは、同一の水平方向を見込む検出器で計測しているので比の値が計算値と直接比較できるためである。垂直方向を見込む検出器の放射強度  $I_\perp$  は、配置が異なるためその絶対量を評価しない限り単純に水平方向を見込む検出器の放射強度 ( $I_F, I_B$ ) と比較できない。

実測データとモデル計算値を比較したスペクトラムを第13図(a), (b)に示す。(a)図はLHCDのみの場合である。実線が実測値、破線がモデル計算値である。計算によるスペクトラムの傾きから求めた勾配温度に\*C印、実測スペクトラムのそれには\*m印が付けてある。一方、

速度分布関数のパラメーターとしては、 $T_{\parallel F} = 400$  (keV),  $T_{\parallel B} = 50$  (keV),  $T_{\perp} = 50$  (keV),  $E_{max} \equiv (P_{max}^2 + 1)^{1/2} = 800$  (keV) および  $I_F / I_B |_{60 \text{ keV}} = 12.8$  である。(b)図は、LHCDに ECH を加えた場合である。速度分布関数のパラメーターは、 $T_{\parallel F} = 400$  (keV),  $T_{\parallel B} = 75$  (keV),  $T_{\perp} = 200$  (keV),  $E_{max} = 800$  (keV) および  $I_F / I_B |_{60 \text{ keV}} = 4.9$  である。 $T_{\parallel F}$  と  $E_{max}$  は、LHCD のみの場合と同じ値である。一方、 $T_{\perp}$  は単独の場合の 4 倍、 $T_{\parallel B}$  は 1.5 倍になる。第 14 図にここで求めたパラメーターをもとに描いた高速電子の分布関数を示す。実線は ECH+LHCD, 破線は LHCD のみの場合を示す。LHCD のみで高速電子は電流駆動方向に強い非等方分布となっており、これに ECH を印加した場合高速電子の垂直成分が顕著に増加しており、効率良く高速電子は高周波電力が注入されていることがわかる。以上、速度分布関数を 3 温度モデルで仮定して軟 X 線放射の異方性を説明でき、LHCD と LHCD + ECH を比較すると ECH による垂直方向へのエネルギー増分が顕著で、ECH の高効率の電流駆動が期待される。

今後の課題は 1) 軟 X 線放射絶対強度の評価、2) 軟 X 線放射強度の空間分布の実測、3)  $P_{max}$  の実測、4) より実際的にフォッカープランクの式を取り入れたモデルでの計算等があり、これらを実現できれば、高速電子に関してより高精度の速度分布および空間分布を知ることが可能となる。

## 5. 結 論

磁気軸に対し 3 方向 ( $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ ) の軟 X 線エネルギー分析から得た電流駆動時の軟 X 線放射分布測定から以下の結論を得た。

- 1) LHCD 中に高速電子の駆動方向に強い放射分布を観測した。
- 2) ECH と LHCD の組合せ実験で ECH の相対論的共鳴条件を満足するエネルギー域に於いて垂直方向への選択的電子加熱を観測した。
- 3) 異常ドップラー効果による不安定性の特徴を持つ緩和振動が実験的に観測された。緩和振動発生時に、前方から垂直にエネルギーが急激に転送されることが明らかになった。
- 4) 高速電子の速度分布を 3 温度モデルで仮定した計算により LHCD あるいは LHCD + ECH の軟 X 線放射異方性を説明できた。

## 謝 辞

波高分析器についてはエレクトロニクス課の清水和明氏および熊原忠志主任研究員にご尽力いただき、JFT-2M プラズマによるデータ収集にもご協力いただいたことを感謝します。電流駆動実験にあたってはプラズマ実験研究室の鈴木紀男副主任研究員及び各氏、装置技術管理室の柴田孝俊係長および各氏に御協力、御助力をいただいたことを感謝します。本研究にあたって常に有意義なご意見、ご指導をいただいた核融合研究部の船橋昭昌プラズマ実験研究室長、田中裕二次長、田中正俊部長、苦米地顕那珂研究所所長および森茂副理事長に深く感謝の意を表します。

速度分布関数のパラメーターとしては、 $T_{\parallel F} = 400$  (keV),  $T_{\parallel B} = 50$  (keV),  $T_{\perp} = 50$  (keV),  $E_{max} \equiv (P_{max}^2 + 1)^{1/2} = 800$  (keV) および  $I_F / I_B |_{60\text{ keV}} = 12.8$  である。(b)図は、LHCDに ECH を加えた場合である。速度分布関数のパラメーターは、 $T_{\parallel F} = 400$  (keV),  $T_{\parallel B} = 75$  (keV),  $T_{\perp} = 200$  (keV),  $E_{max} = 800$  (keV) および  $I_F / I_B |_{60\text{ keV}} = 4.9$  である。 $T_{\parallel F}$  と  $E_{max}$  は、LHCD のみの場合と同じ値である。一方、 $T_{\perp}$  は単独の場合の 4 倍、 $T_{\parallel B}$  は 1.5 倍になる。第 14 図にここで求めたパラメーターをもとに描いた高速電子の分布関数を示す。実線は ECH+LHCD, 破線は LHCD のみの場合を示す。LHCD のみで高速電子は電流駆動方向に強い非等方分布となっており、これに ECH を印加した場合高速電子の垂直成分が顕著に増加しており、効率良く高速電子は高周波電力が注入されていることがわかる。以上、速度分布関数を 3 温度モデルで仮定して軟 X 線放射の異方性を説明でき、LHCD と LHCD + ECH を比較すると ECH による垂直方向へのエネルギー増分が顕著で、ECH の高効率の電流駆動が期待される。

今後の課題は 1) 軟 X 線放射絶対強度の評価、2) 軟 X 線放射強度の空間分布の実測、3)  $P_{max}$  の実測、4) より実際的にフォッカープランクの式を取り入れたモデルでの計算等があり、これらを実現できれば、高速電子に関してより高精度の速度分布および空間分布を知ることが可能となる。

## 5. 結 論

磁気軸に対し 3 方向 ( $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ ) の軟 X 線エネルギー分析から得た電流駆動時の軟 X 線放射分布測定から以下の結論を得た。

- 1) LHCD 中に高速電子の駆動方向に強い放射分布を観測した。
- 2) ECH と LHCD の組合せ実験で ECH の相対論的共鳴条件を満足するエネルギー域に於いて垂直方向への選択的電子加熱を観測した。
- 3) 異常ドップラー効果による不安定性の特徴を持つ緩和振動が実験的に観測された。緩和振動発生時に、前方から垂直にエネルギーが急激に転送されることが明らかになった。
- 4) 高速電子の速度分布を 3 温度モデルで仮定した計算により LHCD あるいは LHCD + ECH の軟 X 線放射異方性を説明できた。

## 謝 辞

波高分析器についてはエレクトロニクス課の清水和明氏および熊原忠志主任研究員にご尽力いただき、JFT-2M プラズマによるデータ収集にもご協力いただいたことを感謝します。電流駆動実験にあたってはプラズマ実験研究室の鈴木紀男副主任研究員及び各氏、装置技術管理室の柴田孝俊係長および各氏に御協力、御助力をいただいたことを感謝します。本研究にあたって常に有意義なご意見、ご指導をいただいた核融合研究部の船橋昭昌プラズマ実験研究室長、田中裕二次長、田中正俊部長、苦米地顯那珂研究所所長および森茂副理事長に深く感謝の意を表します。

速度分布関数のパラメーターとしては、 $T_{\parallel F} = 400$  (keV),  $T_{\parallel B} = 50$  (keV),  $T_{\perp} = 50$  (keV),  $E_{max} = (P_{max}^2 + 1)^{1/2} = 800$  (keV) および  $I_F / I_B |_{60 \text{ keV}} = 12.8$  である。(b)図は、LHCDに ECH を加えた場合である。速度分布関数のパラメーターは、 $T_{\parallel F} = 400$  (keV),  $T_{\parallel B} = 75$  (keV),  $T_{\perp} = 200$  (keV),  $E_{max} = 800$  (keV) および  $I_F / I_B |_{60 \text{ keV}} = 4.9$  である。 $T_{\parallel F}$  と  $E_{max}$  は、LHCD のみの場合と同じ値である。一方、 $T_{\perp}$  は単独の場合の 4 倍、 $T_{\parallel B}$  は 1.5 倍になる。第 14 図にここで求めたパラメーターをもとに描いた高速電子の分布関数を示す。実線は ECH+LHCD, 破線は LHCD のみの場合を示す。LHCD のみで高速電子は電流駆動方向に強い非等方分布となっており、これに ECH を印加した場合高速電子の垂直成分が顕著に増加しており、効率良く高速電子は高周波電力が注入されていることがわかる。以上、速度分布関数を 3 温度モデルで仮定して軟 X 線放射の異方性を説明でき、LHCD と LHCD + ECH を比較すると ECH による垂直方向へのエネルギー増分が顕著で、ECH の高効率の電流駆動が期待される。

今後の課題は 1) 軟 X 線放射絶対強度の評価、2) 軟 X 線放射強度の空間分布の実測、3)  $P_{max}$  の実測、4) より実際的にフォッカープランクの式を取り入れたモデルでの計算等があり、これらを実現できれば、高速電子に関してより高精度の速度分布および空間分布を知ることが可能となる。

## 5. 結論

磁気軸に対し 3 方向 ( $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ ) の軟 X 線エネルギー分析から得た電流駆動時の軟 X 線放射分布測定から以下の結論を得た。

- 1) LHCD 中に高速電子の駆動方向に強い放射分布を観測した。
- 2) ECH と LHCD の組合せ実験で ECH の相対論的共鳴条件を満足するエネルギー域に於いて垂直方向への選択的電子加熱を観測した。
- 3) 異常ドップラー効果による不安定性の特徴を持つ緩和振動が実験的に観測された。緩和振動発生時に、前方から垂直にエネルギーが急激に転送されることが明らかになった。
- 4) 高速電子の速度分布を 3 温度モデルで仮定した計算により LHCD あるいは LHCD + ECH の軟 X 線放射異方性を説明できた。

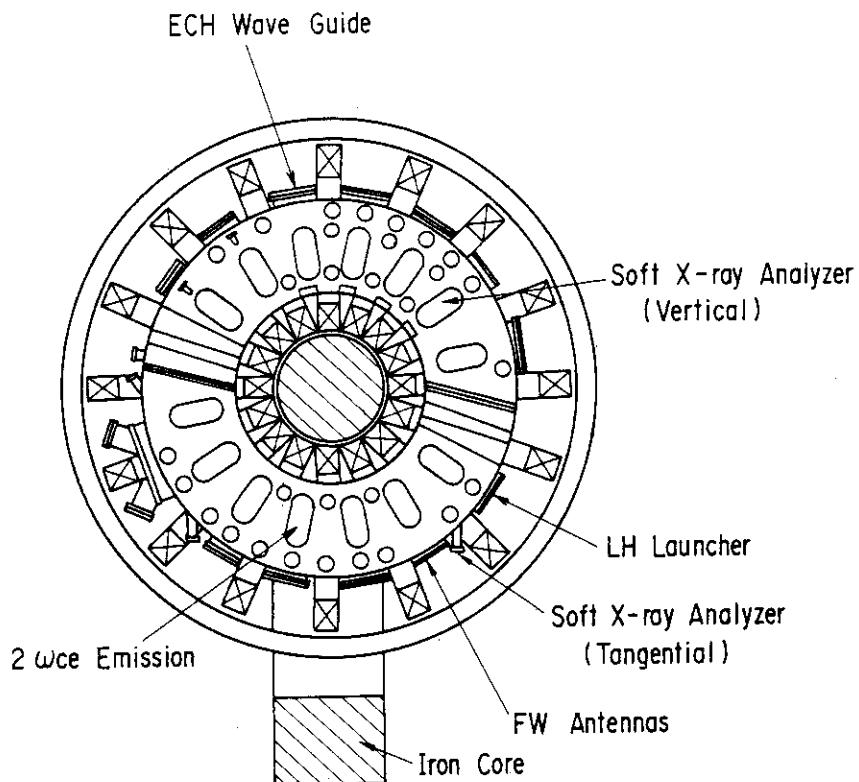
## 謝辞

波高分析器についてはエレクトロニクス課の清水和明氏および熊原忠志主任研究員にご尽力いただき、JFT-2M プラズマによるデータ収集にもご協力いただいたことを感謝します。電流駆動実験にあたってはプラズマ実験研究室の鈴木紀男副主任研究員及び各氏、装置技術管理室の柴田孝俊係長および各氏に御協力、御助力をいただいたことを感謝します。本研究にあたって常に有意義なご意見、ご指導をいただいた核融合研究部の船橋昭昌プラズマ実験研究室長、田中裕二次長、田中正俊部長、苦米地顯那珂研究所所長および森茂副理事長に深く感謝の意を表します。

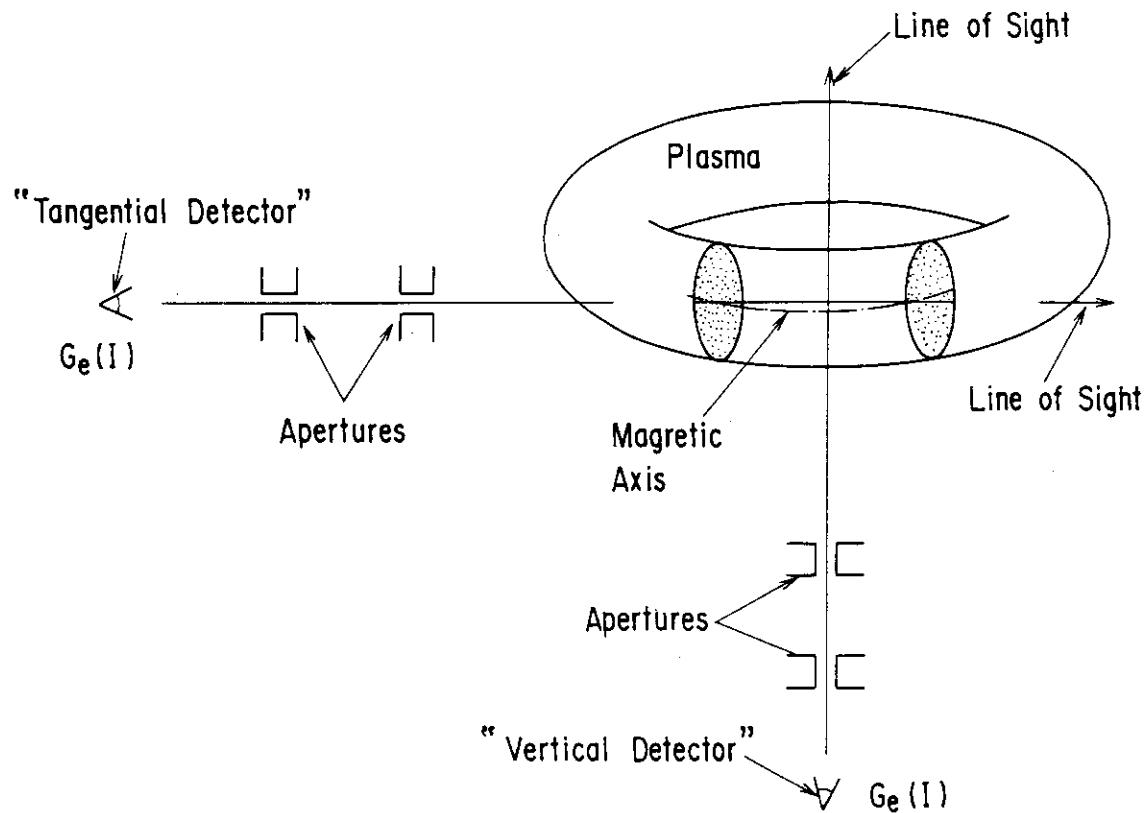
## 参 考 文 献

- (1) Bernabei S., Daughney C., Efthimion P., Hooke W., Hosea J., et al : Phys. Rev. Lett. 22, 1255 (1982).
- (2) Yamamoto T., and JFT-2 Group : in Non-Inductive Current Drive in Tokamaks (Proc. IAEA Tech. Committee Meeting Culham, 1983), Vol. 224 (1983).
- (3) Uesugi Y., Hoshino K., Yamamoto T., Kawashima H., Kasai S., et al : Nucl. Fusion 25, 1623 (1985).
- (4) Ando A., Ogura K., Tanaka H., Iida M., Ide S., et al : Nucl. Fusion 26, 107 (1986).
- (5) Kawashima H., Matoba T., Uesugi Y., Hoshino K., and Yamamoto T. : J. Phys. Soc. Jpn. 56, 1348 (1987).
- (6) 高村秀一著：“プラズマ加熱基礎論”名古屋大学出版会(1986).
- (7) Goeler S. Von., Stevens J., Bernabei S., Bitter M., Chu T. K., et al : Nucl. Fusion 25, 1515 (1985).
- (8) Stevens J., Goeler S. Von., Bernabei S., Bitter M., Chu T. K., et al : Nucl. Fusion 25, 1529 (1985).
- (9) Texter S., Knowlton S., Pokolab M., and Takase Y. : Nucl. Fusion 26, 1279 (1986).
- (10) Fidone I., Giruzzi G., Granata G., and Meyer R. L. : Phys. Fluids 27, 2468 (1984).
- (11) Hoshino K., Yamamoto T., Kawashima H., Shibata T., Shibusi T. : JAERI-M 85-169, (1985).
- (12) Kumagai K., Matoba T., Funahashi A., and Kawakami T. : Japan. J. Appl. Phys. 16, 871 (1977).
- (13) Kumahara T., Shimizu K., Matoba T., and Suzuki Y. : IEEE Trans. Nucl. Sci., Ns-29, 907 (1982).
- (14) 川島寿人, 的場徹, 小川俊英, 河上知秀 : JAERI-M 85-005, (1985).
- (15) Matsuda T., et al : to be published.
- (16) Yamamoto T., Funahashi A., Hoshino K., Kasai S., Kawakami T., et al : in Proceeding of the 11th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Kyoto, Japan, 1986 IAEA-Cn-47/F-11-5.
- (17) Goeler S. Von., Stevens S., Karney C., Bernabei S., Bitter M., et al : P. P. P. L., 2012.
- (18) Pappas D. S., Texter S. C., Gandy R. F., Lloyd B., Porkolab M., and Alcator Group : PFC / JA-84-9.
- (19) Parail V. V. and Pogutse O. P. : Sov. J. Plasma Phys. 2, 125 (1976).
- (20) Parail V. V. and Pogutse O. P. : Nucl. fusion 18, 303 (1978).
- (21) 長谷川満, 他 : JAERI-M 投稿中

- (22) Koch H. W. and Motz J. W. : Rev. Mod. Phys., 31, 920 (1959).
- (23) Lee C. M., Kissel Lynn, and Pratt R. H. : Phys. Rev. A 13, 1714 (1976).
- (24) 宮本健郎著：“核融合のためプラズマ物理”岩波書店（1978）。

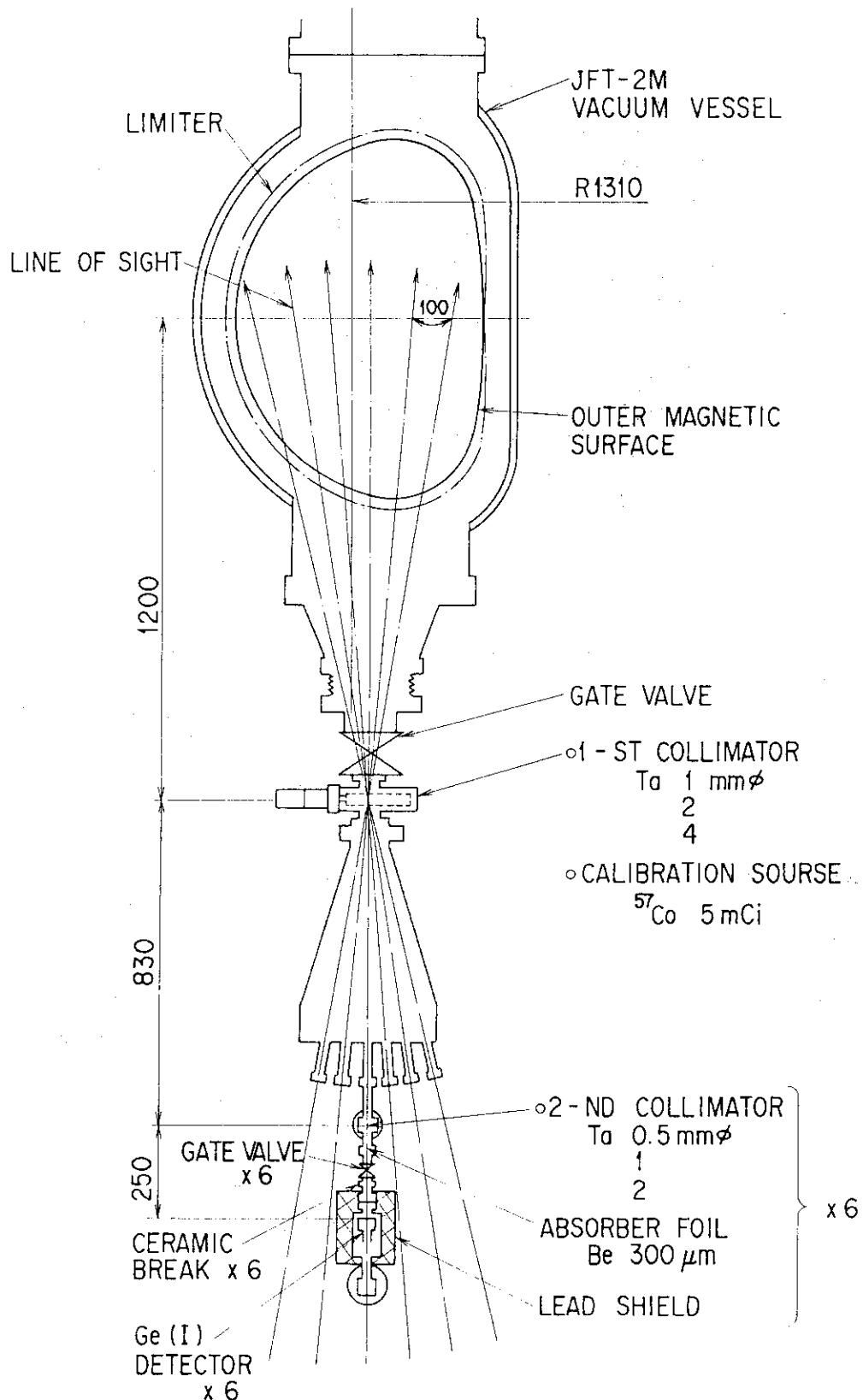


第1図 JFT-2Mの電流駆動実験の加熱装置および計測器の配置



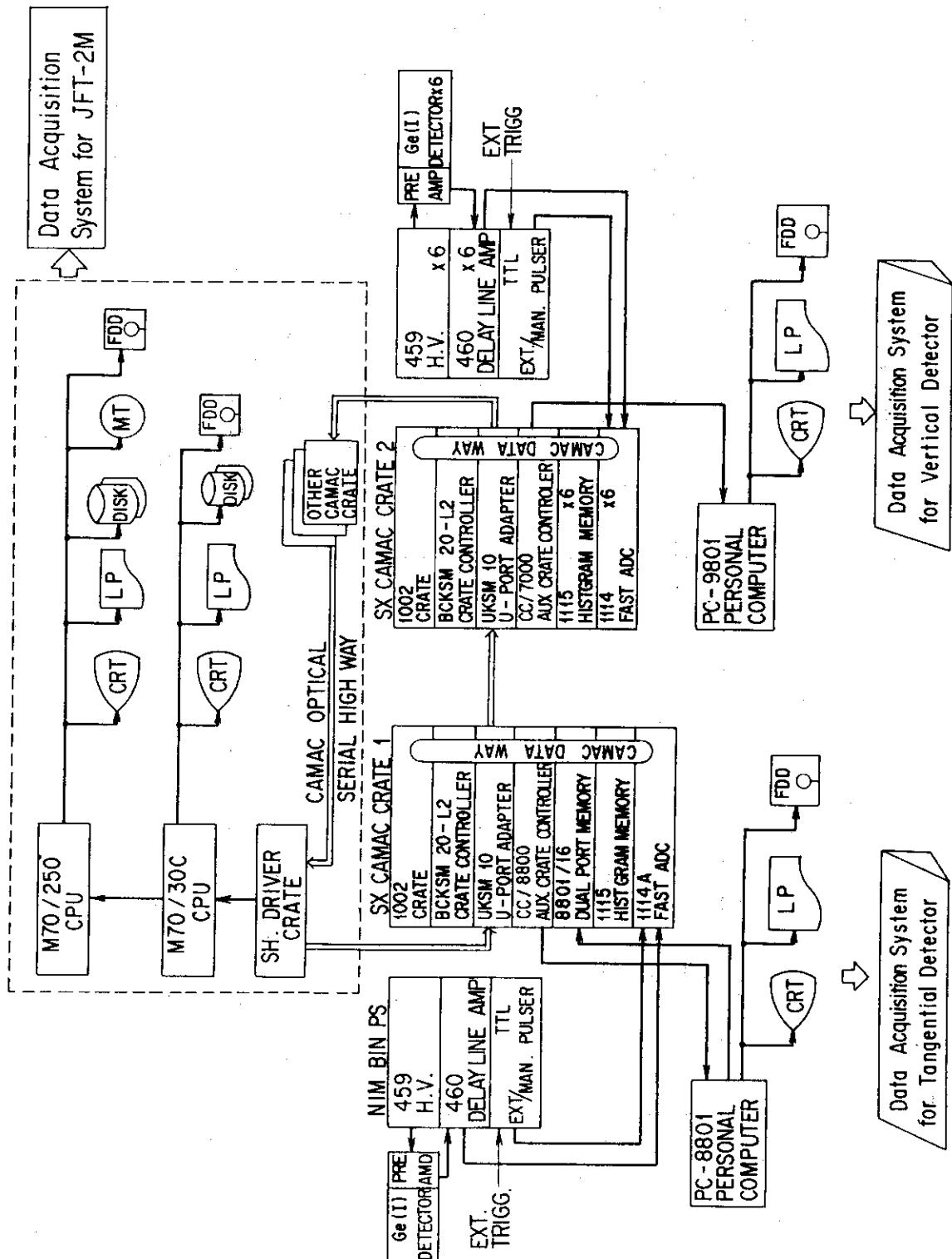
第2図 JFT-2Mトカマクにおける軟X線計測器の幾何学的配置

接線方向測定用の検出器("Tangential Detector")は従来から使用している1系統を、垂直方向測定用の検出器("Vertical Detector")は今回新しく整備し、6系統を配置している。

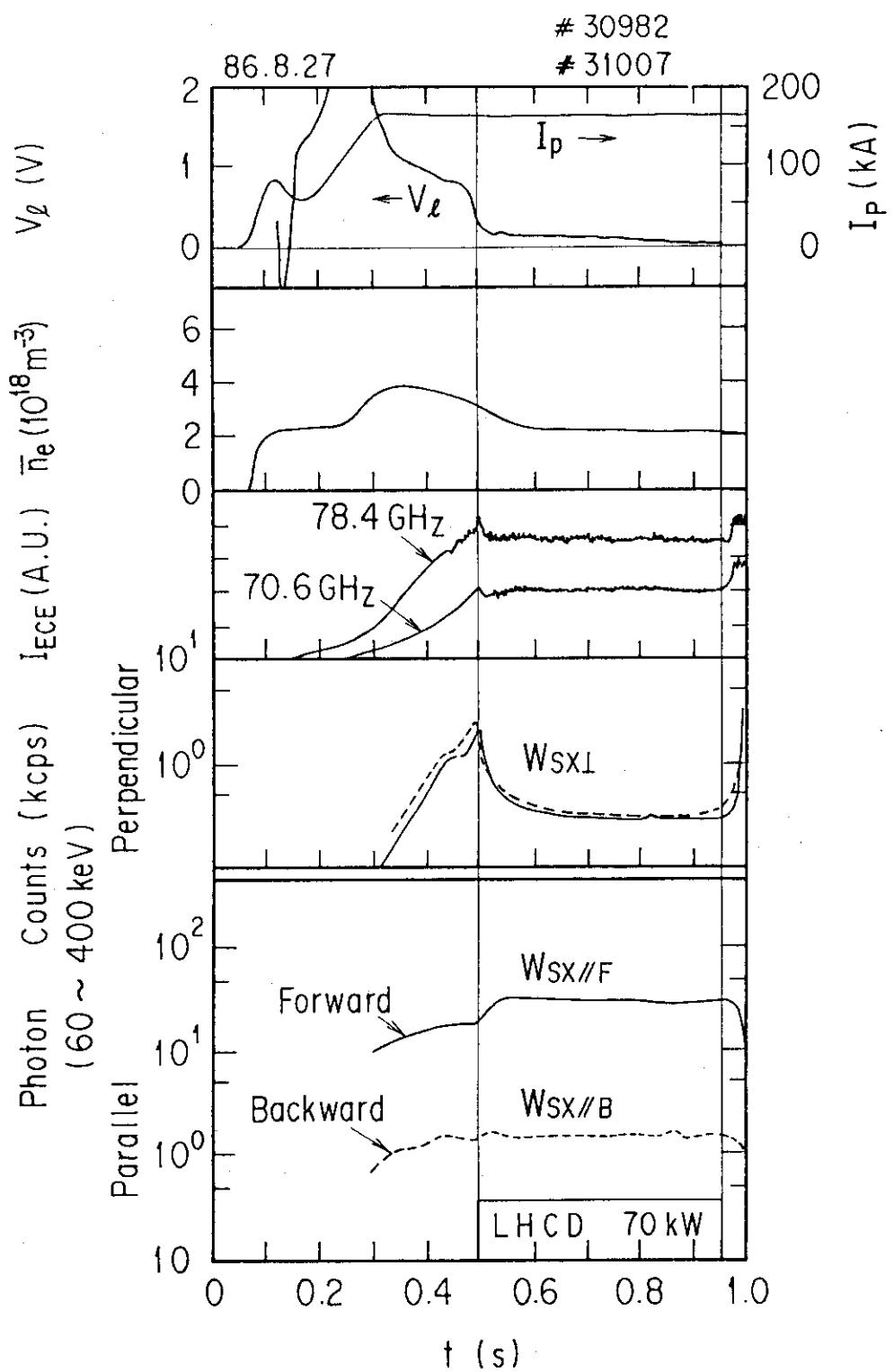


第3図 垂直方向検出器 ("Vertical Detector") の詳細構造図

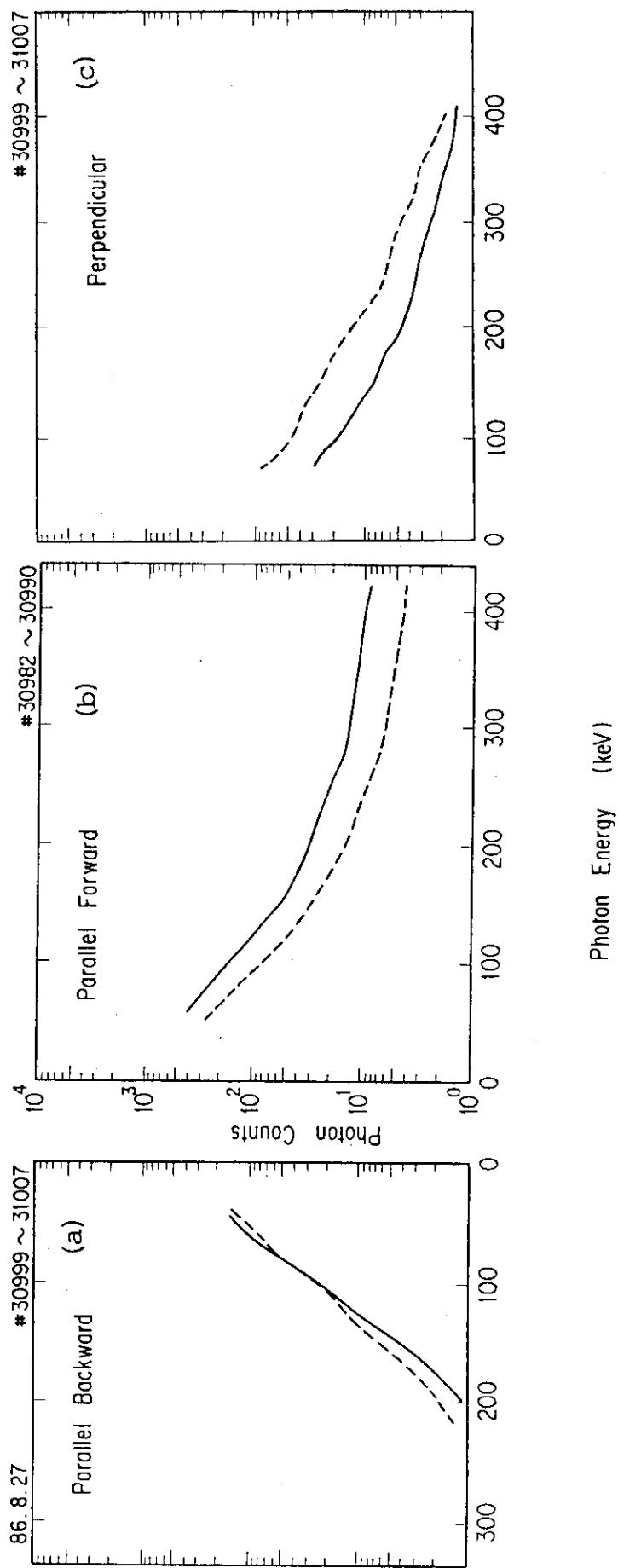
トーラスの赤道面で 10 (cm) おきに 6 点同時に測定できる。



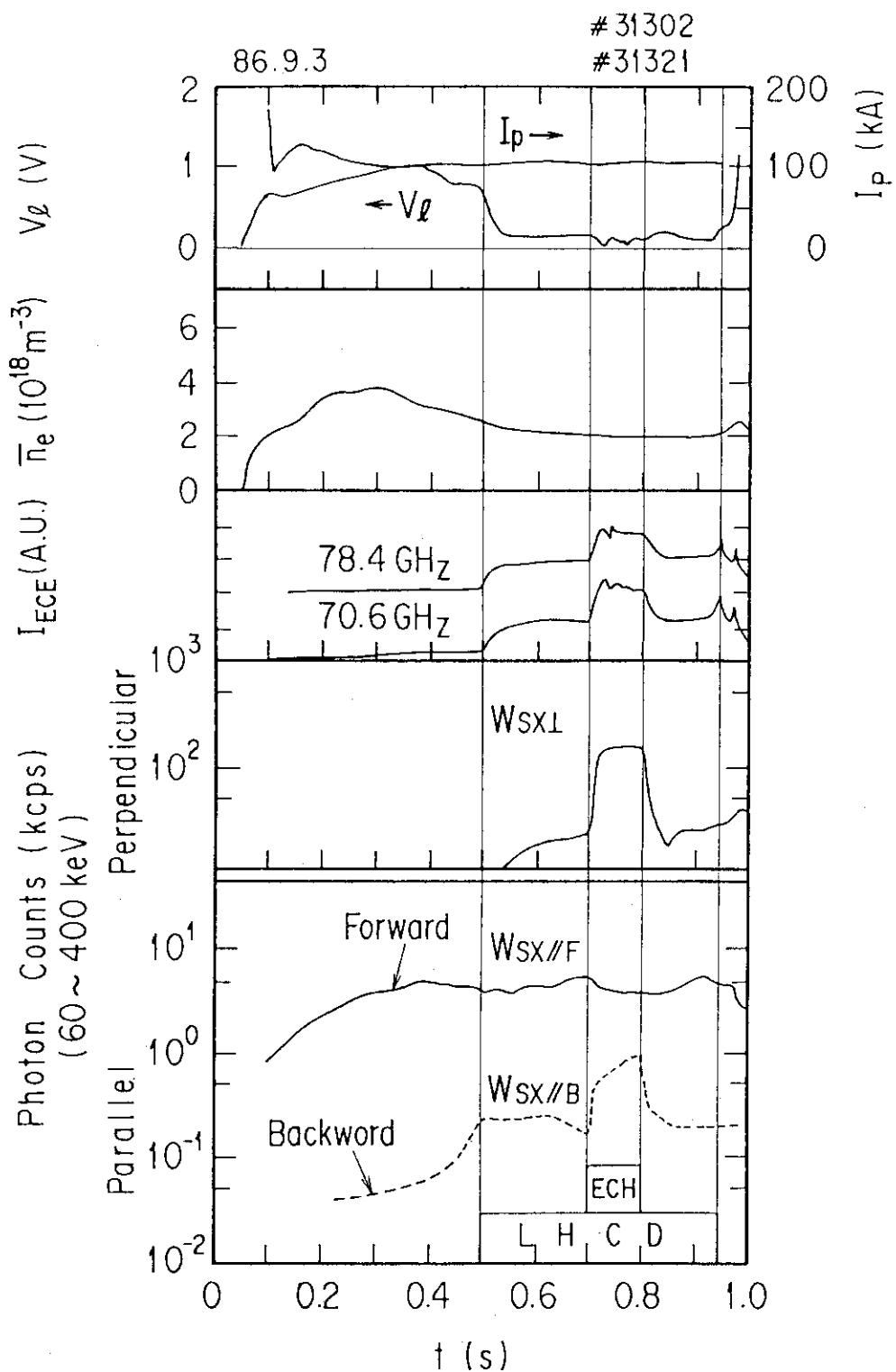
第4図 軟X線計測器の電子回路系、およびデータ処理系のダイヤグラム



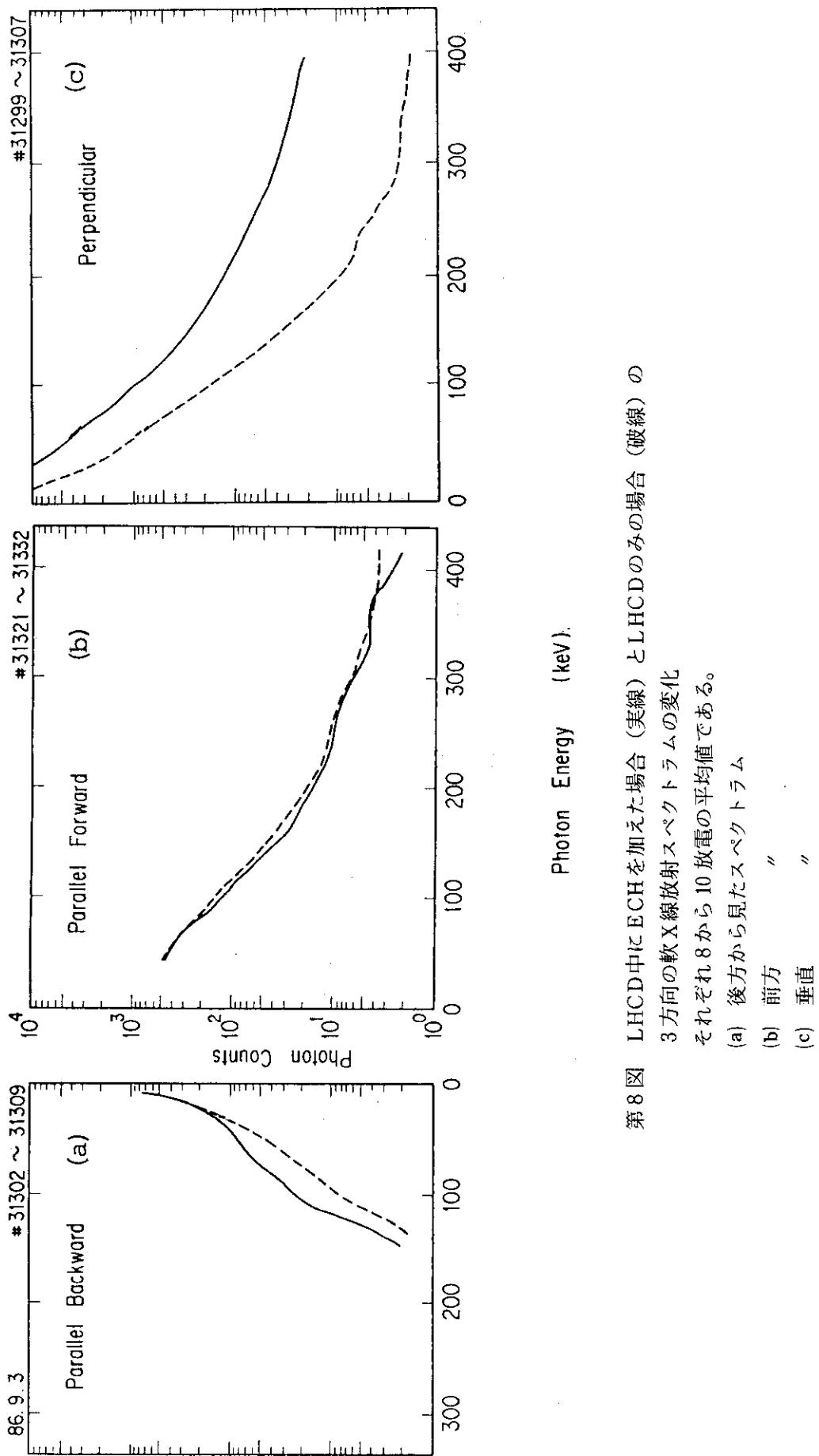
第5図 プラズマ条件が、 $B_t = 1.07$  (T), D型プラズマ,  $D_2$ ガスに  $P_{LH} = 70$  (kW) でLHWを加えた場合のプラズマパラメーターの時間変化  
電流の向きが反時計方向(実線)と時計方向(破線)の場合を示す。



第6図 LHCDによる軟X線放射スペクトラムの変化  
実線がLHCD印加中で破線が印加前を示し、それぞれ8放電の平均値である。  
(a) 後方から見たスペクトラム  
(b) 前方  
(c) 垂直

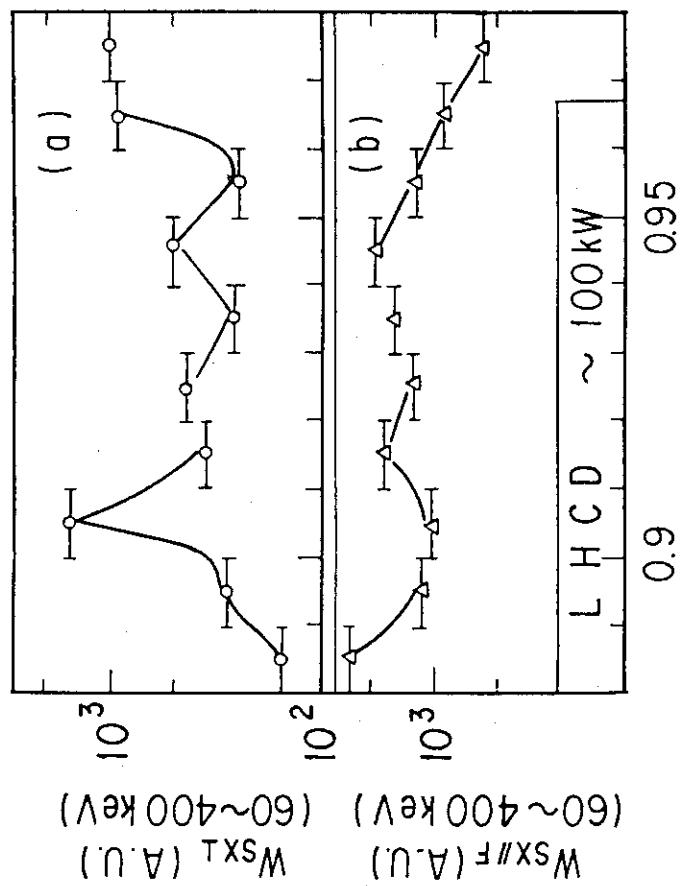


第7図 LHCDとECHの組合せ実験におけるプラズマパラメーターの時間変化  
プラズマ条件は、 $B_t = 1.33$  (T),  $P_{ECH} = 100$  (kW),  $P_{LH} = 100$  (kW),  
D型プラズマ,  $D_2$ ガスである。ECH印加時には、 $W_{SX\perp}$ と $W_{SX//B}$ は増加し,  
 $W_{SX//F}$ は減少する。



第8図 LHCD中にECHを加えた場合(実線)とLHCDのみの場合(破線)の3方向の軟X線放射スペクトラムの変化  
それぞれ8から10放電の平均値である。

- (a) 後方から見たスペクトラム
- (b) 前方 "
- (c) 垂直 "



第10図 緩和振動不安定性が発生した場合の(a)垂直 ( $W_{SX\perp}$ )  
と(b)水平前方 ( $W_{SX//F}$ ) の 50 (keV)から 400 (keV)  
までの軟X線放射光子数の和の時間変化

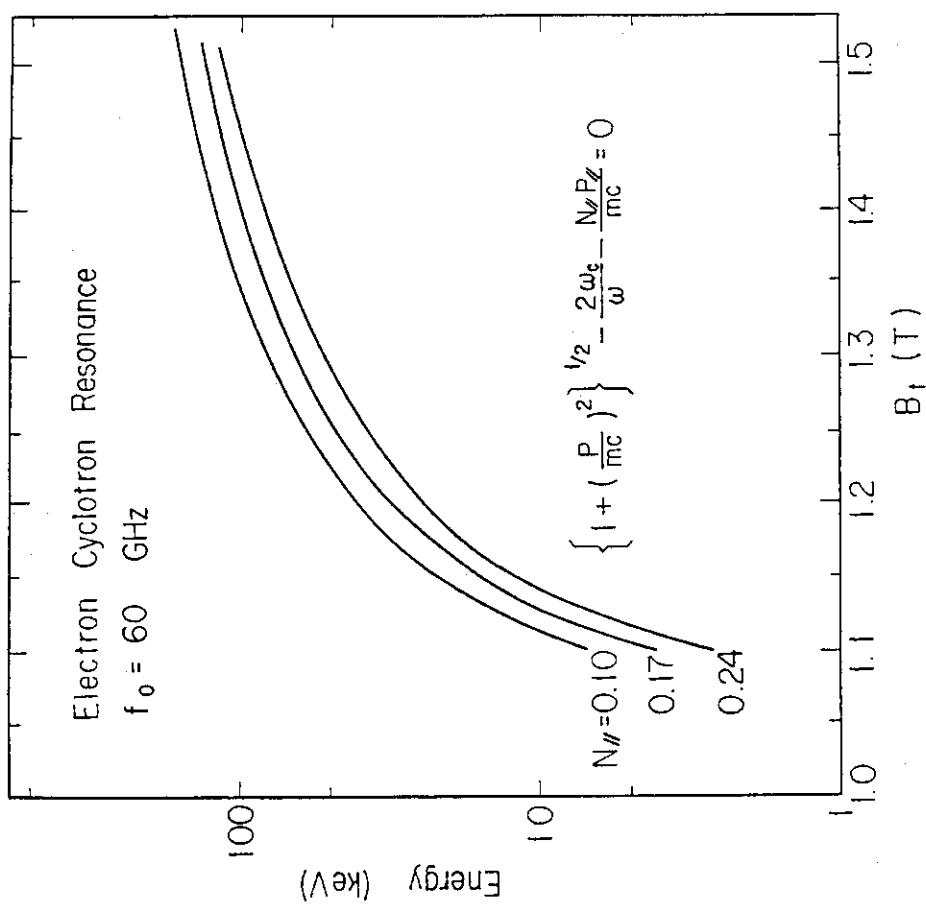
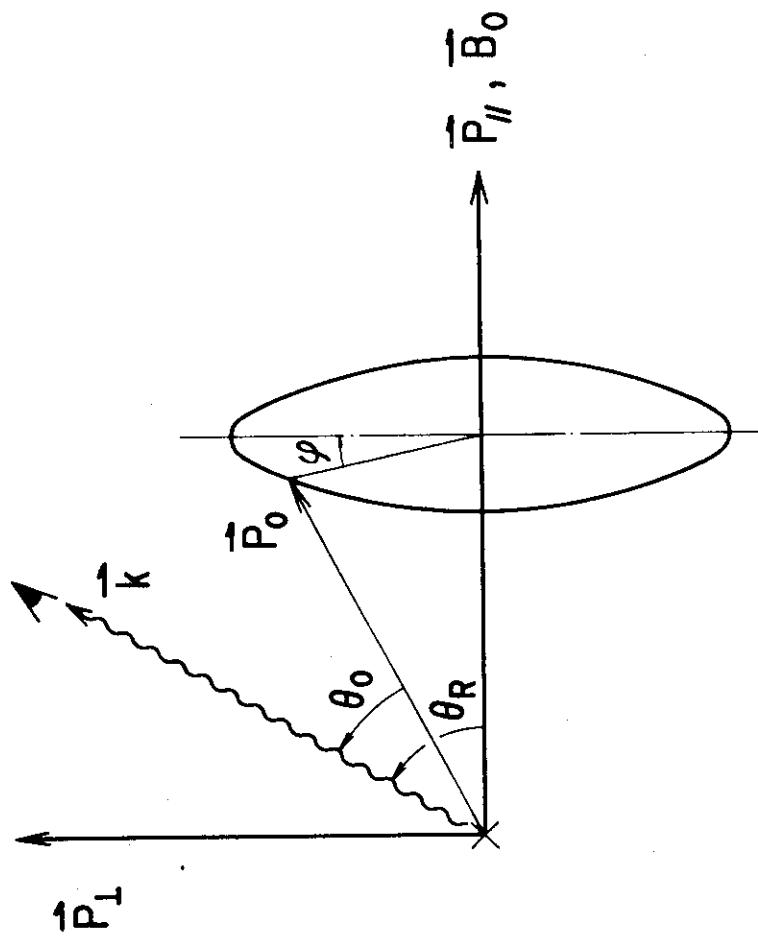
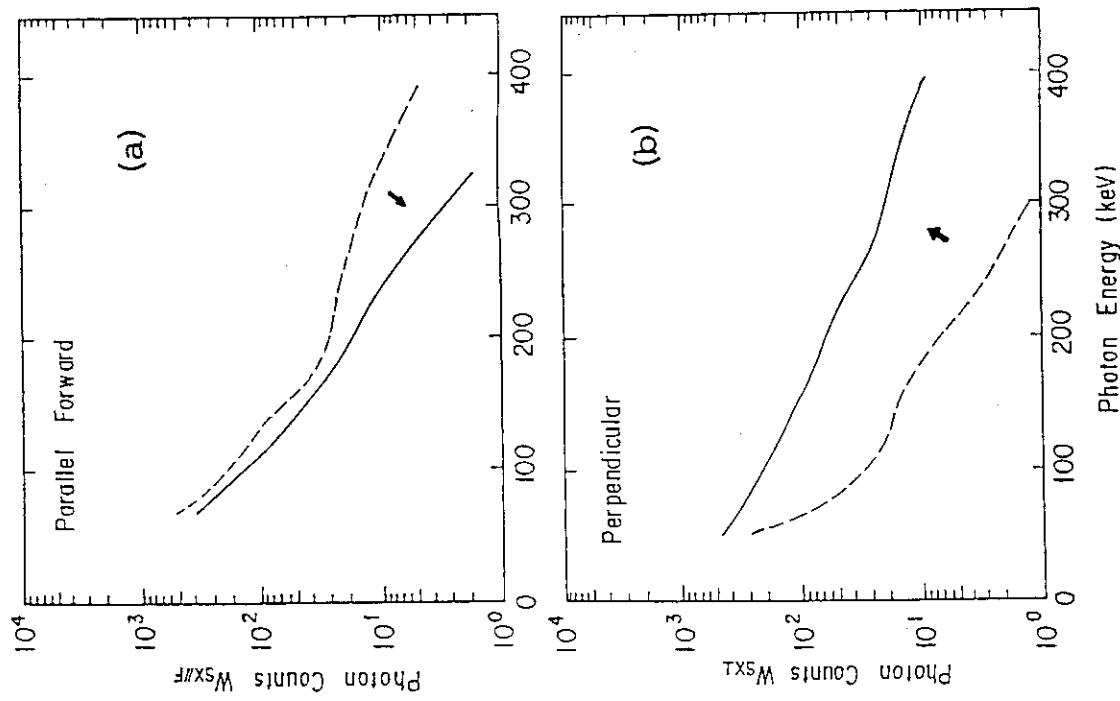


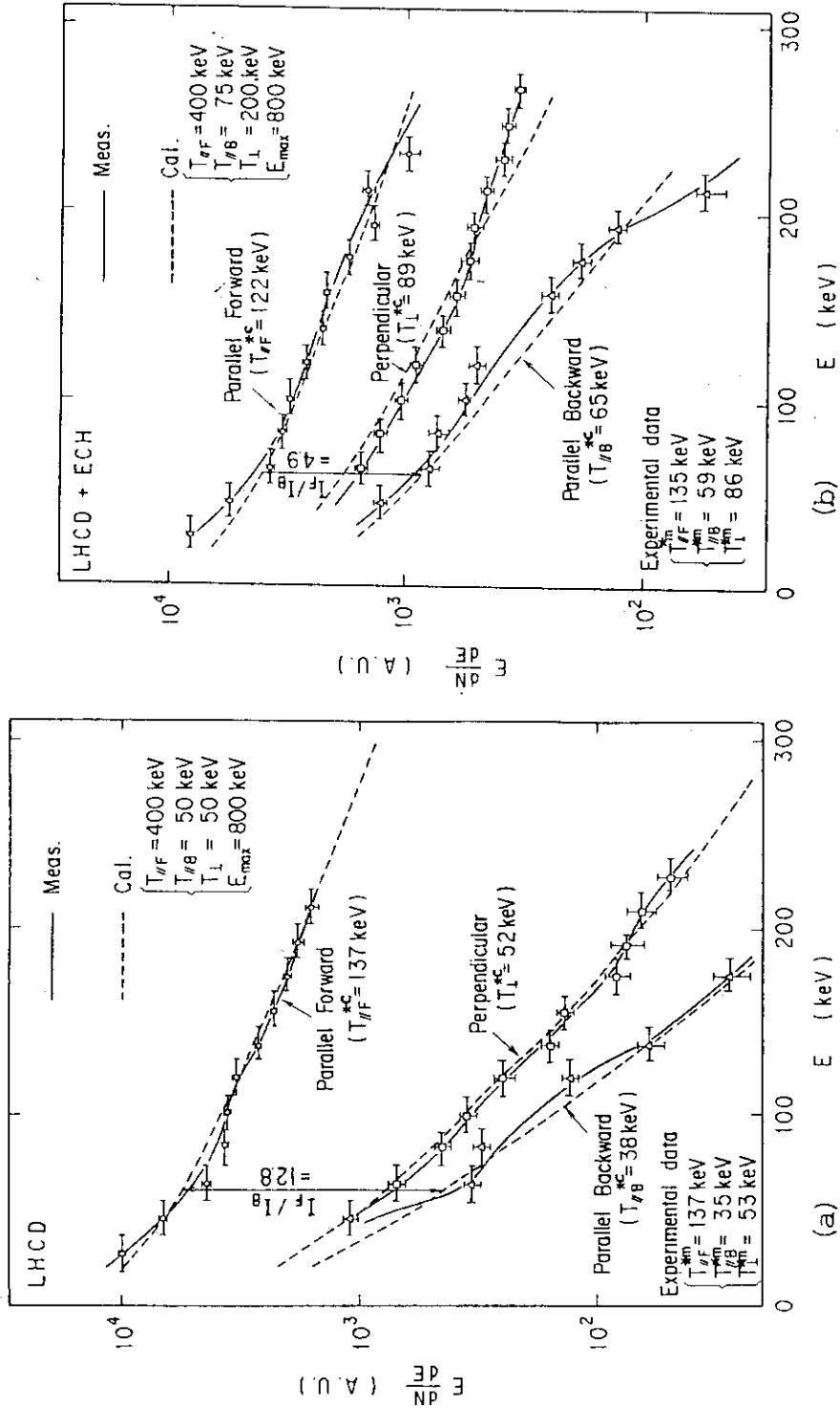
図9図 トロイダル磁場な対する電子サイクロトロン波の  
共鳴エネルギー、および屈折率  $N_r$  の依存性



第12図 運動量空間における軟X線放射のベクトル関係図  
外部磁場  $\vec{B}_0$ 、入射電子の運動量  $\vec{P}_0$ 、および放射光子の運動量  $\vec{k}$  の方向を示す。



第11図 緩和振動不安定性発生前後 10 (msec) 間の(a)水平前方と(b)垂直の軟X線放射スペクトラムの変化  
破線が発生前で、実線が発生後を示し、それぞれ5放電の平均値である。

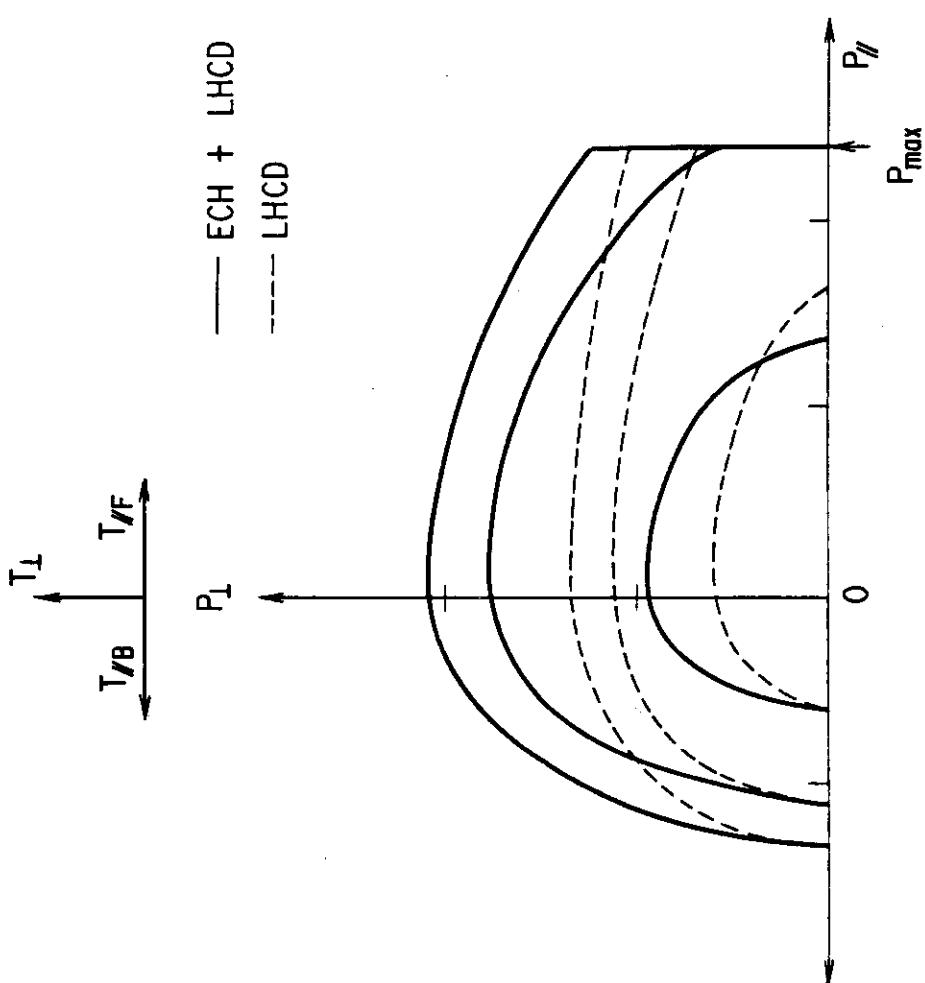


第13図 3方向軟X線放射スペクトラムの実測データとモデル計算の比較  
 実線は実測データを、破線はモデル計算値を示す。

(a) LHCDのみの場合

(b) LHCD+ECHの場合

計算によるスペクトラムの傾きからもとめた勾配温度には \*印, 実測値のそれには \*印を付けて示してある。速度分布関数のパラメーターは, LHCDのみの場合  $T_{\parallel F} = 400$  (keV),  $T_{\parallel B} = 50$  (keV),  $T_{\perp} = 50$  (keV),  $I_F = I_B$ ,  $I_{\text{Max}} = 12.8$  である。ECHを加えた場合それぞれ  $400$  (keV),  $75$  (keV),  $200$  (keV),  $800$  (keV), および  $4.9$ となる。ECH印加時に効果的に高速電子の垂直方向エネルギーが増加している。



第14図 3温度モデルより推定した高速電子の速度空間における速度分布。  
 実線はLHCD+ECH、破線はLHCDのみを示す。  
 LHCDのみで高速電子の電流駆動方向に強い非等方分布になつており、  
 さらにECHを加えた場合高速電子の垂直成分が増加する。

## 付録 運動量の緩和時間

モデルプラズマとして2成分電子温度プラズマを考える。低温成分は大多数の電子を含むバルク成分とし、電子温度を  $T_{eb}$ 、電子密度を  $n_{eb}$  とする。高温成分は小数の電子を含むいわゆるテール成分とし、電子温度を  $T_{et}$ 、電子密度を  $n_{et}$  とする。

ここではテール成分電子の運動量の緩和時間  $\tau_{\perp ee}|_t$  を評価する。通常のクーロン衝突の場の粒子としてバルク成分をとり、テスト粒子としてテール成分をとればよいから、

$$\tau_{\perp ee}|_t = \frac{3^{1/2} 6 \pi \epsilon_0^2 m_e^{1/2} T_{et}^{3/2}}{n_{eb} e^4 \ln A} \quad (A-1)$$

但し、 $\ln A$ についても場の粒子とテスト粒子が異なることを考慮して

$$\ln A = 7 + 2.3 \log_{10} \left( \frac{T_{eb}^{1/2} T_{et}}{(n_{eb}/10^{20})^{1/2}} \right) \quad (A-2)$$

とする。<sup>24)</sup>

JFT-2Mの電流駆動の典型的放電条件 ( $T_{eb} = 1$  (keV),  $T_{et} = 100$  (keV),  $n_{eb} = 4 \times 10^{18}$  (m<sup>-3</sup>),  $n_{et} = 4 \times 10^{15}$  (m<sup>-3</sup>), において、クーロン対数は  $\ln A = 24$  になり、緩和時間は,  $\tau_{\perp ee}|_t = 78$  (m sec) となる。