

## TRIAM-1M電流駆動プラズマにおけるHot Ionの生成と振る舞い

富岡, 修一  
九州大学大学院総合理工学研究科

凶子, 秀樹  
九州大学応用力学研究所 : 教授

中村, 一男  
九州大学応用力学研究所

牧野, 賢一  
九州大学応用力学研究所

他

<https://doi.org/10.15017/4744054>

---

出版情報 : 応用力学研究所所報. 84, pp. 53-65, 1998-10. 九州大学応用力学研究所  
バージョン :  
権利関係 :

# TRIAM-1M 電流駆動プラズマにおける Hot Ion の生成と振る舞い

富岡 修一\*<sup>1</sup> 関子 秀樹\*<sup>2</sup> 中村 一男\*<sup>2</sup>  
 牧野 賢一\*<sup>2</sup> 中島 寿年\*<sup>2</sup> 川崎 昌二\*<sup>2</sup>  
 上瀧 恵里子\*<sup>2</sup> 花田 和明\*<sup>2</sup> 坂本 瑞樹\*<sup>2</sup>  
 佐藤 浩之助\*<sup>2</sup> 伊藤 智之\*<sup>2</sup>

## Hot Ion Behavior in TRIAM-1M Current Driven Plasmas

Shuichi TOMIOKA, Hideki ZUSHI, Kazuo NAKAMURA,  
 Ken-ichi MAKINO, Hisatoshi NAKASHIMA, Shoji KAWASAKI,  
 Eriko JOTAKI, Kazuaki HANADA, Mizuki SAKAMOTO,  
 Konosuke SATO and Satoshi ITOH

### Abstract

Hot ions with temperature above 2keV have been observed in 2.45GHz LHCD plasmas. A sudden transition occurs, at which ion temperature is significantly increased. It is found that the occurrence conditions of this transition depend on the density and plasma position. Production and confinement of these hot ions are investigated.

**Key words :** Hot Ion, Ripple

## 1. 序 論

今日我々は、先進国におけるエネルギーの大量消費および発展途上国におけるエネルギー消費量の急激な上昇等により、石油、石炭等のエネルギー資源の枯渇の問題、原子力発電において発生する放射性廃棄物の処理問題、CO<sub>2</sub>等による地球温暖化の問題等、エネルギーおよび環境に関連した様々な問題をかかえている。そのため人類の究極のエネルギー源である制御熱核融合が現在世界中で研究されている。制御熱核融合発電は、発電に重水素や三重水素等を用い、重水素は海水から取り出すことができるためもし重水素のみによる発電が可能となれば資源の枯渇の問題は大幅に解消される。また放射性廃棄物やCO<sub>2</sub>等の排出量も現在行われている発電方法に比べてけた違いに小さい等の様々な利点を持っている。

制御熱核融合の研究は第二次大戦後、米国、旧ソ連、

1998年5月28日 受理

\*1 九州大学大学院 総合理工学研究科(現在、新日本製鐵株式会社)

\*2 九州大学応用力学研究所

英国等で開始され、環状形、開放端系の様々な磁場閉じ込め型の実験装置が開発された。しかし最初の期待に反して多くの困難な問題に直面した。またそれらの実験装置は、高温プラズマの閉じ込め時間が非常に短いため核融合の達成条件から程遠いものであった。旧ソ連(現在のロシア共和国)のクルチャフ原子力研究所のアルチモビッチらのグループによって1950年代より開発が進められてきたトカマクは、1968年にトカマク T-3 装置によって電子温度 1keV のプラズマを数 ms 閉じ込めることに成功し、その優秀性が認められて以来、磁場閉じ込め型制御熱核融合研究の主流となった<sup>1)2)</sup>。核融合を実現するためには、イオン温度が 10keV、密度が  $10^{20}\text{m}^{-3}$  のプラズマを約 1 秒間閉じ込めるというローソン条件を満たさなければならない。三大トカマクと呼ばれる JT-60U (日本)、TFTR (アメリカ)、JET (EU ヨーロッパ連合) においては炉心プラズマ生成実験が行われ、ローソン条件に非常に近い値が得られており、核融合の科学的可能性を実証している<sup>3)~5)</sup>。また現在、日、米、EU、ロシアの 4 極を中心にして ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor : 国際熱核融合実験炉) が設計

中である。ITER は長時間の核燃焼(自己点火)の実現を目指すいわゆる次期核融合研究の中核装置であり、世界中の機関が協力している。

現在のトカマクの実験研究は、炉心プラズマ実現に向けてのプラズマのエネルギー閉じ込め特性向上の研究、トカマクの定常運転の研究、燃料補給・排気や不純物が問題となるプラズマ・壁相互作用の研究が大きな柱となっている。九州大学応用力学研究所の超伝導強磁場トカマク TRIAM-1M においては、昭和62年から低域混成波による長時間電流駆動実験が行われているが、平成元年にはプラズマ電流を一時間以上維持するトカマクの長時間運転の実証に成功し、将来のトカマク型装置の定常運転に対して展望を開いた。

高温プラズマ中のイオンのエネルギー分布またはイオン温度を知ることは、核融合がイオン温度に支配されることから非常に重要であるため TRIAM-1M では中性粒子エネルギー分析器により、イオン温度の計測を行っている。中性粒子エネルギー分析器の概要については、第2章で述べる。計測の結果、2.45GHz LHCD 長時間放電において、2keV をこえる高いイオン温度が観測された。この高いイオン温度は突然の遷移によって起こり、またその遷移は、電子密度およびプラズマ水平位置が特定の領域にある場合にしか起こ

らなかった。この高いイオン温度への遷移現象や Hot Ion の生成と閉じ込めに関しては、第3章で述べる。最後にまとめと今後の課題を第4章に示す。

## 2. 中性粒子エネルギー分析器<sup>6)</sup>

### 2.1 測定原理

中性粒子エネルギー分析器の測定方法の原理はプラズマ中のイオンが中性原子と衝突し、そのエネルギーをほとんど変化することなく中性粒子になって、磁場に捕捉されることなしに放出される現象を利用することである。ここでプラズマ中でおこる共鳴的な電荷交換反応(水素イオン+水素原子反応)によって発生した中性粒子は、それが生成されたイオンのエネルギーに等しく、かつその方向も保たれている。この様にしてプラズマ外へ放出された中性粒子のエネルギーを分析することにより、プラズマ中のイオンのエネルギースペクトルを知ることができる。このときイオンのエネルギーがマクスウエル分布をしている場合にはさらにイオン温度も知ることができる。

イオンのエネルギーが、温度  $T_i$  のマクスウエル分布をとるとき、プラズマから放出されて検出装置の入り口へ入るエネルギー  $E \sim E + \Delta E$  の高速中性粒子の

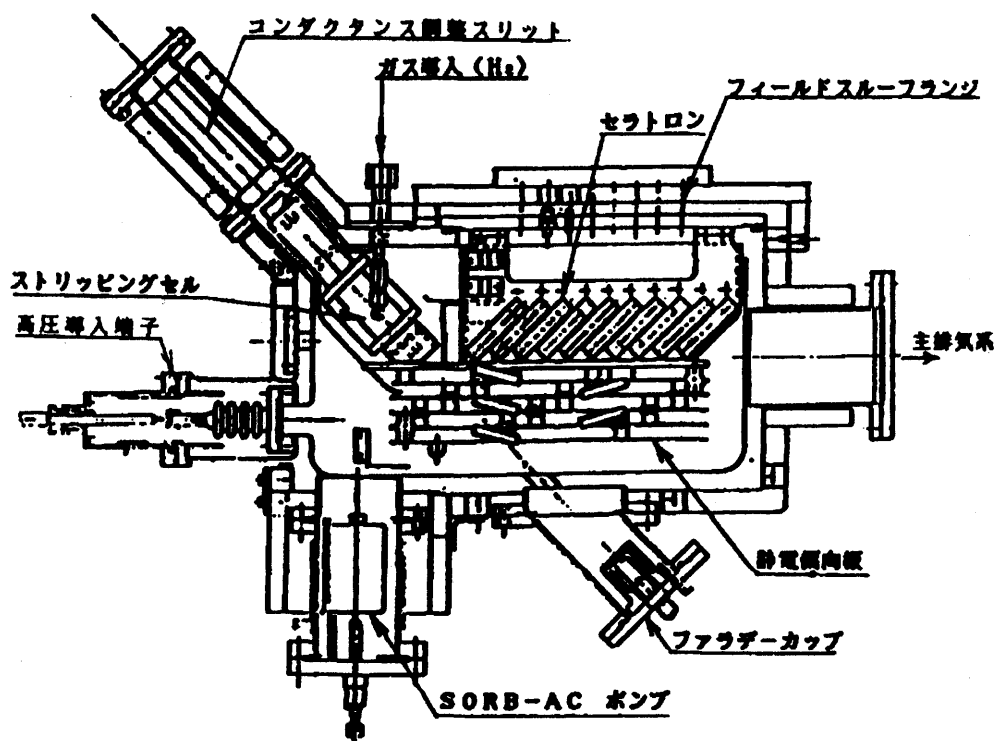


Fig. 2-1 Components of the neutral particle energy analyzer for perpendicular measurement

数は次式で表される。

$$\frac{dN}{dt} = \int n_0 n_i f_{Max}(T_i, E) \sigma v \left( \frac{\Delta E}{E} \right) E \frac{\Delta \Omega}{4\pi} S dl \quad (2-1-1)$$

$$f_{Max}(T_i, E) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\sqrt{E}}{(kT_i)^{3/2}} \exp\left(-\frac{E}{kT_i}\right) \quad (2-1-2)$$

ここで  $n_0$ 、 $n_i$  は、プラズマの単位体積あたりの全エネルギー中性粒子密度およびイオン密度、 $T_i$  はイオン温度、 $\sigma$  は荷電交換断面積、 $\Delta \Omega$  はプラズマからみた検出装置の立体角、 $S$  は検出器から見たプラズマの平均的視野面積で、視線 ( $dl$ ) に沿って積分している。

実際に検出されるのは、ストリッピングセル内を通

過するとき外殻電子を失い再びイオンに戻った粒子であるので、その粒子数はさらにストリッピングセルの効率  $\eta$  をかけた値となる。ストリッピングセルの効率は

$$\frac{I_1}{I_0} = \frac{\sigma_{01}}{\sigma_{01} + \sigma_{10}} [1 - \exp(-cP_{sc}(\sigma_{10} + \sigma_{01})l_{sc})] \quad (2-1-3)$$

で表せる。ここで  $I_0$  はストリッピングセルの入り口前での中性粒子数、 $I_1$  はストリッピングセル内で荷電交換して出てきたイオン数、 $\sigma_{01}$  は  $H_0$  が  $H^+$  にかわる断面積 ( $cm^2$ )、 $\sigma_{10}$  は  $H^+$  が再び荷電交換して  $H_0$  に戻る断面積 ( $cm^2$ )、 $P_{sc}$  はストリッピングセルの封入圧力

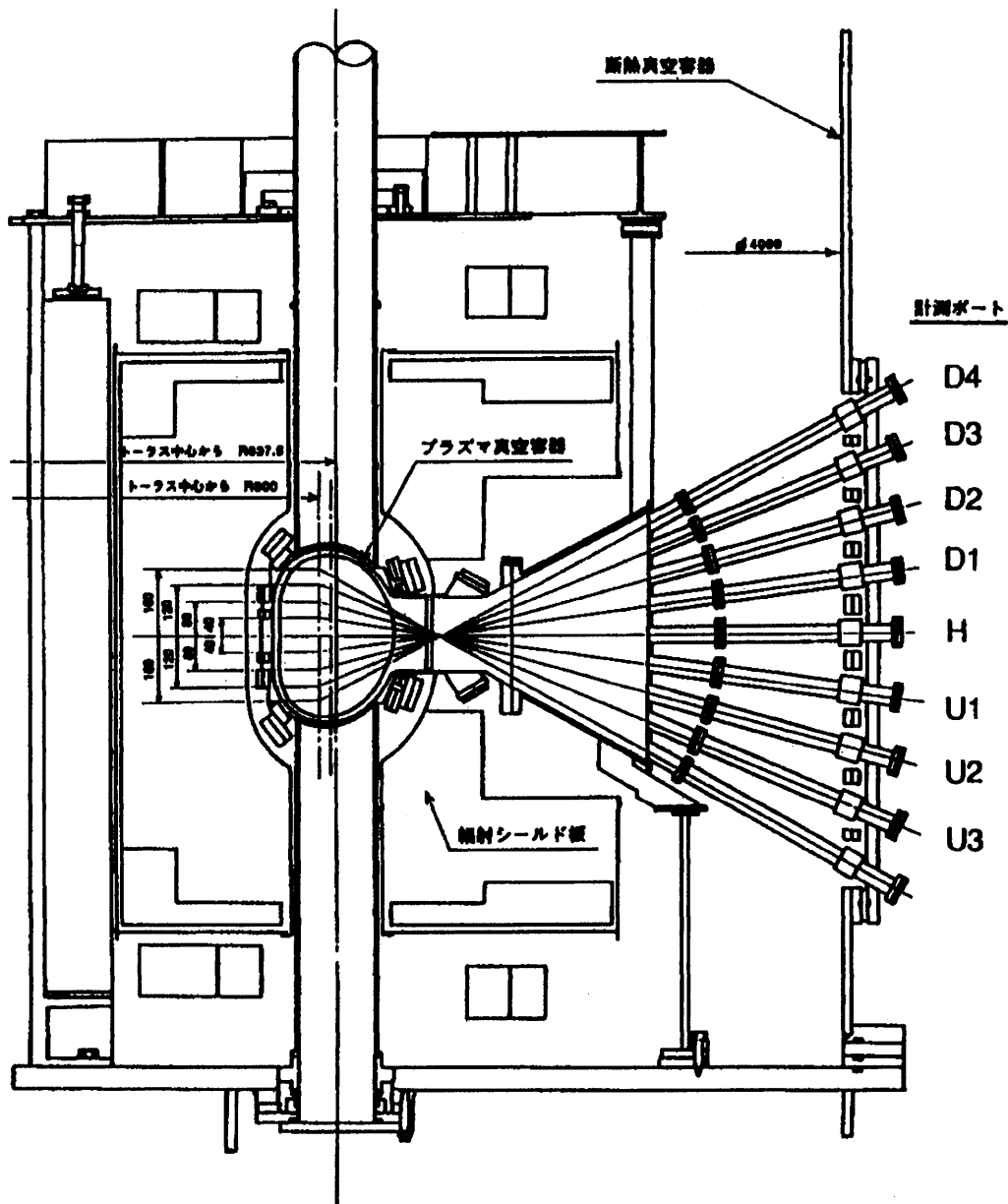


Fig. 2-2 Viewing chords of the neutral particle energy analyzer for perpendicular measurement

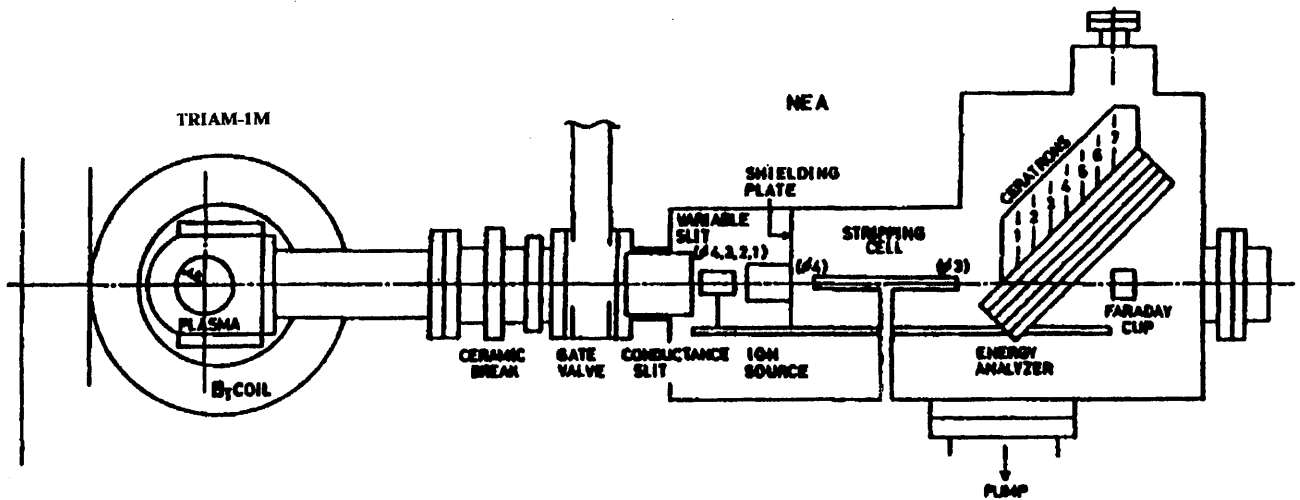


Fig. 2-3 Components of the neutral particle energy analyzer for tangential measurement

(Torr)であり、 $l_{sc}$ はストリッピングセルの有効の長さ (cm) である。

検出器に入ったイオンは45度に傾けられた静電アナライザーに入射され、エネルギーによるイオンの軌道の違いを利用してエネルギー分析を行う。

2.2 法線方向測定用中性粒子エネルギー分析器

TRIAM-1M の法線方向測定用中性粒子エネルギー分析器は、Fig. 2-4 に示すように配置されており  $V_{II} \sim 0$  のリップルに捕捉されたイオンのみを選択的に測定している。

法線方向測定用の分析器は、一放電中に垂直方向8点の空間分布とその時間変化が同時計測可能な、多チャンネル静電型中性粒子エネルギー分析器を設置している。 $R=0.80m$ での測定コードの高さは、真空容器中心を0とした時0mm,  $\pm 40mm$ ,  $\pm 80mm$ ,  $\pm 120mm$ ,  $-160mm$ である。エネルギー分析器内にはイオン検出器であるセラトロンが26mm間隔で10個配置されている。静電偏向板の印加電圧を変化させることにより測定エネルギーは0.1~20keVの範囲で設定が可能である。

Fig. 2-1 に法線方向測定用中性粒子エネルギー分析器の構成図を、Fig. 2-2 にその測定方向を示す。

2.3 接線方向測定用中性粒子エネルギー分析器<sup>7)</sup>

接線方向測定用中性粒子エネルギー分析器はリップルに捕捉されていないイオンを測定することにより、イオン温度の等方性を調べる目的で TRIAM-1 で使用していた中性粒子エネルギー分析器を Fig. 2-4 に示すように、接線方向測定用ポートに設置したものである。

接線方向測定用の中性粒子エネルギー分析器は、イオン検出器であるセラトロンが7つ配置されている。静電プレートには5 kV程度の電圧をかけることができ、印加電圧を変化させることにより0.1keV~0.5 keVまでのイオンの検出が可能である。またストリッピングセルの長さは20cmであり、実験時には水素ガスを $4 \times 10^{-4}$ Torr 充填した。

Fig. 2-3 に接線方向測定用中性粒子エネルギー分析器の構成図を、Fig. 2-4 に中性粒子エネルギー分析器の配置図を示す。

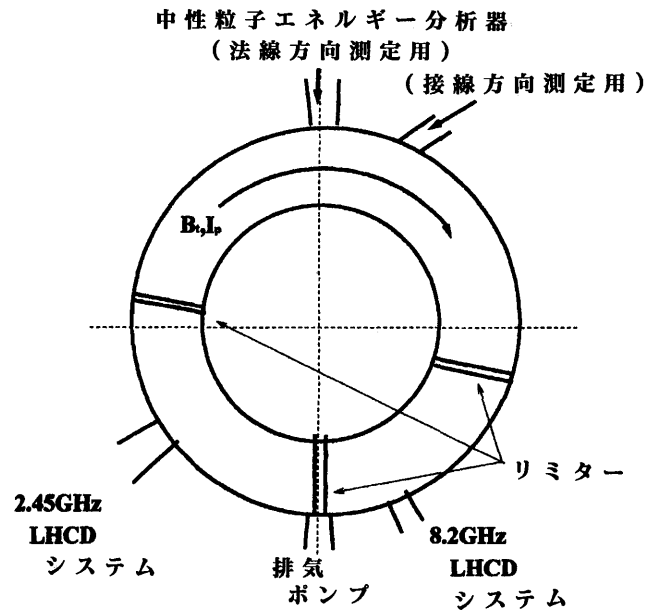


Fig. 2-4 The layout of the neutral particle energy analyzers

### 3. Hot Ion の生成と閉じ込め

TRIAM-1M における低密度電流駆動プラズマにおいて高イオン温度が観測された。この高いイオン温度は突然の遷移によって起こり、またその遷移は、電子密度およびプラズマ水平位置が特定の領域にある場合にしか起こらなかった。この章ではこの高いイオン温度への遷移現象や Hot Ion の生成と閉じ込めについて述べる。

#### 3.1 各放電における特徴

##### 3.1.1 オーミック放電

オーミック放電における典型的な2つの例を示す。これは密度とともにスペクトルが変化の様子を調べるために行った実験において得られたものである。実験条件は、 $B_t=7T$ ,  $\bar{n}_e=2.3 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$  (高密度)、 $\bar{n}_e=1.0 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$  (低密度) である。

Fig. 3-1 は数ショットを重ね合わせることにより収集されたイオンのエネルギースペクトルを示したものである。密度を下げることでイオンのスペクトルにテイルが形成されていることがわかる。通常オーミック放電では電子との衝突によってイオンはエネルギーを得るので低密度では高温にはなり得ないため、高エネルギーイオンを生成する何らかの機構が存在すると考えられる。

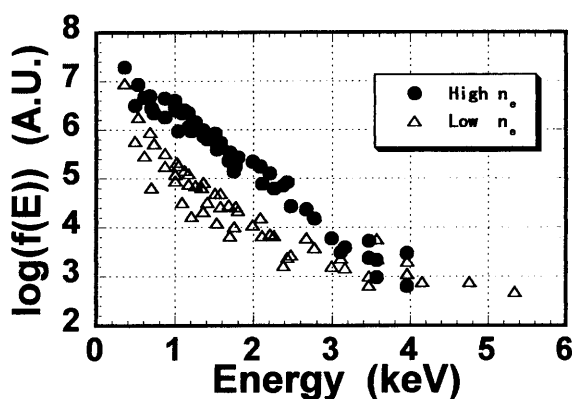


Fig. 3-1 Ion energy spectrum (in an OH plasma)

##### 3.1.2 8.2GHz LHCD 放電

8.2GHz LHCD 放電における典型的なイオン温度の時間変化を Fig. 3-2 に、その時のイオンのエネルギースペクトルを Fig. 3-3 に示す。実験条件は、 $B_t=7T$ ,  $\bar{n}_e=1.0 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$  である。

Fig. 3-2 および Fig. 3-3 よりわかるように、8.2GHz LHCD 放電において、イオン温度は 0.2keV 程度であ

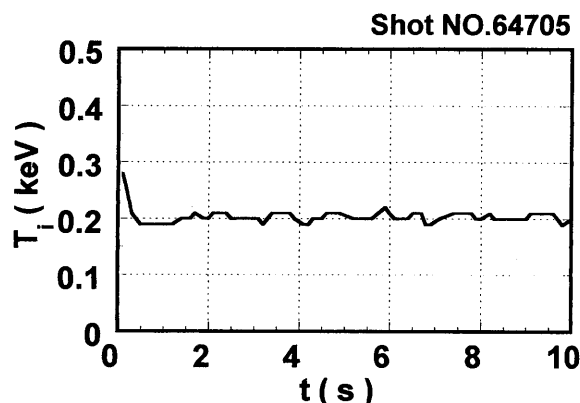


Fig. 3-2 Time evolution of the ion temperature (in an 8.2GHz LHCD plasma)

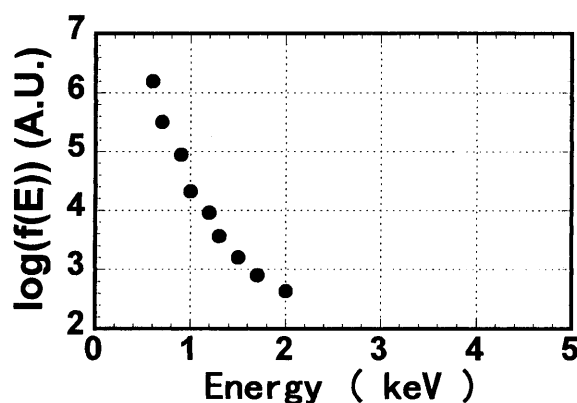


Fig. 3-3 Ion energy spectrum (in an 8.2GHz LHCD plasma)

った。また時間的にはほぼ一定であり明確なテイルの存在は確認されなかった。また、8.2GHz LHCD 放電時においては、密度が高いにもかかわらず、荷電交換中性粒子の計測数が少なかった。この原因としては、プラズマ周辺部におけるイオンの密度が高いために、再荷電交換反応を起こしプラズマ外に出て来られなくなったため、またはイオン温度が低いために高エネルギー領域の荷電交換中性粒子束が極端に少なくなった等が考えられる。

##### 3.1.3 2.45GHz LHCD 放電

2.45GHz LHCD 放電における典型的なイオン温度の時間変化を Fig. 3-4 に、またイオンのエネルギースペクトルを Fig. 3-5 に示す。実験条件は、 $B_t=6T$ ,  $\bar{n}_e=2.0 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$  である。

Fig. 3-4 より明らかのように、2.45GHz LHCD 放電時にはイオン温度の急激な増加(減少)が見られる。また、こういった現象がみられたときのイオンのエネルギースペクトルを確認すると、Fig. 3-5 が示すよう

にスペクトルが直線上にのっており、一部の高エネルギーイオンのみでなくバルクのイオンが加熱されていると考えられる。2.45GHz LHCD 放電時に見られる、

このイオン温度の急激な変化について、次章以降で詳述する。

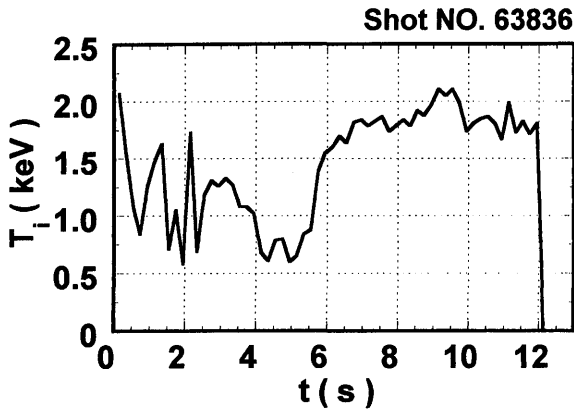


Fig. 3-4 Time evolution of the ion temperature (in an 2.45GHz LHCD plasma)

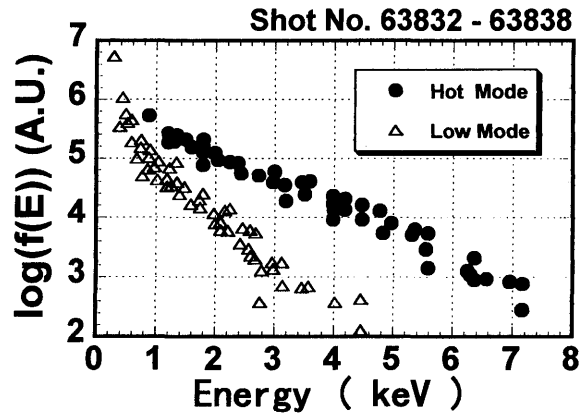


Fig. 3-5 Ion energy spectra (in an 2.45GHz LHCD plasma)

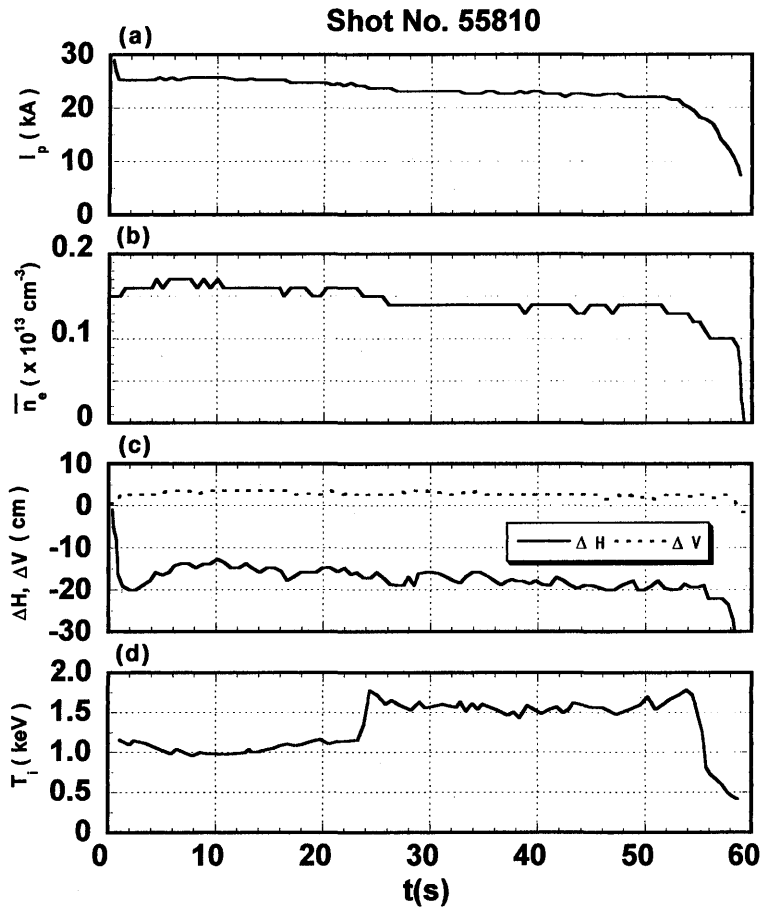


Fig. 3-6 Transition to the Hot Ion Mode  
(a) plasma current, (b) line-averaged electron density, (c) horizontal and vertical displacement of plasma position, (d) ion temperature

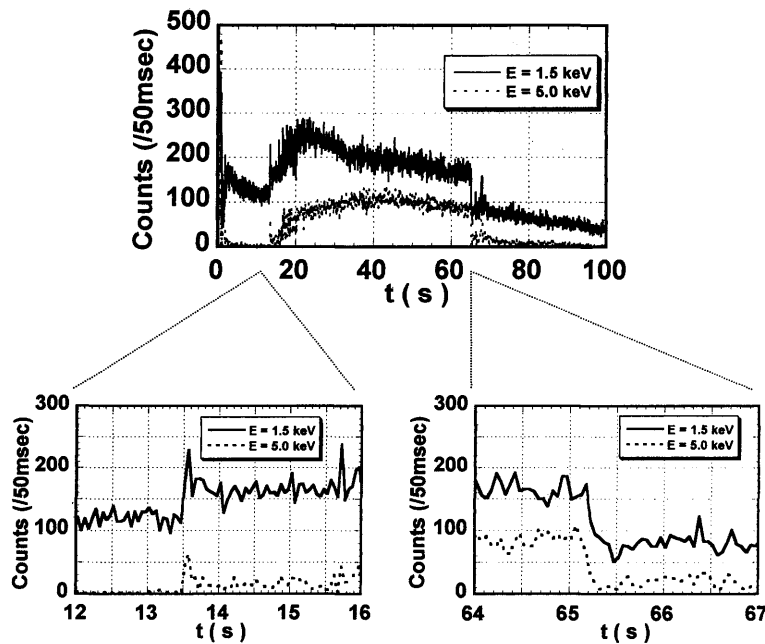


Fig. 3-7 Time evolution of the neutral particle flux

### 3.2 Hot Ion Mode

#### 3.2.1 Hot Ion Mode への遷移現象

ここでは、3.1.3で示した2.45GHz LHCDプラズマにおけるイオン温度の急激な変化（遷移現象）について述べる。

Fig. 3-6はプラズマ電流、電子密度、 $R=840\text{mm}$ を基準としたプラズマ水平位置の変位 $\Delta H$ 、赤道面からの垂直位置の変位 $\Delta V$ 、およびイオン温度の時間変化の一例を示したものである。この時の放電条件は、 $B_t=6\text{T}$ 、Limiter放電である。このショットにおいて、時刻 $t=24\text{s}$ 前後にイオン温度が突然 $1.2\text{keV}$ から $1.7\text{keV}$ まで上昇し、その後ほぼ26秒間放電終了まで高温を維持している。このイオン温度が急激に変化する時刻に、わずかなプラズマ電流および電子密度の減少が確認されるが、プラズマ水平位置はほとんど変化しなかった。

この例の様に、Hot Ion Modeが現われるほとんどの放電において、その遷移時にプラズマ電流、電子密度、プラズマ水平位置が劇的に変化する例は確認されなかった。しかし、実験を行っていく段階において、このイオン温度の急激な変化は、電子密度およびプラズマ水平位置の変位が特定の範囲内にあるときにしか出現しないことが確認されたので、イオン温度の電子密度依存性およびプラズマ水平位置依存性について調べた。この点については、3.2.3および3.2.4において述べる。

またプラズマ内部においてどのようなことがおこっ

ているかを理解するために荷電交換中性粒子束の時間発展をFig. 3-7に示す。エネルギーは $1.5\text{keV}$ および $5.0\text{keV}$ である。図よりわかるように、このショットにおいて高温状態を保っている期間は $t\sim 13\text{sec}$ より $t\sim 64\text{sec}$ であり、遷移、逆遷移は突発的に起こっていることがわかる。また $H_\alpha$ はこの時間特に変化していないので、荷電交換中性粒子束の変化は高速イオンそのものの変化を反映しているとみなせる。

#### 3.2.2 Hot Ion Mode 時のイオン温度空間分布

TRIAM-1Mの法線方向測定用中性粒子エネルギー分析器は、4 cm 間隔でしか空間分布を測定すること

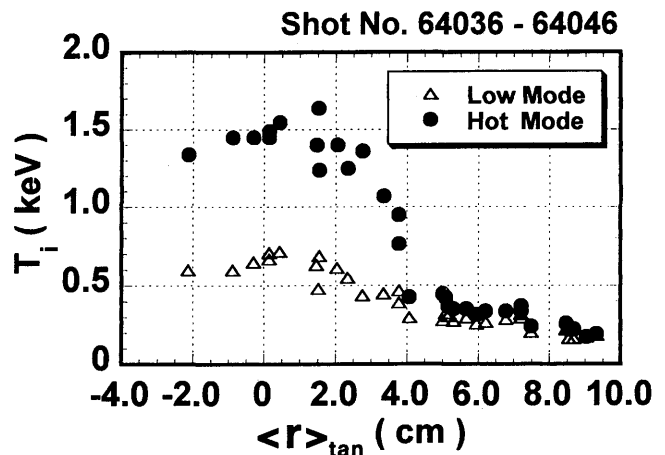


Fig. 3-8 Profile of the ion temperature in the Hot Ion Mode



ができないので、プラズマ垂直位置を上下に  $\pm 2.5\text{cm}$  の幅で変位させることにより、Hot Ion 生成時のイオン温度空間分布を詳細に測定した。その結果を Fig. 3-8 に示す。ここで  $\langle r \rangle_{\text{tan}}$  は接線半径である。この図より明らかなように、Hot Ion 生成時には  $\langle r \rangle_{\text{tan}} = 4.0\text{cm}$  付近に強い温度勾配が形成されている。この理由として、加熱と同時に内部輸送障壁が形成され、それにより内部の閉じ込めも改善されていると考えられる。

またここには示さないが、一放電中にこの内部輸送障壁が  $\langle r \rangle_{\text{tan}} = 4.0\text{cm}$  から  $2.0\text{cm}$  まで移動する現象が確認され、プラズマ内部で閉じ込めの状態を変える何らかの変化が起こっていることが示唆される。

### 3.2.3 Hot Ion Mode の電子密度依存性

ガスパフを変調すると、イオン温度の強い変化が計測される場合が観測された。Fig. 3-9 にその一例を示す。図において、上からピエゾバルブへの印加電圧、

電子密度、プラズマ電流、イオン温度のそれぞれ時間変化を示している。この時の実験条件は、 $B_z = 6\text{T}$ 、Limiter 放電である。ピエゾバルブへの印加電圧は密度を一定に保つために放電開始後 4 秒間は一定とし、その後周波数  $1\text{Hz}$  でサイン波状に掃引した。ガスは放電管の下部より入射される。Fig. 3-9 より、電子密度の周期がピエゾバルブへの印加電圧の周期に対して若干遅れていることが確認されるが、これはピエゾバルブからガスがプラズマに供給されるまでの時間の遅れと考えられる。結果はガスパフを変調することにより、電子密度は  $\pm 15\%$  程度の範囲で変化した。プラズマ電流は密度の変化のためか若干の変化を示したが、その変化は電子密度の変化の  $1/10$  程度であった。ここには示さないが、この条件下においてプラズマ電流中心位置は水平方向に最大約  $3\text{mm}$ 、垂直方向に最大約  $1\text{mm}$  変化した。イオン温度は図からもわかるように

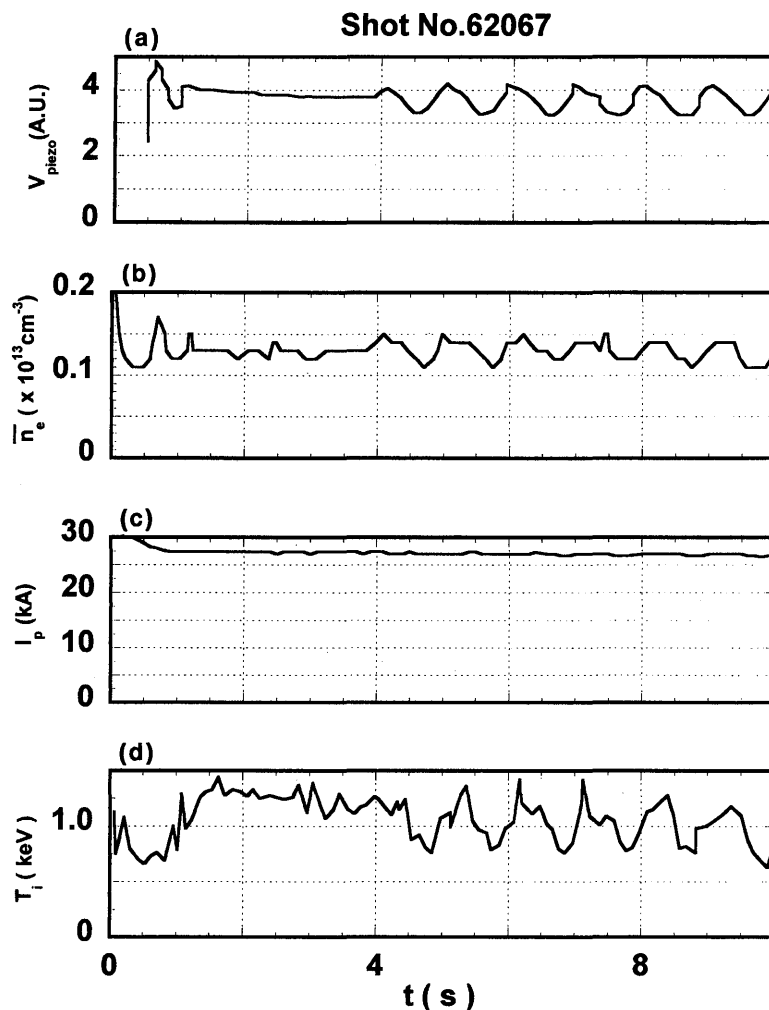


Fig. 3-9 Response of the ion temperature to gas puffing rate  
(a) applied voltage to the piezo valve, (b) line-averaged electron density, (c) plasma current, (d) ion temperature

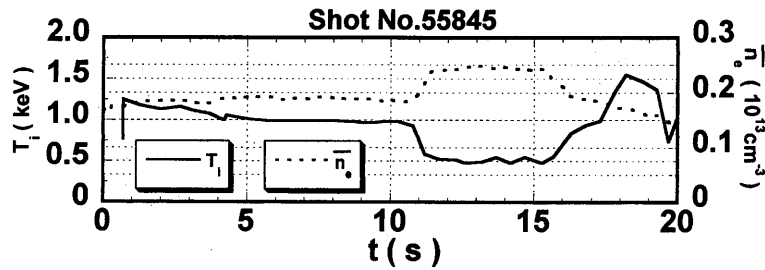


Fig. 3-10 Time evolution of the ion temperature in the case of pulsed gas feed

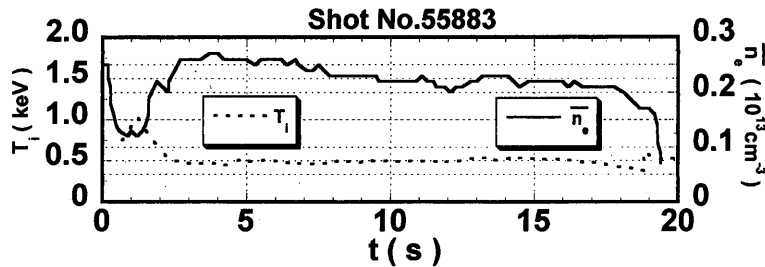


Fig. 3-11 Time evolution of the ion temperature in the case of the maintenance of high electron density

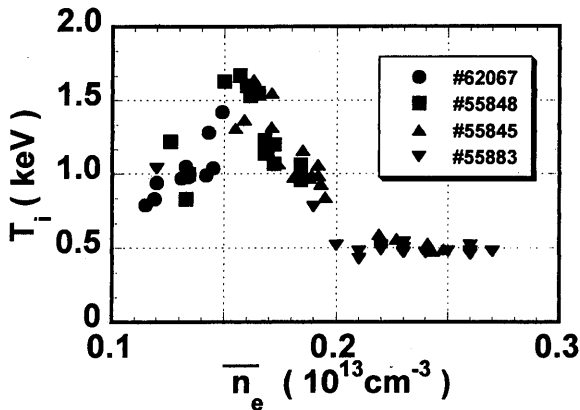


Fig. 3-12 Dependence of the ion temperature on the electron density

±30% 以上の変化を示し、強いガスパフ入射応答性を示した。イオン温度の変化は密度の変化とほぼ同位相であり、密度の上昇とともに増加し密度が減少し始めると急激に低下した。

次に定常的に密度を維持した場合の実験結果を示す。Fig. 3-10 はある定常状態からガスを4秒間注入した場合の、電子密度およびイオン温度の時間変化を示したもので、これは密度の異なる2つの定常状態を調べたことに相当すると思われる。図よりわかるようにイオン温度は密度の増加に従い低下し、密度が初期値に回復するとイオン温度も回復した。また Fig. 3-11 に、ガスパフにより定常的に高密度を保った例について示

す。Fig. 3-11 よりわかるように電子密度を高く保った放電においては、イオン温度は低温を維持するのみであった。

以上のように、電子密度に対してイオン温度は極めて敏感であることが判明し、また高温になりうる密度領域が存在するように思われたため、それを定量的に表すために先程のデータも含めて、幾通りかの密度に対してイオン温度と電子密度の関係をまとめた。その結果を Fig. 3-12 に示す。

この図より、 $\bar{n}_e = 1.5 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$  付近でイオン温度は最高となっており、電子密度が高すぎても、低すぎても高イオン温度とは成り得ないことがわかった。

以上をまとめると、Hot Ion Mode 生成のための密度領域は以下の通りとなる。

$$1.2 < \bar{n}_e < 1.8 (\times 10^{12} \text{cm}^{-3})$$

### 3.2.4 Hot Ion Mode のプラズマ水平依存性

映像処理を用いてプラズマ位置制御を行った放電と、行わなかった放電を比較検討した結果、イオン温度はプラズマ水平位置の変位に対しても非常に敏感であることがわかり、イオン温度のプラズマ水平位置依存性について調べた。Fig. 3-13 はプラズマ水平位置を人為的に変調したときのイオン温度の時間変化を示したものである。このときの実験条件は、 $B_t = 6 \text{T}$ , Limiter 放電である。この放電において、プラズマ水平位置は放電開始10秒後より、周期10秒にてサイン波状に掃引

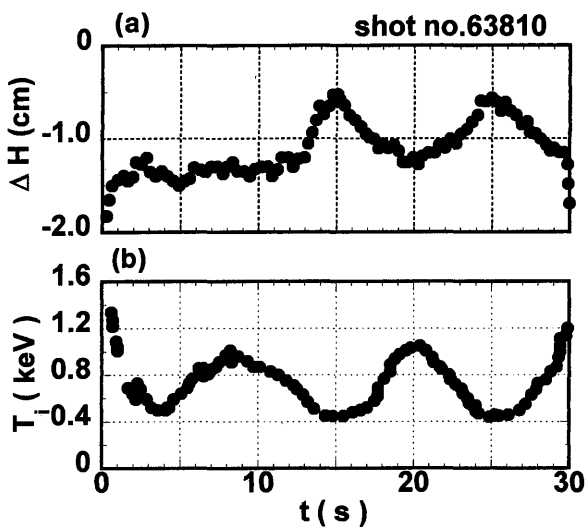


Fig. 3-13 Response of the ion temperature to the horizontal position of plasma  
(a) horizontal displacement of plasma position, (b) ion temperature

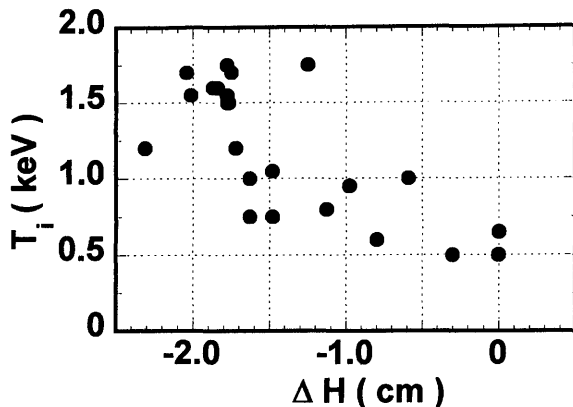


Fig. 3-14 Dependence of the ion temperature on the horizontal position of plasma

している。

Fig. 3-13 より、プラズマ水平位置がある点より内側にあるときにはイオン温度は高温となり、外側にあるときには低温となっていることがわかる。

電子密度と同様に、イオン温度はプラズマ水平位置にも極めて敏感なことが判明したので、それについても定量的に表すために幾通りかの放電においてイオン温度のプラズマ水平位置に対する依存性を求めた。その結果を Fig. 3-14 に示す。

この図より、イオン温度はプラズマ水平位置の変位 ( $\Delta H$ ) が  $-1.6\text{cm}$  より内側にあるときには高温と成り得るが、外側にあるときは高温に成り得ることが困難であることがわかった。

以上をまとめると、Hot Ion Mode 生成のための、プラズマ水平位置の領域は以下の通りとなる。

$$\Delta H < -1.6 \text{ (cm)}$$

### 3.2.5 Hot Ion Mode の長時間維持

前節まで述べてきたように、Hot Ion Mode は電子密度およびプラズマ水平位置がある領域に入っていないとおこりえないことがわかったので、電子密度とプラズマ水平位置を最適領域に制御することにより、Hot Ion Mode を長時間維持することを試みた。その結果、Fig. 3-15 に示すように  $2.0\text{keV}$  をこえる高いイオン温度を 1 分間以上維持することに成功した。

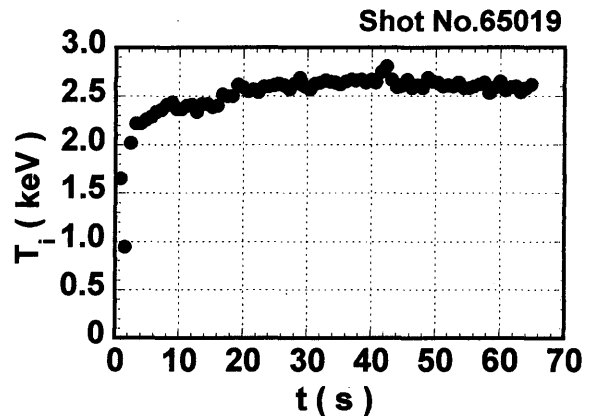


Fig. 3-15 Sustainment of the Hot Ion Mode

### 3.3 接線方向との比較

法線方向測定用中性粒子エネルギー分析器はトロイダル磁場リップルに捕捉されたイオンのみを選択的に測定しているために、法線方向で測定されるイオン温度は、全体のイオン温度を表しているとはいえない。そのため、イオン温度の等方性についての検討を行うために、接線方向測定用中性粒子エネルギー分析器を用いて、リップルに捕捉されていないイオンの計測を行った。Fig. 3-16、3-17、3-18 にそれぞれオーミック放電、 $8.2\text{GHz}$  LHCD 放電、 $2.45\text{GHz}$  LHCD 放電 ( $2.45\text{GHz}$  LHCD 放電は Hot Ion Mode 時) における、イオンのエネルギースペクトルの比較を示す。また接線方向測定においても、Hot Ion Mode への遷移現象がみられるかどうかを確認するために、Fig. 3-19 に荷電交換中性粒子束の時間発展の比較を示す。

Fig. 3-16、3-17 よりわかるように、オーミックおよび  $8.2\text{GHz}$  LHCD 放電において、ほぼ同様のスペクトルが得られ計測を十分行えることが確認された。スペ

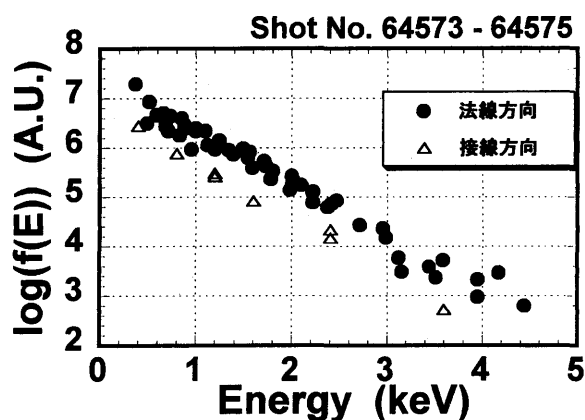


Fig. 3-16 Comparison of the ion energy spectrum between perpendicular and tangential measurements (in an Ohmic plasma)

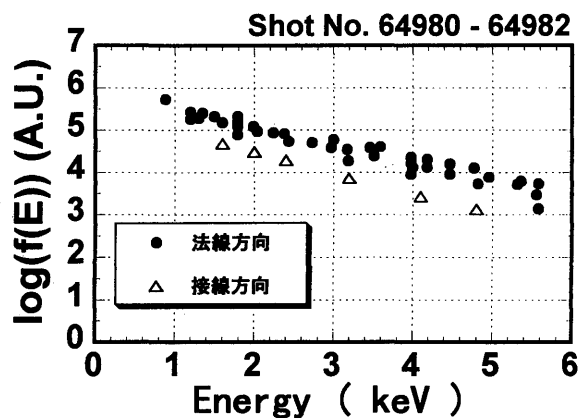


Fig. 3-18 Comparison of the ion energy spectrum between perpendicular and tangential measurements (in the Hot Ion Mode, 2.45 GHz LHCD plasma)

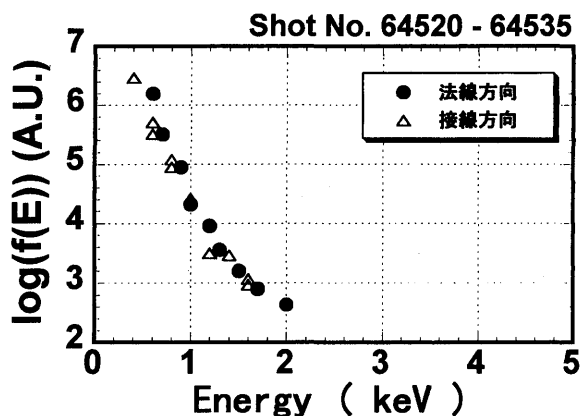


Fig. 3-17 Comparison of the ion energy spectrum between perpendicular and tangential measurements (in 8.2GHz LHCD plasma)

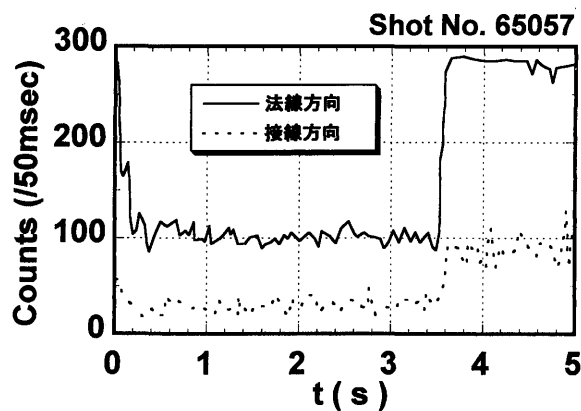


Fig. 3-19 Comparison of the time evolution of neutral particle flux between perpendicular and tangential measurements

クトルより得られるイオン温度については、接線方向測定におけるオーミック放電が約0.6keV、8.2GHz LHCD放電が約0.18keVと法線方向測定におけるそれ(約0.7keV、約0.2keV)より若干低く測定された。接線方向測定用の分析器は立ち上げて間もないために、十分なチャンネル間相対感度較正ができなかったため、多少の相違はあるもののかなりよい一致を見ている。

2.45GHz LHCD放電については、Fig. 3-18に示すように接線方向のイオンのエネルギースペクトルは、法線方向のHot Ion Modeにおけるそれと比べて高エネルギー領域のカウント数がやや少ないものの、ほぼ同様の結果が得られた。またFig. 3-19より、Hot Ion Mode時には接線方向において測定された中性粒子束が、法線方向のそれと同様に増加していることが確認

された。

以上の結果より、接線方向で測定されたイオンは法線方向とほぼ同様な傾向を示し、加熱の等方性が示された。また、Hot Ion Modeはトロイダル磁場リップルに捕捉された、一部のイオンのみにもみられる現象ではなく、リップルに捕捉されていない粒子においてもみられることが確認された。

### 3.4 Hot Ion Mode に対する考察

この節では、Hot Ion Modeの特徴に関して、それを説明しうる可能性のあるものを挙げて、考察を行う。

#### 3.4.1 リップル損失

3.2.4で示したように、Hot Ion Modeはプラズマ水平位置に非常に敏感であり、トロイダル磁場リップルによる、高エネルギーイオンの損失がHot Ion Mode

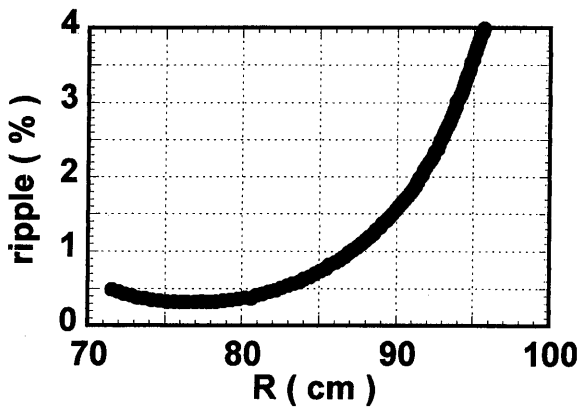


Fig. 3-20 Profile of the ripple in TRIAM-1M

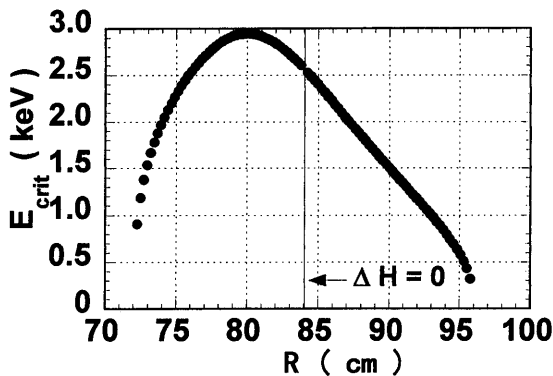


Fig. 3-21 Energy dependence of ripple loss ions

と何らかの関連がある可能性があると考えられる。

TRIAM-1M のリップル分布 (赤道面上主半径方向  $R=96\text{cm}$ : 外側境界) を Fig. 3-20 に示す。またこの値を用いて計算した小半径程度ドリフトするイオンのエネルギーを Fig. 3-21 に示す。

この図より、プラズマ水平位置の基準である  $R=84\text{cm}$  より内側の  $R=80\text{cm}$  付近で、小半径程度ドリフトするイオンのエネルギーは最大 (約  $3\text{keV}$ ) となっており、Hot Ion Mode が内側でしか起きないことと、つじつまはあっている。しかし、 $\Delta H = -1.6\text{cm}$  ( $R=82.4\text{cm}$ ) 付近でそれほど急激な変化を示してはおらず、リップル損失のみで Hot Ion Mode の発現に対する位置依存性が決まっているとは考えにくい。

### 3.4.2 径電場

プラズマ中に、径電場ができると  $E \times B$  ドリフトによりポロイダル方向 (電場に垂直) にドリフトする。このドリフトが、 $\nabla B$  ドリフトを打ち消すために閉じ込めがよくなることが考えられる。

### 3.4.3 イオンを加熱する波の励起

LHW は電流駆動のため高速電子との結合が強い。

そのため一般にイオンとの結合は弱く、また電子密度が  $1 \sim 2 \times 10^{12}\text{cm}^{-3}$  程度のため、衝突によりイオンに伝達されるパワーも小さい。こうした低密度電流駆動プラズマにおいて  $2\text{keV}$  を上回るイオン温度が観測されており、イオンを直接加熱する波が何らかの過程で励起されていることが考えられる。

### 3.4.4 高速電子のなう電流分布の変化

高速電子のなう電流分布が変化することにより磁気シアが変化し、中心付近のイオンの閉じ込めがよくなっていることが考えられる。

## 4. まとめと今後の課題

本研究は、TRIAM-1M において中性粒子エネルギー分析器を用いて測定された、低密度電流駆動プラズマにおける Hot Ion Mode に関して行われたもので、以下の結論を得た。

2.45GHz LHCD 長時間放電において観測された Hot Ion Mode においてプラズマを垂直方向に変位させることによりイオン温度空間分布を詳細に調べたところ、Hot Ion Mode 時には急峻な温度勾配が内部に形成されていることが確認され、イオン加熱と閉じ込め改善が同時に起こっていることがわかった。Hot Ion Mode 生成は電子密度およびプラズマ水平位置に非常に敏感であり、その依存性について調べたところ、以下の条件下で Hot Ion Mode が出現することが明らかになった。

$$0.12 < \bar{n}_e < 0.18 \quad (10^{13}\text{cm}^{-3})$$

$$\Delta H < -1.6 \quad (\text{cm})$$

こうして、電子密度およびプラズマ水平位置を最適領域に制御することにより、Hot Ion Mode の長時間維持を試みたところ、 $2\text{keV}$  をこえるイオン温度を1分間以上維持することに成功し、Hot Ion を定常的に閉じ込めることができることが示された。また接線方向の中性粒子エネルギー分析との比較を行った結果、接線方向の計測でもほぼ同様な結果が得られ、イオン温度の等方向性が示された。以上より Hot Ion Mode は、電子密度およびプラズマ水平位置を適切に制御することにより、イオンが加熱されると同時に閉じ込めが改善されて、起こることがわかった。しかし現段階ではその加熱や閉じ込めの機構についてはわかっておらず、今後の課題として以下のようなことが挙げられる。

接線方向測定用の中性粒子エネルギー分析器の整備を十分に行い、法線方向および接線方向のイオン温度の時間変化を比較し、どちらの遷移が先に起こっているか等を詳細に調べて、その加熱機構について考察す

る。

2.45GHz LHCD の隣接導波管の位相差を変えて長時間放電を行い、Hot Ion Mode と位相差との関連について調べる。

平成9年度の秋期実験において、ダイバータ配位においても Hot Ion Mode が確認されたので、ダイバータ配位による Hot Ion Mode の長時間維持実験を行う。

#### 参 考 文 献

- 1) 赤崎正則、村岡克紀、渡辺征夫、蛭原健治：プラズマ工学の基礎、産業図書 (1989)
- 2) 物理学辞典編集委員会編：物理学辞典、培風館 (1989)
- 3) JT-60 Team, Proc. 15th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Reserch, Seville, Vol. 1 (1994) 31.
- 4) K. M. McGuire, et al., Proc. 16th IAEA Fusion Energy Conference, Montreal, (1996) IAEA-F1-CN-64/O1-2.
- 5) The JET Team, Proc. 16th IAEA Fusion Energy Conference, Montreal, (1996) IAEA-F1-CN-64/O1-3.
- 6) 永尾明博、他：九州大学応用力学研究所所報 第66号 (1988) 401.
- 7) 中村一男、他：九州大学応用力学研究所所報 第17号 (1980) 125.