

平成21年6月8日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007 ～ 2008
 課題番号：19760602
 研究課題名 (和文) 電子温度と電子密度の高速同時測定分光器の整備とそれを用いた熱粒子輸送研究
 研究課題名 (英文) Development of a spectrometer for fast measurement of electron temperature and density, and study on heat and particle transport using the spectrometer
 研究代表者
 仲野 友英 (NAKANO TOMOHIDE)
 独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究職
 研究者番号：50354593

研究成果の概要：現在建設中の核融合発電の実験炉では容器を高温の核融合プラズマから保護するためにタイルが設置される。しかし、プラズマ自身が高速で変化すると瞬間的に大きな熱がタイルに伝わり、タイルが損傷するおそれがある。本研究ではプラズマの温度と密度を高速で測定する分光器を開発し、プラズマの瞬間的な変化を調べた。ある部分ではプラズマの温度と密度が 100 マイクロ秒の時間スケールで変化するが、別な場所では変化しないことが観測された。この場所による変化の違いについては原因を考察中である。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2007 年度 | 2,700,000 | 0 | 2,700,000 |
| 2008 年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,300,000 | 180,000 | 3,480,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：磁場核融合、トカマク、プラズマ輸送、周辺局在モード (ELM)、高速可視分光

1. 研究開始当初の背景

国際熱核融合実験炉 ITER では標準運転モードとして改善閉じ込めモードの採用が決定された。この運転モードではしばしば ELM (Edge Localized Mode、周辺局在モード) を伴う。ELM によって、高温プラズマが閉じ込め領域から瞬間的に吐き出され、それによる高い熱と粒子の負荷はダイバータの寿命を定める要因である。この熱と粒子の負荷を低減するために ELM に由来する熱と粒子の輸送の理解が急務となっている。

プラズマ中の電子温度と電子密度を測定するには様々な方法がある。トムソン散乱を

用いる手法や静電プローブ法などが代表的な例である。しかし、いずれの計測法も ELM に由来するプラズマの時間的な変化を観測するには時間分解能が十分ではない。他方、分光学的な手法では、発光の物理的な原理からナノ秒の時間スケールまで測定の高速度化が可能な場合がある。また、分光測定の対象としてヘリウムの発光線を用いる場合には、電子温度と電子密度のみにそれぞれ敏感な発光線の組合せがあること、および核融合炉では核融合反応の副生成物であるヘリウムが常にプラズマに含まれるため、計測の目的のためにヘリウムを入射する必要がないこ

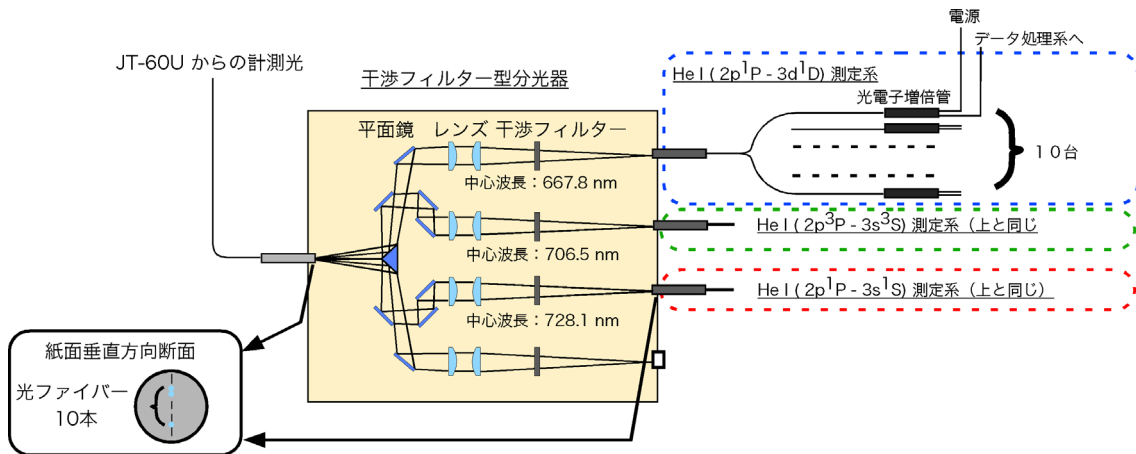


図1. 本研究で整備した高速分光システム。

と、などの利点がある。

しかし、従来の分光計測法では分光器（主に光検出器）の時間分解能が十分ではなく、ELM に由来するプラズマパラメータの時間変化の観測には適用できなかった。

そこで本研究では次節に述べるように、計測光を分岐し、それぞれ分光して、3本のヘリウム発光線の強度の時間変化を高速で測定する分光システムを整備した。光検出器には1MHzでの高速測定が可能な光電子増倍管を採用した。これを用いて、ELMに由来する電子温度と電子密度の変化の観測を試みた。

2. 研究の目的

3本のヘリウムの発光線強度を、同一視野で、かつ高い時間分解能（マイクロ秒の時間スケール）で、測定することにより、ELMに由来する電子温度と電子密度の時間的な変化を観測し、さらに同様の測定を複数の視野に対して行うことにより、プラズマの空間的な変化の応答を調べ、プラズマの過渡的な輸送機構を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 高速分光システムの整備

図1に示す高速分光システムを整備した。JT-60Uからの計測光を光ファイバーで分光器に導き、計測光を分岐して干渉フィルターに入射させ、そこでヘリウムの発光線のみを透過させる。さらに分光器出口で光ファイバーによって光電子増倍管に導き、光電測光する。この分光システムによって、電子温度と電子密度に敏感な発光線ペアを構成する3本のヘリウム発光線を同時に測定する。また、図1の左下に示すように、紙面垂直方向に光ファイバーが並んでおり、光ファイバーの本数分だけ視野をとることができ、最大10点での空間分布測定が可能である。

(2) 解析モデル

ヘリウムの発光線強度比の計算には衝

突放射モデルを用いた。ヘリウムの発光線 $\text{He I } (2p^3P - 3s^3S : 706.5 \text{ nm})$ に対する $\text{He I } (2p^1P - 3s^1S : 728.1 \text{ nm})$ の強度比の計算結果を図2(a)に示す。この線強度比の等高線は上下方向に並行であり、すなわち、この線強度比は電子密度には鈍感であり、電子温度には敏感であるため、電子温度の計測に向く。逆に、図2(b)に示す、 $\text{He I } (2p^1P - 3s^1S : 728.1 \text{ nm})$ に対する $\text{He I } (2p^1P - 3d^1D : 667.8 \text{ nm})$ の強度比の等高線は水平方向にほぼ並行であり、すなわち、この線強度比は電子温度には鈍感であり、電子密度に敏感であるため、電子密度の計測に向く。よって、上述の分光システムで計測するヘリウムの発光線として、上記3本のヘリウム発光線を選択した。

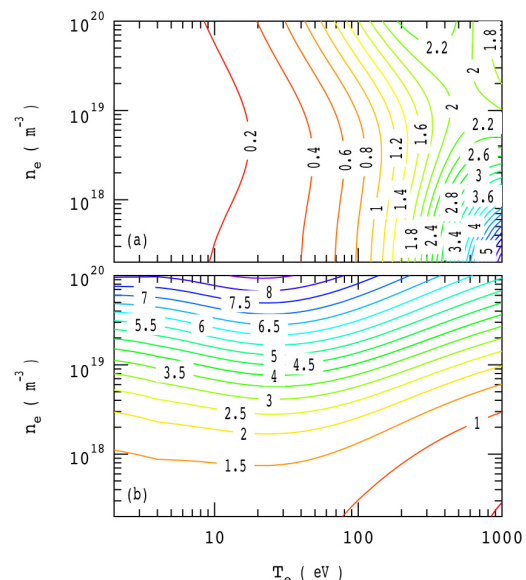


図2. (a) $\text{He I } 706 \text{ nm}$ に対する $\text{He I } 728 \text{ nm}$ 、および(b) $\text{He I } 728 \text{ nm}$ に対する $\text{He I } 668 \text{ nm}$ の強度比の電子温度と電子密度に対する等高線図

(3) 実験

JT-60U の改善閉じ込めモードプラズマでは、ELM が発生する。ここでは定常的に ELM が発生している時間帯で 10 から 200 個の ELM に対してヘリウム発光線強度を足しあわせて (下記の例では 24 個の ELM に対して足しあわせた)、統計的な誤差を減少させてから発光線強度比の解析を行った。

4. 研究成果

図 1 に示す分光器では最大 10 点の空間分布計測が可能であるが、実際の実験では特別な場合を除き、強度比の解析に対して十分な信号・ノイズ比は得られなかった。そこで、ここでは併設している、ほぼ同様の構造の高速分光システムによって、ヘリウムの発光強度が高い、ダイバータ領域の外側ストライク点および内側ストライク点を観測した結果を記す。

図 3 に外側ダイバータで観測された He I 発光線強度の時間変化を示す。上に図 2 を用いて述べたとおり、これら 3 本のヘリウム発光線のうち、He I 706 nm に対する He I 728 nm の強度比から電子温度を定め、He I 728 nm に対する He I 668 nm の強度比から電子密度を定めた。その結果を、図 3 (下) に示す。ELM によって He I 発光線強度が上昇している間には電子温度が最大となり、高温のプラズマが外側ダイバータに輸送されていると解釈される。He I 発光線強度が最大となった直後には電子温度は急激に低下し、他方、電子密度は最大値をとる。これは ELM によってダイバータ板へ熱と粒子が到達し、ダイバータ板から多量の粒子が放出されたため、その粒子を電離するために電子のエネルギーが消費されたこと (すなわち電子温度の低下) と同時に、粒子が電離されたために電子

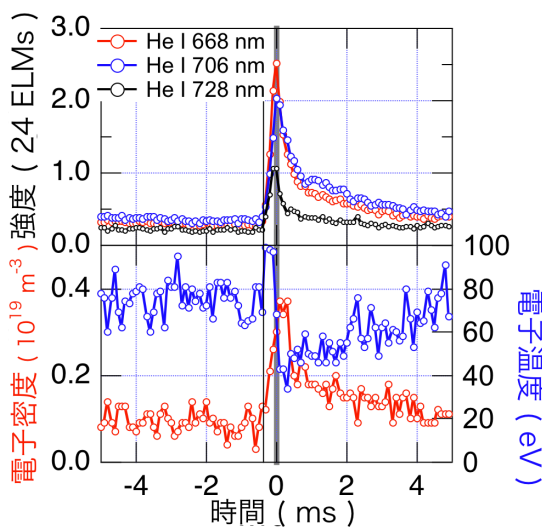


図 3 (上) ELM 時の He I 発光線および (下) 電子密度・温度の時間変化

が生成され電子密度が上昇したと解釈される。その後には、電子密度および温度はなだらかにそれぞれ低下および上昇して ELM 発生前の値に戻る。このゆっくりとした電子密度と温度の変化は主プラズマ周辺部で ELM によって崩壊したペDESTAL が回復していることに対応すると考えている。

図 4 に内側ダイバータでの同様の測定結果を示す。図 4 (上) に示すように、ELM 時には He I 発光線強度は大きく変化するが、図 4 (中) に示すように、それらの強度比はほとんど変化しない。よって、それらから導出される電子密度と電子温度は図 4 (下) に示すように、ほとんど変化しない結果となった。原因としては測定上の様々な要因が考えられる。本分光システムでは、光を回折格子などによって分散せずに、干渉フィルターを用いて特定の波長帯にある光の強度を測定して、それを He I 発光線強度とみなしている。そのため、He I 発光線と波長が非常に近い C IV ($n = 7 - 9 : 706.2 \text{ nm}$) や ELM 時にしばしば観測される強い連続光の影響は避けられない。これらの影響は外側ダイバータプラズマに比べて密度の高い内側ダイバータプラズマで顕著である。とくに後者の連続光の強度が He I の発光強度より十分に高い場合には、連続光強度の波長分布が電子密度・温度によってあまり変化しないと仮定すると、図 4 (中) に示したように、ELM 時であっても、それらの強度比が変化しないことも

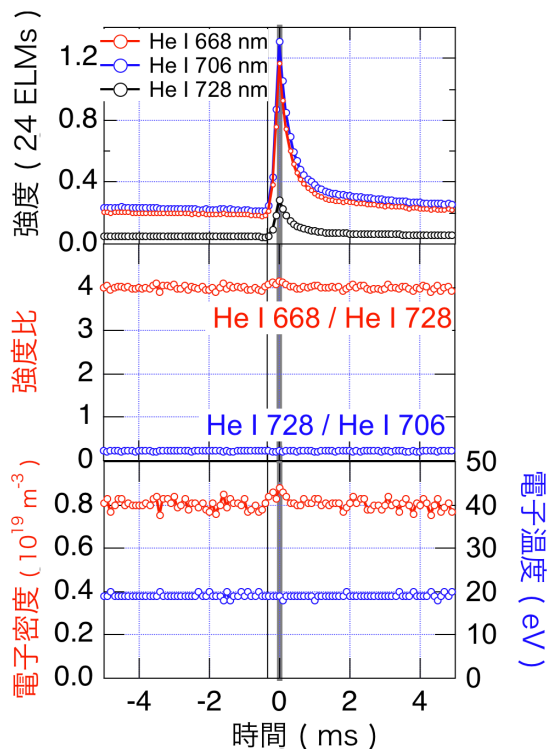


図 4 (上) ELM 時の He I 発光線、(中) He I 発光線強度比および (下) 電子密度・温度の時間変化

あり得る。これについては現在考察中である。
上記の、3本のヘリウム発光線の強度比から電子温度と電子密度を導出する方法はよく知られている。しかし、それを高速で測定し、ELMのようなプラズマの速い変化の測定に応用した例は、研究代表者の知る限り、国内はもとより、海外でも存在せず、研究代表者のオリジナルのアイディアによるものである。

1. 研究の背景でも述べたとおり、ELMによるダイバータタイルの損傷は次世代の核融合実験装置においては最も深刻な克服すべき課題である。本手法によってプラズマパラメータとその時間的な変化が定めれることに成功したので、ELMによるタイル損耗量の測定、タイルの寿命予測など、さまざまな定量評価が可能となり、次期装置の設計に役立つ基礎データを評価することができ、初期的な解析を進めている。

また、ELMによって発生した不純物は多量の水素を含んだ層を形成しつつ堆積するため、トリチウムを使う次世代の核融合実験装置では再堆積層に含まれるトリチウム量が安全上の上限を超え、運転を制限する要因となると予測されている。ELMによって多量の不純物がダイバータタイルから発生するため、その輸送を調べることは、上記の観点から水素（トリチウム）の炉内蓄積の機構の解明にも大いに役立つ。今後は、慎重にデータ整理を進め電子温度と密度の空間分布が得られているケースがあれば、上記のような観点からもデータ整理を進めてゆく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 仲野友英、久保博孝、朝倉伸幸、清水勝宏、東島智、Impurity Accumulation in the Main Plasma and Radiation Process in the Divertor Plasma of JT-60U、Proceedings of 22nd IAEA Fusion Energy Conference、印刷中、2008、査読無

[学会発表] (計1件)

- ② 仲野友英、久保博孝、朝倉伸幸、清水勝宏、東島智、Impurity Accumulation in the Main Plasma and Radiation Process in the Divertor Plasma of JT-60U、22nd IAEA Fusion Energy Conference、2008年10月15日、ジュネーブ (スイス)

[その他]

ホームページ等

http://naka-www.jaea.go.jp/naka_news/no_14/naka_news14.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仲野 友英 (NAKANO TOMOHIDE)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核

融合研究開発部門・研究職

研究者番号：50354593