

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560858

研究課題名（和文）ELM発生時のV字ダイバータ模擬に関する研究

研究課題名（英文）Study of experimental simulation of V-shaped divertor in ELM

研究代表者

利根川 昭 (TONEGAWA AKIRA)

東海大学・理学部・教授

研究者番号：90197905

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、高熱流シートプラズマの発生可能なダイバータ模擬装置により熱パルスプラズマを発生させ、その時の非接触プラズマの形成過程とV字ダイバータでの熱負荷特性を調べることにより、ELM発生時のV字ダイバータの有効性を検証することである。実験結果として、パルスプラズマが発生した際、バルマー系列において2つの負のスパイクの発光強度特性と高エネルギー電子（20～40eV）が発生することを観測した。また、この高エネルギー電子は、非接触プラズマの原子・分子過程、特に発光特性に影響を与えていることを衝突輻射モデルで検証した。

研究成果の概要（英文）：In this study, the experimental observation of the time evolution of electron density  $n_e$ , electron temperature  $T_e$ , electron velocity distribution function  $f_e(v)$ , and hydrogen Balmer series spectra in hydrogen recombination plasma have been carried out in a liner plasma device. The value of  $n_e$ ,  $T_e$ ,  $f_e(v)$ , and hydrogen Balmer series spectra is found to depend on gas pressure in the recombination plasma with pulse plasma flow. The high energy electrons in the pulse plasma flow are influenced by the time evolution of the Balmer series spectra. The transient behavior of the recombination plasma with pulse plasma flow has been studied by observing the short double minimum (negative) spike in  $H\alpha$  emission from the plasma. This response in  $H\alpha$  emission is explained by CR model taking into account of the high energy electron associated with pulse plasma flow.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

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：プラズマ、壁相互作用

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 次期熱核融合装置の高性能化に伴い、ダイバータ板への熱負荷低減に対する問題が重要視されている。この問題に対処するため、冷却ガスを導入させ非接触プラズマを発生させるガスダイバータ方式が提案されている。しかし、この方法では、冷却ガスが主プラズマへ逆流し、主プラズマの閉じ込め性能を劣化させるため、熱負荷低減と逆流防止の両立が可能な制御が必要となっている。

(2) この問題に対する解決方法の1つとして、日本原子力研究開発機構の次期装置（JT-60SA）では、ダイバータの構造をV字型にするセミクロースダイバータ（V字ダイバータ）を利用することが提案されており、将来的には、国際熱核融合装置（ITER）へ応用する可能性も示唆されている。しかし、V字ダイバータに関する研究は、シミュレーションのみであり実験的な研究はなされていない。また、高熱流プラズマが間欠的に発生するELMのような熱パルスプラズマに対して、V字ダイバータの有効性や非接型プラズマ形成・崩壊への影響等の研究は、未解決の問題であり、ダイバータ模擬装置等による基礎研究が急務であると考えている。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、3次元構造を有する高熱流シート状プラズマを生成し、熱パルスプラズマでのV字ダイバータの特性を調べることである。本研究室で考案したダイバータ模擬装置（TPD-SheetIV）は、実際のダイバータプラズマの構造と似ているためV字ダイバータでの非接触状態を模擬するのに最も適した装置であり、本研究テーマの遂行は極めて意味あることである。

## 3. 研究の方法

(1) 現在、高密度シートプラズマの生成に成功しており（放電電流100A、電子密度 $10^{13}\text{cm}^{-3}$ ）、模擬実験装置としては、実際のダイバータプラズマに近いプラズマ状態を生成することが可能になっている。

(2) 2009年度は、V字ダイバータの改良、計測部の充実、ELM模擬用パルス回路設計を目的とし、現有装置の改造と計測部の充実を行い、高熱流シートプラズマをELMの模擬実験可能な装置に改造した。また計測系・自動制御系の確立も行った。

(3) 2010年度は、定常プラズマでのV字ダイバータ実験でのV字ダイバータの有効性を確認するため、複数の形状のV字ダイバータを製作し・構造の違いに対する非接触プラズマの特性を明らかにした。

(4) 2011年度は、ELMを模擬したパルスプラズマでのV字ダイバータの有効性を確認するため、プラズマ源の電極をパルス化する方法により熱パルスプラズマを生成しV字ダイバータの有効性を明らかにした。

### (5) パルスプラズマの生成法

パルスプラズマを生成させる際には、放電領域にある電極の電位を制御して生成させた。図1にスイッチング回路を接続したダイバータ模擬装置の概略図を示す。図左側の放電領域の陽極の隣の電極の電位を、スイッチング回路を用いて切り替えた。スイッチング回路にはMOSFET（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor）のトランジスターを使用した。ファンクションジェネレーターをスイッチング回路に接続し、矩

形波を印可することにより電極とアース間の接続・切断を行った。今回使用した MOS FET

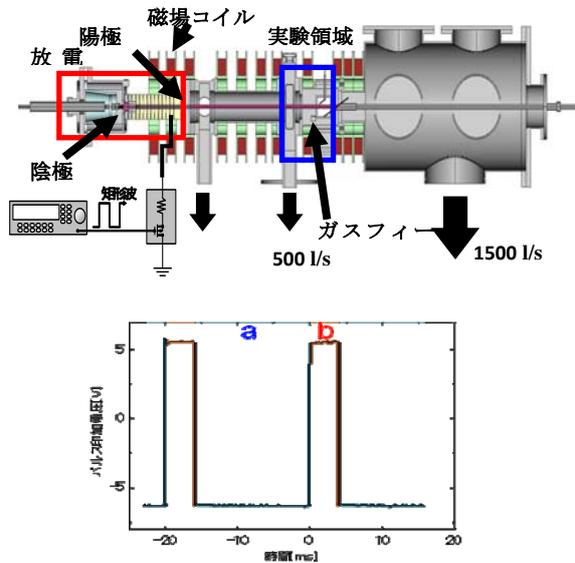


図1 装置概念図とパルス制御波形

はPNP構造で、負電位を印加すると電極とアースが接続された状態になる。この時、プラズマと電極の間に電位差(約20V)が生じ、プラズマは電極に流れ込み、実験領域に到達するプラズマは熱流の小さいプラズマとなる。正電位を印加すると電極とアースが接続された状態になる。この時、プラズマと電極の間に電位差が無くなり、プラズマは電極に流れ込むことなく、実験領域に到達するプラズマは熱流の大きいプラズマとなる。この切り替えを行うことによりパルスのプラズマ流を生成することができる。

#### 4. 研究成果

(1) ダイバータ模擬装置(TPD-Sheet VI)によりパルスプラズマ流を発生させたときのプローブ波形を図2に示す。この時の実験条件は放電電圧240V、放電電流70A、実験領域ガス圧力1.1Pa、パルス幅0.3msとなっている。この波形はパルスプラズマ流発生から0.1ms後の波形となっていて、高エネルギー電子が発生していることがわかる。この高エネルギー

電子はパルスプラズマ流を発生させる際に、放電領域の電極の電位差によってプラズマが加速されたために発生したと考えられる。

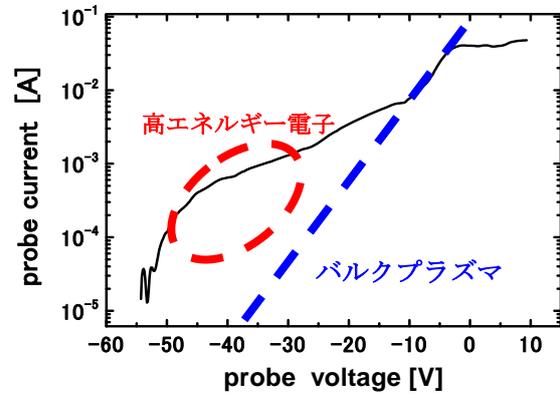


図2 パルスプラズマ時でのプローブ波形

(2) これらの実験データを解析し、速度分布関数を求め時間変化にしたものが図3である。速度分布関数でもプローブ波形と同様に、0ms以降に高エネルギー電子が発生していることが確認できる。

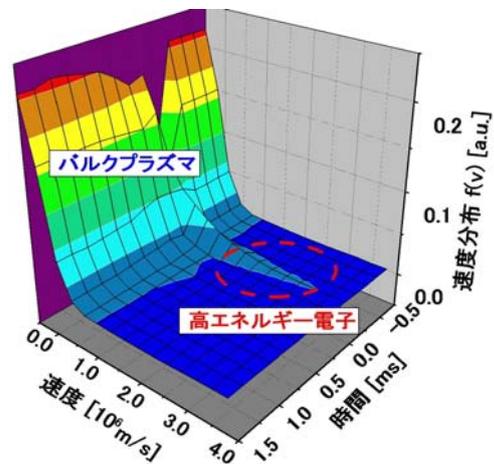


図3 速度分布関数の時間変化

(3) 図4にHε発光強度(上段)、電子密度(中段)、電子温度(下段)の時間変化を示す。図中の赤線は前述したプローブ波形および速度分布関数の全体(高エネルギー電子を含めた)を解析したデータとなっている。青線については、プローブ波形および速度分布関数

のバルクプラズマのみを考慮して解析したデータとなっている。パルスプラズマ流が到

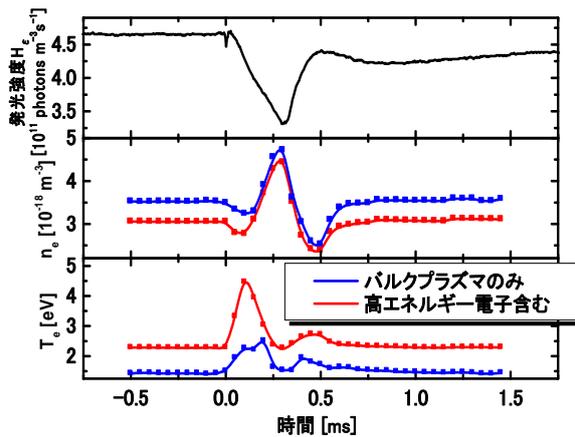


図4 発光強度(上段)、電子密度(中段)、電子温度(下段)の時間変化

達する 0ms 以降に  $H_{\epsilon}$  発光強度に核融合装置 JET のダイバータ部と類似した 2 つの負のスパイクが観測できる。バルクプラズマのみを考慮したデータを見てみると電子密度は初期値から約  $1 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$  程度上昇していることが分かる。電子温度は初期値から約 1eV 程度上昇していることが分かる。次に、高エネルギー電子を含めたデータを見てみると電子密度についてはバルクプラズマのみと同じような変化となっている。電子温度については初期値から約 2eV 程度上昇していることが分かり、高エネルギー電子による影響が大きいことが分かる。

(4) 電子温度・電子密度・速度分布関数を用いて衝突輻射モデルより  $H_{\epsilon}$  発光強度を計算した結果と実験結果を比較した。バルクプラズマのみを考慮した発光強度の計算値と高エネルギー電子を含めた発光強度の計算値を図5に示す。バルクプラズマのみを考慮した発光強度は、前述した発光強度の実験値と時間的な傾向が一致しなかった。高エネルギー電子を含めた計算値では時間的な傾向が一致し、JET で観測されるような 2 つの負の

スパイクが確認できた。

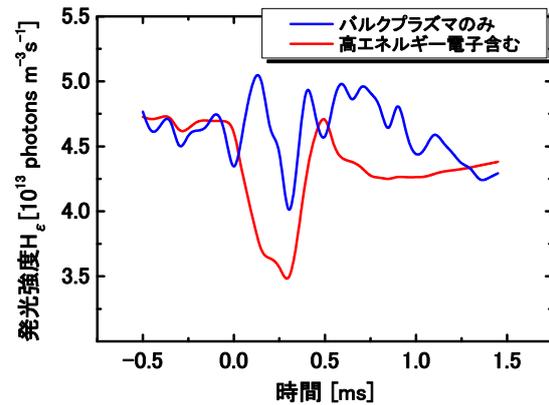


図5 発光強度の時間変化(計算値)

以上の結果より、時間的に変化するようなパルスプラズマ流の発光強度の変化は高エネルギー電子の影響を受けるため、実験により得られる速度分布を考慮する必要があることが分かる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- ① H. Matsuura, N. Inagaki, S. Kado, S. Masuzaki, A. Tonegawa, Plasma and Fusion Research, 査読有, 6, 2011, 2401104.
- ② T. Torada, N. Mine, H. Komukai, T. Ono, A. Tonegawa, K. Kawamura, 63rd Gaseous Electronics Conference and 7th International Conference on Reactive Plasmas Conference Proceedings, 査読無, 1, 2010, 217.
- ③ T. Iijima, A. Tonegawa, T. Ono, T. Torada, K. Kawamura, 63rd Gaseous Electronics Conference and 7th International Conference on Reactive Plasmas Conference Proceedings, 査読無, 1, 2010, 220.
- ④ .Nakanowatari, A. Tonegawa, T. Shibuya, K. Kawamura, Journal of Nuclear

Materials, 査読有, 390-391, 2009,  
311-314.

[学会発表] (計 30 件)

- ① T. Iijima, A. Tonegawa, N. Mine, H. Komukai, K. Kawamura, K. Sato, 18<sup>th</sup> International Colloquium on Plasma Processes (CIP2011), July 5-8 2011 France.
- ② T. Iijima, A. Tonegawa, N. Mine, H. Komukai, K. Kawamura, K. Sato, 8<sup>th</sup> General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association in 2011 (APFA2011) November 1-4 2011.
- ③ A. Tonegawa, T. Iijima, H. Komukai, K. Kawamura, K. Sato, 18<sup>th</sup> International Colloquium on Plasma Processes (CIP2011), France July 5-8 2011.
- ④ T. Iijima, A. Tonegawa, H. Komukai, K. Kawamura, K. Sato, 21<sup>st</sup> International Toki Conference November 28 - December 1, 2011.
- ⑤ N. Mine T. Iijima, H. Komukai, A. Tonegawa, K. Kawamura, K. Sato, 21<sup>st</sup> International Toki Conference November 28 - December 1, 2011
- ⑥ H. Komukai, A. Tonegawa, T. Iijima, N. Mine, K. Kawamura, K. Sato, 8<sup>th</sup> General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association in 2011 (APFA2011) November 1-4 2011.
- ⑦ N. Mine, T. Iijima, H. Komukai, A. Tonegawa, K. Kawamura, K. Sato, 21<sup>th</sup> International Toki Conference 2011/11/29-12/1
- ⑧ T. Torada, N. Mine, H. Komukai, T. Ono, A. Tonegawa, K. Kawamura, 7<sup>th</sup> ICRP (International Conference on Reactive Plasmas) 2010/10/1-10/5 Paris, France.
- ⑨ H. Komukai, A. Tonegawa, T. Torada, K. Kawamura, 7<sup>th</sup> ICRP (International

Conference on Reactive Plasmas)

2010/10/1-10/5 Paris, France.

- ⑩ T. Torada, N. Mine, H. Komukai, T. Ono, A. Tonegawa, K. Kawamura, 20<sup>th</sup> International Toki Conference 2010/12/7-10 Gifu, Japan.
- ⑪ A. Tonegawa, T. Torada, H. Komukai, T. Ono, and K. Kawamura, 26<sup>th</sup> SOFT (Symposium on Fusion Technology) 2010/9/27-10/1 Porto, Portugal.
- ⑫ A. Tonegawa, T. shibata, T. Torada, H. komurai, N. Mine, T. Ono, K. kawamura, 19<sup>th</sup> International Toki Conference 2009/12/8-11 Gifu, Japan.

他 18 件

[その他]

ホームページ等

<http://www.sp.u-tokai.ac.jp/~tone/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

利根川 昭 (TONEGAWA AKIRA)

東海大学・理学部・教授

研究者番号 : 90197905