

平成 21 年 5 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19540421

研究課題名（和文） 部分非接触プラズマでの粒子ドリフトと光再吸収に関する研究

研究課題名（英文） Study of particle drift and photon trapping
in partial detachment plasma

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：

本研究では、東海大学で考案・開発した高熱流シートプラズマ模擬実験装置（TPD-SheetIV）により、水素の非接触プラズマを生成し、その際の可視・真空紫外分光計測、粒子ドリフト計測を測定し、ライマン系列の共鳴発光線の再吸収による影響と、非接触プラズマ形成過程での粒子ドリフト（プラズマ流束）と熱負荷分布の関係を明らかにした。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ

キーワード：核融合ダイバータ、再結合プラズマ

1. 研究開始当初の背景

部分非接触ダイバータは、閉じ込めを劣化させずにダイバータの熱負荷を低減可能なため、次期核融合装置（ITER）のダイバータ運転モードとして提案されている。

しかし急激な密度・温度勾配のダイバータプラズマ内では、複雑な原子・分子反応過程と局所的な放射過程を伴う再結合プラズマが発生するため、部分非接触ダイバータの物理機構の詳細については解明されていないのが現状である。特に、部分非接触プラズマが発生する際、周辺のプラズマ流速の増加はダイバータ板への熱負荷を増大

させ、ダイバータ板の損耗を促進させると懸念されている。

一方、水素・重水素原子のライマン系列の共鳴発光線の再吸収の効果は、再電離を促進させ再結合過程を抑制する可能性がある。そのため、この粒子ドリフトによるプラズマ流速をとまなう部分非接触プラズマの形成機構と光再吸収の問題は、ダイバータにおける国際的な課題になっている。

本申請の着眼点は、粒子ドリフトによるプラズマ流速の増大と光再吸収による再電離の2つの異なる現象を関連づけることにより、核融合ダイバータ研究において最も

重要されている閉じ込め劣化防止と熱負荷低減の両方を実現できる部分非接触プラズマの生成機構を解明することにある。

粒子ドリフトによるプラズマ流に関する研究は、JT-60（日本）を初めとして、各国の核融合装置において観測され、粒子シミュレーション等の研究も進んでいる。一方、水素・重水素原子のスペクトル線（ライマン系列の共鳴発光線）の再吸収の効果に関する研究は、近年、Reiter氏（独）のグループが、粒子シミュレーションにより精力的に研究を進めている。また、理論解析では、信州大学の澤田氏が衝突輻射モデルを用いた研究が進められている。それ以前にASDEX-UやAlcator C-Modにおいて、 L_{β} と H_{α} 、 D_{α} の発光強度の時間変化の比較により報告されている。しかし、ライマン系列の共鳴発光線の再吸収が再結合過程にどのように影響するか、実験的な検証は行われていない。

基礎研究を実施しているダイバータの模擬が可能な直線型実験装置の研究グループとして、東海大学の模擬実験装置 (TPD-SheetIV) 以外に、国内では、名大 (NAGDIS 装置)、東大 (MAP-II 装置)、国外ではUCSD (PISIS 装置) 等が研究を遂行しているが、共鳴発光線の再吸収の効果を調べるために不可欠な真空紫外分光装置、可視分光装置の両方の分光装置を備えているダイバータ模擬実験装置は、国内外でも東海大学の高熱流シートプラズマ模擬実験装置 (TPD-SheetIV) のみである。そこで本研究では、東海大学で考案・開発した高熱流シートプラズマ模擬実験装置 (TPD-SheetIV) により、水素の非接触プラズマを生成し、その際の可視・真空紫外分光計測、粒子ドリフトの2次元計測を実施し、非接触プラズマ形成過程での粒子ドリフトとライマン系列の共鳴発光線の再吸収による再電離の影響の関係を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の目的は、東海大学で開発した高熱流シートプラズマ模擬実験装置 (TPD-SheetIV) を用いて、非接触プラズマ形成過程での水素のスペクトル線（ライマン系列の共鳴発光線）の再吸収の効果とプラズマ流速に関連する粒子ドリフトとの関連を調べ、ダイバータの熱負荷への影響を明らかにすることである。

この研究を遂行するためには、部分非接触プラズマ形成過程におけるライマン系列、

バルマー系列のスペクトル計測、プローブによる電子密・温度、ターゲットの表面温度分布の測定する必要がある。そのため真空紫外分光器、可視分光器、高速プローブ計測システム、マッハプローブ計測、熱負荷計測システムが整備されている。しかし幅広い圧力特性においてより定量的に計測するには、真空紫外分光器内の計測系真空度をある一定範囲に維持し、更に各種物理量を同時に計測する必要がある。そのため、真空紫外分光器内の排気系の追加が必要になっている。また水素プラズマと重水素プラズマの比較検討も行うため、重水素ガスの購入も必要となる。

Fig. 1 に高熱流シートプラズマ生成装置 (TPD-SheetIV) の概念図を示す。このプラズマ生成装置は放電領域においてプラズマを生成、不動電極と磁力線の構造により、プラズマをイオンラーモア半径と同程度に圧縮することによってシート状のプラズマを生成し、厚さ方向に急激な温度勾配を保持したプラズマとなる。シートプラズマは放電電流 60A、放電ガス流量 75sccm、磁場強度 0.07T で水素シートプラズマを生成し、実験領域ではガスフィーダーによって水素ガスを接触させることによって水素再結合プラズマを生成した。同時に、可視分光系により水素原子の発光の Balmer series を、真空紫外分光系によって Lyman series の同位置計測を行った。

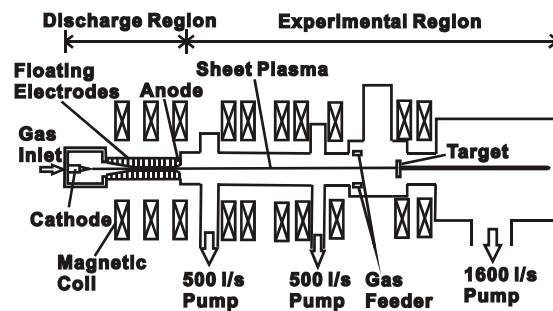


Fig.1 Schematic diagram of TPD-SheetIV machine.

(1) 平成 19 年度:真空紫外分光器等の計測部の充実と予備実験の実施

初年度は、現有装置の計測部排気系の改造、真空容器の改造を行い、各物理量が同時計測可能な計測システムに改良した。特に、真空紫外分光器に真空排気系を追加し、原子分岐線対法による絶対感度較正を事実実施し定量的な計測システムを確立した。更に高熱流シートプラズマ電極部を製作

し非接触プラズマの生成可能な装置に改造し、光再吸収の予備実験を行なった。

(2) 平成 20 年度: 光吸収実験とプラズマ流速実験の実施

水素の高熱流シートプラズマに水素ガスを接触させ、非接触プラズマを生成し、真空紫外分光・可視分光の同時計測を行った。特に真空紫外分光測定 of 精度を高めるため真空排気系の追加を行った。分光計測以外に、マッハプローブ計測、高速プローブ計測、光高温計による熱負荷計測のシステムを設置し、各種物理量の同時計測可能な計測系を確立させた。実験では、部分非接触プラズマを生成し、プラズマ基礎物理量 (密度、温度) からプラズマの流速を求め、プラズマ流束と熱負荷との関係を明らかにした。

4. 研究成果

4-1. 原子分岐線対法による真空紫外分光器の絶対感度校正

真空紫外分光は、波長領域が励起・電離エネルギーに対応するため、プラズマ中で原子・分子過程の解明に最も重要な計測方法の 1 つである。しかし、真空紫外分光は可視分光に比べて絶対感度校正が困難で、また排気システムの必要性から計測系が複雑になるため、計測方法としてはあまり使われていないのが現状である。可視・真空紫外分光器を絶対感度校正をすることによって水素プラズマの分光測定をおこない、水素原子・分子の密度を求めることができる。特に水素原子では Lyman series と Balmer series、水素分子では B、C 状態からの遷移である Werner Bands と Lyman Bands から振動励起の占有密度の絶対値を求めることができ、それらの観測から再結合プラズマ生成における原子・分子の役割や、それらの励起状態の関与を定性・定量的に解明する事ができる。

本研究では分光放射輝度で感度校正した可視分光器と真空紫外分光器で水素再結合プラズマの同位置測光し、原子分岐線対法を用いることにより真空紫外分光器を分光放射輝度で絶対感度校正し、Lyman series (L_{β} 、 L_{γ}) の放射輝度を求めた。

実験装置は、可視分光器の絶対感度校正を分光放射輝度で実際にプラズマ分光を行う時と同じ条件で行った。可視分光器はプリンストン・インスツルメンツ製の Czerny-Turner 型を用い、標準光源は浜松ホトニクス製のキセノンランプ (L7810) を用いた。Fig. 4 に示すように標準反射板での反射光を測光

することにより分光放射輝度から分光放射輝度に変換して、集光レンズで集光し、スリットにより分解能を向上させてから光ファイバーで分光器に導くことによって可視分光器の絶対感度校正を行った。

実際にプラズマ分光を行う際の真空紫外分光系の配置図を Fig. 2 に示す。真空紫外分光器は量子技研工業製の瀬谷・波岡型分光器を用いた。分光器はプラズマチャンバーと直結となっており、分光器内とプラズマ連結チャンバーをそれぞれターボ分子ポンプで排気することによって高真空を維持、真空紫外光を高感度で検出することが可能となっている。また、シートプラズマ厚さ方向分解能のために真空紫外分光器とシートプラズマ間にスリットを置いた。可視分光系においても集光レンズの後にスリットを用いることによって真空紫外分光系のプラズマ厚さ方向に対する空間分解能とほぼ等しくなるようになっている。

実験結果として、真空紫外分光器の絶対感度校正のために、水素原子の可視分光計測と真空紫外分光計測を行った。Fig. 4、Fig. 5 にプラズマ中心における可視分光により得られた水素原子の発光 H_{α} 、 H_{β} と、真空紫外分光

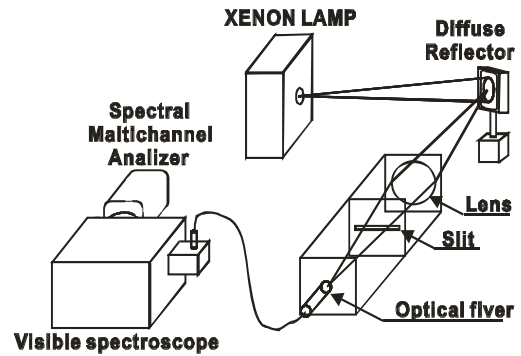


Fig. 2 Schematic view of absolute calibration of visible spectroscopy.

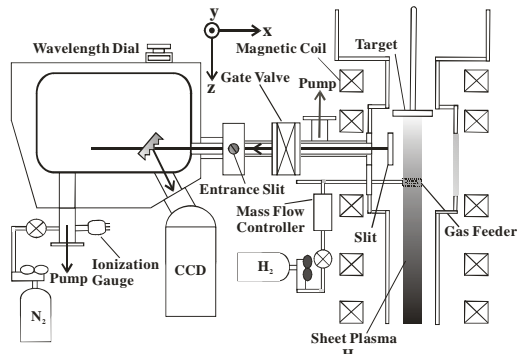


Fig. 3 Schematic diagram of the VUV spectroscope on TPD-SheetIV.

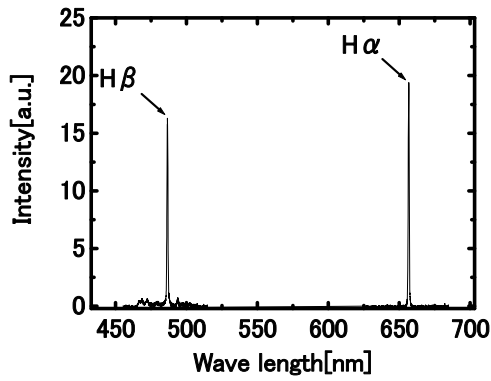


Fig. 4 Spectrum of $H\alpha$ and $H\beta$ for Absolute calibration of VUV spectroscope.

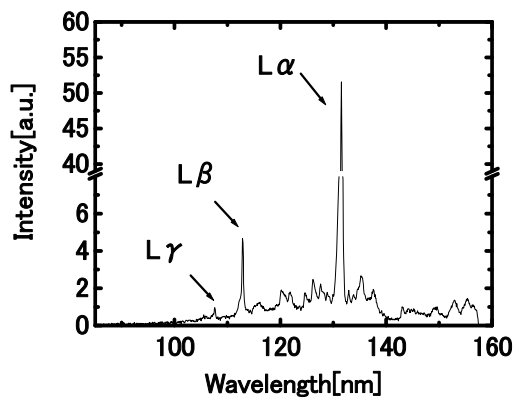


Fig. 5 Spectrum of $L\beta$ and $L\gamma$ for Absolute calibration of VUV spectroscope.

によって得られた $L\beta$ 、 $L\gamma$ のスペクトルの結果をそれぞれ示す。真空紫外分光系の絶対感度較正は自己吸収の影響を少なくするために実験領域のガス圧力が可能な限り低い0.27Paで行った。次に、これらのスペクトル

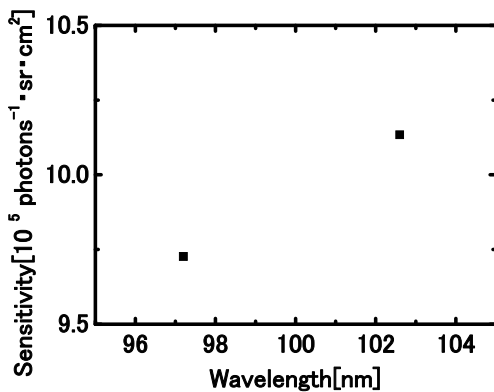


Fig. 6 Absolute sensitivity of VUV Spectroscope.

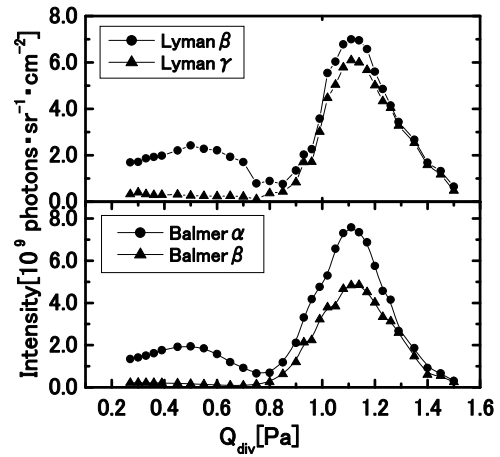


Fig. 7 Gas pressure dependence of intensity of $H\alpha$, $H\beta$, $L\beta$ and $L\gamma$.

分光器からの出力 $S(\lambda_{vis, VUV})$ と可視分光系の逆感度 $R(\lambda_{vis})$ を用いて(4)式から真空紫外分光系の逆感度を求めた。Fig. 7に原子分岐線対法を用いて得られた真空紫外分光系の逆感度を示し、 $L\beta$ は 10.1×10^5 [Potons/sr/cm²]、 $L\gamma$ は 9.73×10^5 [Potons/sr/cm²]という値が得られた。

次に、得られた真空紫外分光系の逆感度を用いて水素シートプラズマの接触ガス流量を増加させたときの水素再結合プラズマが生成される過程における可視・真空紫外分光の絶対感度較正結果をFig. 7に示す。感度較正を行った0.27Pa付近では分岐線対の強度比である $H\alpha/L\beta$ 、 $H\beta/L\gamma$ はほぼ $A_{vis} \nu_{vis} / A_{VUV} \nu_{VUV}$ の比で一定であることに対し、再結合プラズマ状態に向かうにつれてその値が増加、1.1付近で極値を持つことがわかった。この結果から電子励起基底状態の水素原子に再結合プラズマ状態でLyman seriesの再吸収が生じ、電子が再び上準位にポンピングされることによってBalmer seriesの強度が増加するため、分岐線対の強度比が再結合プラズマ状態で増加するものと考えられる。

本研究では絶対感度較正された可視分光系と原子分岐線対法を用いて真空紫外分光系を分光放射輝度で感度較正した。感度較正した可視・真空紫外分光系で高熱流シートプラズマ生成装置 (TPD-Sheet IV) における再結合プラズマ生成過程の分光観測を行うことによって Lyman series と Balmer series の強度比が再結合プラズマ状態で増加することを示した。

4-2. ダイバータ模擬装置での熱流速の空間分布測定

プラズマ周辺での流速の増加は、非接触

プラズマ形成過程においてプラズマ電流（プラズマ圧力）が減少する一方で、ターゲットの熱負荷低減を抑制することが懸念されている。しかし、非接触プラズマ形成過程におけるプラズマの流速増加の原因に対して、プラズマ圧力や熱流束に関する実験はあまり行われていない。

本研究ではダイバータ模擬装置 TPD-Sheet IVを用いて、非接触プラズマ形成過程におけるプラズマの熱流束の特性をマッハプローブと Langmuir プローブにより測定し、プラズマの流速の増加について調べることを目的としている。

運動エネルギー K とプラズマ圧力 U は、それぞれ次のようになる。

$$K = \frac{1}{2} n_e m_i v_i^2 \quad U = n_e k (T_e + T_i)$$

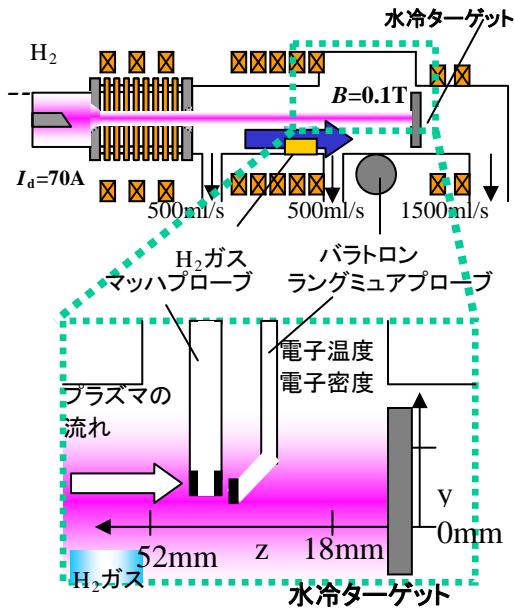


Fig. 8 Schematic diagram of TPD-Sheet IV and measuring system.

プラズマ流速 v_i は、マッハプローブにより、電子温度・密度は Langmuir プローブにより求めた。また本計算では、 $T_e \sim T_i$ として、各物理量を求めた。

Fig. 9 にプラズマ厚さ方向に対するマッハ数の特性をしめす。マッハ数は 0.4Pa (●) でプラズマ中心 ($Y=0\text{mm}$) のみ大きくなっている。更にガス圧を増加させると、周辺 ($Y=5\text{mm}$) で大きくなり、0.9 (●) から 1.0Pa (▼) の非接触プラズマでは中心のマッハ数は小さくなることわかる。このことからマッハ数は、プラズマ中心部と周辺部で特性が異なることわかる。

Fig. 10 にプラズマ厚さ方向に対する熱流

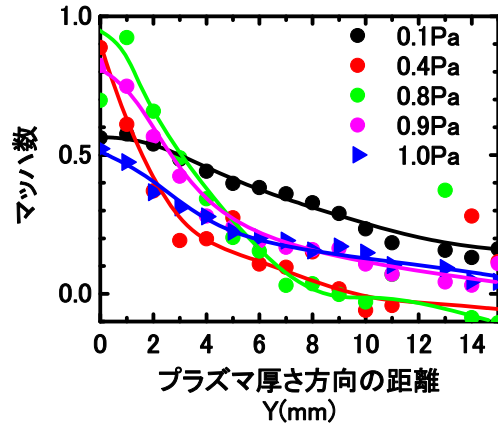


Fig. 9 Characteristics of Mach number.

束、運動エネルギー、更にプラズマ圧力の特性を示す。非接触プラズマ形成過程において、プラズマ圧力は、ガス圧力の増加に伴い徐々に減少している。一方、運動エネルギーは 0.4 Pa において増加しており、プラズマ中心部で急増しており、マッハ数の結果と一致している。この結果、中心部の熱流束 Q は、周辺部に対して減少率が緩やかになっていることがわかる。

非接触プラズマ形成過程において、プラズマ圧力は、ターゲット方向に対して徐々に減少している。また 0.4Pa においてプラズマの圧力勾配が大きくなっている。

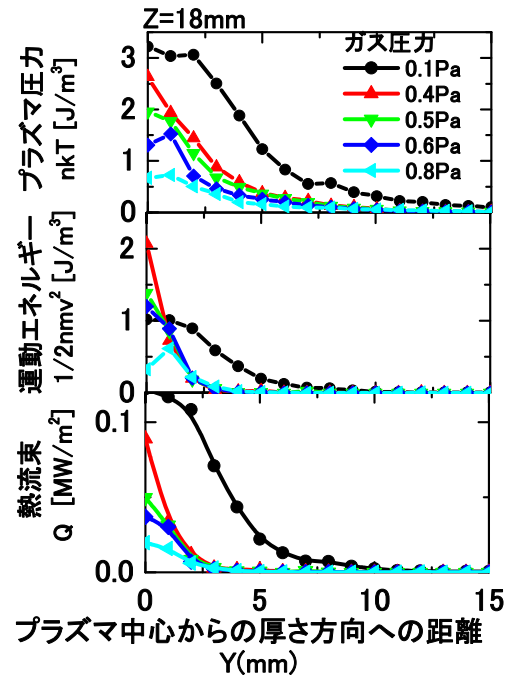


Fig. 10 Spatial profile of heat flux, kinetic energy, and plasma pressure.

一方、運動エネルギーはターゲット方向に対して増加している。特に 0.4Pa において急増しており、これは、マッハ数の特性に対応している。このことからプラズマの流れ方向（z 方向）の圧力勾配によりプラズマの流れが発生し、その結果、運動エネルギーが増加したと予想される。熱流束 Q は、プラズマ圧力と運動エネルギーの和に依存することから、運動エネルギーの急激な増加が熱流束の空間分布特性に影響を与えていることを明らかにした。

非接触プラズマ形成過程でのプラズマ圧力、運動エネルギー、熱流束の関係を調べた結果、以下のような結論を得ることができた。

1. マッハ数は、プラズマ中心部と周辺部で特性が異なることを示した。特にガス圧増加に従い非接触プラズマが形成される 0.4Pa の中心において増加し、その後周辺で増加する。
2. 接触ガス量の増加による熱流束の局所的増加は確認されなかったが、運動エネルギー増加が、熱流束の減少を妨げており、熱負荷の空間分布特性に影響を与えていることを示した。
3. 運動エネルギーはターゲット方向に対して増加しており、特に非接触プラズマが形成される 0.4Pa において急増している。運動エネルギーの急激な増加が熱流束 Q の分布に影響を与えていることを実験的に明らかにした。

今後の課題として、放電電流の更なる増加によりプラズマ密度を増加させ、部分非接触プラズマを形成し、その際のプラズマ流束、熱負荷分布、さらには光吸収の影響を実験的に明らかにすることが必要である。

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 4 件)

- 1) 利根川昭, 河森栄一郎, Journal of Plasma and Fusion Research, 83 (2007) pp1010-1013.
- 2) A. Tonegawa, H. Masumoto, T. Hishijima, N. Ono, K. Kawamura, Journal of Plasma and Fusion Research, 2 (2007) pp1079-1083.
- 3) A. Tonegawa, T. Nishijima, H. Ishioka, A. Nakanowatari, K. Kawamura, INTERNATIONAL WORKSHOP ON BURNING PLASMA DIAGNOSTICS, 1 (2007) pp234-237.
- 4) T. WATANABE, K. TAKAYAMA, A. Tonegawa,

K. KAWAMURA, H. HOJO, Journal of Advanced Science, 19 (2008) pp74-87.

[学会発表] (計 3 件)

- 1) 小野督幸, 中野渡歩, 青山健太, 水島龍徳, 利根川昭, 河村和孝, 第 62 回日本物理学会年次大会, 北海道大学札幌キャンパス 2007 年 9 月 21 日.
「非接触プラズマでの光吸収とプラズマ流速計測」
- 2) 小野督幸, 中野渡歩, 青山健太, 水島龍徳, 利根川昭, 河村和孝, 第 24 回プラズマ・核融合学会年会, イーグルひめじ (姫路市) 2007 年 11 月 29 日.
「非接触プラズマにおける光吸収のプラズマ流速への影響」
- 3) 水島龍徳, 小野督幸, 柴田俊充, 利根川昭, 河村和孝, 第 63 回日本物理学会年次大会, 近畿大学本部キャンパス, 2008 年 3 月 23 日
「非接触プラズマでの磁力線方向の熱流速の空間分布測定」

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
- (2) 研究分担者
なし
- (3) 連携研究者
なし