

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 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540507

研究課題名（和文）可変波長スペクトルカメラによるプラズマイメージング分光の開発とその応用

研究課題名（英文）Development of the Plasma Imaging Spectrometry Using Tunable Spectra Camera and its Applications

研究代表者

門 信一郎（KADO SHINICHIRO）

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：10300732

研究成果の概要（和文）：プラズマからの輝線スペクトル強度比を用いた分光診断は、絶対感度較正を必要とせず（波長相対感度のみ）、衝突輻射モデルと組み合わせることで電子密度および電子温度を推定する有用な方法である。その手法として、従来グレーティング分光器による空間有限点のスペクトルを得る発光分光法か、あるいは干渉フィルタによる単一波長のイメージング計測が用いられてきた。本研究では両者の欠点を補う計測法として可変波長液晶リオフィルタによるイメージング分光法を提案し、その適用可能性を検討した。測定可能なヘリウム原子輝線スペクトルの選定をおこない、その感受性（複数輝線の強度比から電子密度・電子温度を求めるための衝突輻射モデルへの収束特性）を調べ、本システムによるイメージング分光の実現が可能であることを示した。さらに、接写光学系を導入することで視野を拡大し、明るく、自由度が高いスペクトラカメラの光学配置を実現した。

研究成果の概要（英文）：Spectroscopy for line intensity ratio from plasma emission only needs relative intensity calibration and is regarded as an useful method to determine the electron density and temperature by combining with the collisional-radiative(CR) model. We have developed an imaging spectrometry technique that uses the wavelength-tunable interference filter based on liquid-crystal technology known as a type of "Lyot filter". Proof-of-principle experiments were conducted for He I spectra in pure helium discharge in the MAP-II (material and plasma) linear divertor simulator at the University of Tokyo. The CR model uses the optical escape factor approximation in dealing with radiation trapping. Moreover, we have improved the prototype spectra camera configuration to yield brighter and more flexible optical arrangement by adopting the optics for macro photography.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：プラズマ科学

科研費の分科・細目：基盤研究(C)

キーワード：(1) 液晶リオフィルタ (2) 衝突輻射モデル (3) ダイバータプラズマ (4) イメージング分光 (5) 画像計測 (6) MAP-II (7) ダイバータ模擬装置 (8) スペクトル線強度比法

1. 研究開始当初の背景

プラズマ発光分光法 (OES) はプラズマ研究における基本計測の一つであり、広く用いられている。特に、適切な輝線の組み合わせを選択し、その輝線スペクトルの強度比から衝突輻射モデル[1]を用いてプラズマの温度や密度などの情報を得る、いわゆる線強度比法は、静電プローブが使えない高温高密度のプラズマにおいて、絶対感度較正を必要とせず (波長相対感度のみ) プラズマに擾乱を与えない有効な計測手法である。

核融合境界層・ダイバータプラズマでは、燃料の水素同位体や生成物のヘリウムからの輝線が有用な線強度比法のターゲットである。線強度比法の有用なターゲットとして用いられてきた。その計測には、従来グレーティング分光器による空間有限点のスペクトルを得る発光分光法か、あるいは干渉フィルタによる単一波長のイメージング計測が用いられてきた。

線強度比の分光器を用いた計測には分解能が0.1~1 nm程度の波長領域が広い低分散の分光器が適しているが、観測領域は入射スリット方向の1次元に限られる。OESの欠点である、計測値が視線方向の積分量となることは周知の事実であり、複数の視線で測定した線積分の結果をアーベル逆変換することにより、空間分布を得る手法が標準的である。しかしながら、アーベル逆変換は、誤差が大きいく、衝突輻射モデルに必要な精度を得るのは困難である。

一方、核融合分野でも、基礎及び産業応用プラズマにおいても、プラズマパラメータは磁場や流れに平行な方向にも垂直な方向にも空間分布をもつことから、イメージング計測の需要が高まっている。干渉フィルタで特定波長を選択し、その波長のプラズマのイメージを CCD 検出器を用いて計測することにより、ピクセルベースのアーベル逆変換を行えば高精度で空間分布を再生することができ、プラズマのダイナミックな挙動を可視化することが可能となる。

著者らのこれまでの研究において、電離度が低いプラズマにおいては、輻射捕獲過程を考慮しないと、衝突輻射モデルによるパラメータ計測に有意な誤差を生じ、適用不能になることを指摘している[2]が、その際、発光の空間分布の評価が重要な役割を担うことを確認している。従来研究では、分布形状を過程することで輻射捕獲がモデル化されているが、現実のプラズマは単純な形状ではない。これらプラズマの解明にもイメージング分光が重要な役割を果たすと期待される。

2. 研究の目的

そこで本研究では、分光器と干渉フィルタ双方の欠点を補う計測法として可変波長液晶リオフィルタによる分光イメージング法を提案し[3]、その適用可能性を検証することを目的とした。

図1に模式化した動作原理を示す。本リオフィルタ(Varispec: VIS-7-20)は6段のユニットがタンデム接続されており、各ユニットは直線偏光子、固定波長板(石英等の複屈折結晶)、ネマチック液晶からなる。目的とする波長の固定波長板通過後の偏光状態が、次段の偏光軸にそろった直線偏光になるようネマチック液晶への印可電圧が制御されている。それ以外の波長成分は楕円偏光となり、直線偏光子により楕円度に応じて減衰する。

固定波長板の厚さによって位相差の透過波長の規則性、すなわち自由スペクトル領域を狭めていくことができる。したがって低次の段から高次の段へ進むに伴い、偏光干渉の結果、可変波長フィルタの性質が得られる。

この液晶リオフィルタの性能を詳細に調べ、適切な光学系を用いることで任意の波長のイメージが得られる「スペクトルカメラ(スペクトラカメラ)」を開発する。

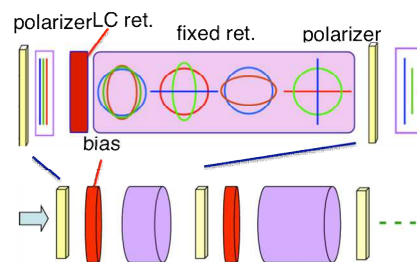


図1 可変波長液晶リオフィルタの動作原理模式図。

3. 研究の方法

液晶リオフィルタとして CRI inc., VariSpec, VIS-7-20 (可変波長範囲: 400-720 nm, $\Phi \approx 20$ mm) を用いた。プラズマ実験は東京大学核融合ダイバータ・境界層プラズマ模擬装置 MAP-II で行った[4]。

研究を進める指針は以下の3項目に大別される。

(1) 液晶リオフィルタの性能評価:

液晶リオフィルタを透過した連続スペクトル光源(タングステンハロゲンランプ)を低分散の分光器でスペクトル測定することで行った。

(2) 液晶リオフィルタスペクトラカメラのプラズマイメージング分光への適用可能性の評価：

対物レンズ光学系、可変波長液晶リオフィルタ及び2次元検出器を用いたシステムを液晶リオフィルタスペクトラカメラと命名する。相対感度較正し、波長毎のイメージから線強度比のイメージを求め、それに衝突輻射モデルを適用し、電子温度や電子密度を推定する。その際、その際、イメージング計測に対応した輻射捕獲過程の組み込みを考慮する。

得られたパラメータは静電プローブによる計測値と比較する。

(3) 小型可搬かつ汎用性の高いシステムの開発：

従来システムは大型で種々の装置に適用する障害となっていた。そこで近年小型化が進む検出器を採用し、可搬性の高いシステムを構築する。これにより、従来に比して装置間の比較が容易になると期待される。さらに、リオフィルタの形状によるケラレを回避し、汎用性の高い対物レンズシステムが要求される。

4. 研究成果

4.1 液晶リオフィルタの性能評価

本リオフィルタの波長領域は 400-720 nm、波長ランダムアクセスの応答時間は 50-150 ms である。波長空間では、バンド幅は波長とともに単調増加し、半値全幅 3.5-12 nm 程度である。

ただし適用に際し、干渉フィルタに比べ半値幅が広いこと、近接する明るい輝線による対象輝線への混濁に注意を要する。さらに、ある設定波長時に別の波長が透過してくる「バンド外漏れ光（リークバンド）」が存在することを確認した。具体的には、455 nm 以下にチューニングすると、548 nm より長い波長において、リークバンドが発生する。設定波長を変化させるに従い、リークバンドも移動する。そこで、広域の波長フィルタを組み合わせる、漏れ光が確認される領域を避ける等の対策が必要であることを提示した[3]。原因は各ユニットの設置誤差によるものと推測される。現在、より積極的なリークバンド除去の開発を進めている。

4.2 プラズマイメージング分光への適用可能性の評価

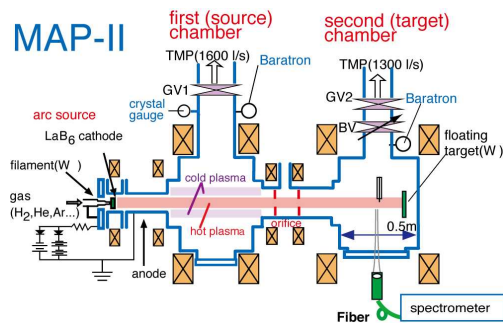


図 2 東京大学ダイバータ・境界層プラズマ模擬装置 MAP-II(Material And Plasma)。

イメージング計測は液晶リオフィルタと CCD カメラ(Roper, EEV, 1024 x 256 pixels, ピクセルサイズ 26 μm), 及びそれらを接続する写真レンズ(Nikkor, F/2.8, $\Phi=24$ mm)を用いて行う。光学倍率は 0.0488 であり、有効観測領域は 199 x 140 mm^2 である。発光はターゲットチェンバの側面に設置された観測窓から観測し、プラズマの半径方向からの分光イメージを得る。

イメージング計測における利点の 1 つはプラズマの発光分布を広範囲にわたり数百 μm の高解像度で詳細に計測できることであり、波長分散型分光器と比べ Abel 逆変換を正確に施すことができる。

衝突輻射モデルを用いた線強度比法をイメージング分光に適用し、電子密度、電子温度を推定した結果と、静電プローブ等による計測値とを比較することで、原理検証実験を行った[5]。特に、核融合生成物としてプラズマの周辺部に存在するため計測に適するヘリウム原子の光再吸収過程（輻射捕獲過程）に着目し、イメージング計測に組み込む試みを行った。

測定可能な輝線の選定をおこない、その感受性（複数輝線の強度比から電子密度・電子温度を求めるための衝突輻射モデルへの収束特性）を調べた。これによって、光再吸収に鋭敏な輝線 5 本と他計測による電子密度を利用した高精度法、輝線 5 本から光再吸収割合、電子密度、電子温度の 3 パラメータを同時に決定する自己完結法、および光再吸収に鈍感な輝線 3 本と再吸収割合の概算値を利用する簡易法とを確立させ、それらを比較した。

輻射捕獲の影響を受けにくい輝線群(471 nm: 4^3S , 587nm: 3^3D , 706 nm: 3^3S)を使用する方法と輻射捕獲の影響を強く受ける輝線群(471 nm: 4^3S , 501 nm: 3^1P , 667 nm: 3^1D)を併用する方法を組合せることによって、輻射捕獲の影響下においても一般的に使用できるような可視分光手法を提案した。

この手法に基づき、MAP-II 装置の純ヘリウム放電をスペクトラカメラで計測し、アーベル逆変換によって局所値に直し、電子温度・電子密度の2次元分布を取得した。得られた電子温度・密度の分布プローブ計測値と比較を行ったところ、絶対値、空間分布形状とも、比較的よい一致が得られた[6].

4.3 小型可搬かつ汎用性の高いシステムの開発.

従来は CCD 等の 2 次元検出器に対し、写真レンズを対物レンズとして用い、その先端に液晶リオフィルタを設置していた(図 3(a)). その配置では、視野の多くがリオフィルタ筐体にケラレ、さらに、結象位置からずれたケラレ部分の境界がボケとなって軸外光の減衰を引き起こすため、絞り(F 値)を大きくすることで被写界深度を深め、境界を鮮明にした状態で計測をおこなわざるをえなかった。ただし、著しい光量の損失を許容しなければならなかった。

そこで、写真レンズを3本用い、接写(マクロ撮影)光学を導入した。1:1のマクロレンズ光学系の平行光部分にリオフィルタを挿入し、中間結像面へ対物レンズでプラズマの像を導くことで、視野が有意に拡大し、かつ F 値が小さい明るい光学系を実現した(図 3(b)). 本配置により、口径が小さいリオフィルタの利用価値が向上し、対物レンズの選択の自由度も高まった。これにより、リオフィルタスペクトラカメラの確立された配置が得られたと言える。

現在までプロトタイプとして用いた Roper Scientific (Princeton Instruments)社 冷却 CCD システム(EEV 1024×256, ST-138 コントローラ, PCI Bus, Desktop PC)は前面照射の旧型フルフレーム CCD 素子であることに加え、大型のコントローラや専用ケーブル, PCI ボードに対応したデスクトップコンピュータを必要とし、可搬性には乏しかった[3]. 現在はさらなる小型軽量化, 可搬性向上を目指し、近年小型化が目覚ましい USB 接続型背面照射冷却 CCD 検出器の導入を進めている。

引用文献

- [1] T. Fujimoto, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer **21**, 439 (1979).
- [2] Y. Iida, S. Kado, A. Okamoto *et al.*, J. Plasma Fusion Res. SERIES, **7**, 123(2006).
- [3] S. Kado, H. Suzuki, Y. Kuwahara, *et al.*, Plasma Fusion Res. **2**, S1125 (2007).
- [4] S. Kado, Y. Iida, S. Kajita *et al.*, J. Plasma

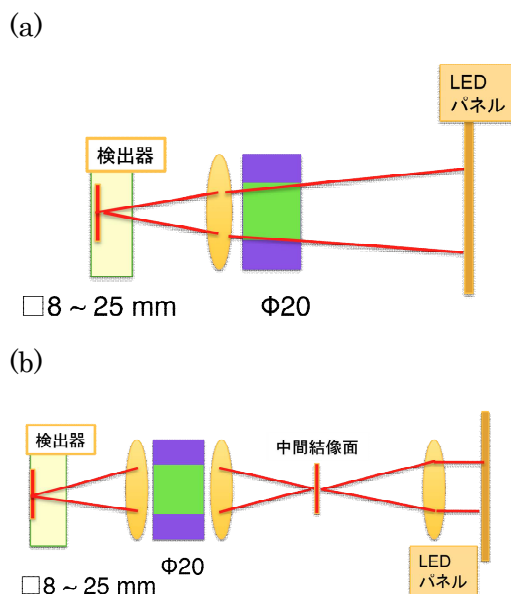


図 3(a) 従来の観測視野 (b) 改善された観測視野. 白色 LED パネルを用いて評価を行った.

Fusion Res. **81**, 810 (2005).

[5] 鈴木弘, 修士学位論文, 2009年2月, 東京大学.

[6] 村木厚哉, 修士学位論文, 2011年2月, 東京大学.

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 14 件)

< 査読有 >

[1] S. Kado, K. Suzuki, Y. Iida, A. Muraki, "Doppler and Stark broadenings of spectral lines of highly excited helium atoms for measurement of detached recombining plasmas in MAP-II divertor simulator", J. Nucl. Mater. **415**, S1174-S1177. (2011).

[2] H. MATSUURA, N. INAGAKI, S. KADO, S. MASUZAKI and A. TONEGAWA, "Neutral Particle Transport Simulation around a V-Shaped Target Using DEGAS 2 Code", Plasma and Fusion Research **6**, 2401104 (2011).

[3] T. Shikama, K. Fujii, S. Kado, H. Zushi, M. Sakamoto, A. Iwamae, M. Goto, S. Morita, and M. Hasuo, "Plasma polarization spectroscopy of atomic and molecular emissions from magnetically confined plasmas", Canadian Journal of Physics **89** 495-501 (2011).

- [4] S. Kado, T. Oishi, M. Yoshinuma and K. Ida, "Grating spectrometer system for beam emission spectroscopy diagnostics using high-energy negative-ion-based neutral beam injection on LHD" Rev. Sci. Instrum. 81, 10D720 (2010).
- [5] T. Oishi, S. Kado, K. Ida, M. Yoshinuma, H. Nakano and K. Yamazaki
Poloidal beam emission spectroscopy system for the measurement of density fluctuations in Large Helical Device", Rev. Sci. Instrum. 81, 10D719 (2010).
- [6] S. Kobayashi, S. Kado, T. Oishi, T. Kagawa, S. Ohshima, T. Mizuuchi, K. Nagasaki, S. Yamamoto, H. Okada, T. Minami, S. Murakami, H. Y. Lee, T. Minami, Y. Nakamura, K. Hanatani, S. Konoshima, M. Takeuchi, K. Toshi and F. Sano, Rev. Sci. Instrum. 81, 10D726 (2010). Application of beam emission spectroscopy to NBI plasmas of Heliotron J
- [7] Y. Iida, S. Kado, A. Muraki, and S. Tanaka
Application of optical emission spectroscopy for He I considering the spatial structure of radiation trapping in MAP-II divertor simulator, Rev. Sci. Instrum. 81, 10E511 (2010).
- [8] Yohei Iida, Shinichiro Kado, and Satoru Tanaka
Calculation of spatial distribution of optical escape factor and its application to He I collisional-radiative model
Phys. Plasmas 17, 123301 (2010)
- [9] H. Matsuura, K. Nakano and S. Kado
"Application of a Temperature Gradient Type Thermal Probe to the Discharge Plasma"
Japanese Journal of Applied Physics, 49, 08JD03 (2010)
- [10] T. Shikama, S. Kado, Y. Iida, and K. Suzuki,
"Construction of coronal models for H₂ d-a and I-B transitions for the evaluation of ro-vibrational temperatures"
Nucl. Instrum. Method A 623, 744 (2010) .
- [11] T. Shikama, S. Kado, K. Kurihara, and Y. Kuwahara, "Rotational excitation of hydrogen molecules in low temperature plasmas", Phys. Plasmas 16, 033504 (2009).
- [12] Filippo Scotti and Shinichiro Kado,
"Comparative study of recombining He plasmas below 0.1 eV using laser Thomson scattering and spectroscopy in the divertor simulator MAP-II", J.

Nucl. Matter. 390-391, 303-306 (2009) .

< 査読なしプロシーディングス >

- [13] Shinichiro KADO, Xiaqi XI, and Junyu ZHAO, Development of the High-Throughput Transmission Grating Spectrograph for the TV Thomson Scattering Diagnostics on EAST Tokamak, JSPS-CAS Core University Program Seminar on Production and Control of High Performance Plasmas with Advanced Plasma Heating and Diagnostic Systems (1 - 4 November, 2010, Guilin, China), NIFS-PROC Series 84, pp.337-346.(2011.2.1)
[<http://www.nifs.ac.jp/report/NIFS-PROC-84.pdf>]

- [14] Shinichiro KADO, Filippo SCOTTI, Xiaqi XI, and Junyu ZHAO, Evaluation of the Optical Design of Laser Thomson Scattering Diagnostics for High-Temperature EAST Tokamak and Low-Temperature MAP-II Divertor Simulator, Proceeding of JSPS-CAS Core University Program Seminar on Production and Control of High Performance Plasmas with Advanced Plasma Heating and Diagnostic Systems (4-7 November 2008, Lijiang, China), NIFS-PROC Series 84, pp.221-225. (2009.1.22)
[<http://www.nifs.ac.jp/report/nifs-proc77.pdf>]

[学会発表] (計 16 件)

< 国際会議 >

- [1] S. Kado, Temperatures of Electron, Ion and Gas in Low Temperature Recombining Plasmas Measured Using Laser Thomson Scattering and Stark Spectroscopy (レーザートムソン散乱法およびシュタルク分光法を用いた低温再結合プラズマの電子温度・イオン温度・ガス温度) Plasma Conference 2011 石川県立音楽堂 (石川県) 2011.11.21-25, 22C09 (2011). (招待講演)
- [2] S. Kado, T. Oishi, M. Yoshinuma and K. Ida
Grating spectrometer system for beam emission spectroscopy diagnostics using high-energy negative-ion-based neutral beam injection on LHD, 18th Topical Conference, High Temperature Plasma Diagnostics, Wildwood, New Jersey, May 16-20, 2010, F14.
(ポスター発表 : 査読論文[4])
- [3] Shinichiro Kado, Kenji Suzuki, Yohei Iida, Atsuya Muraki, Doppler and Stark Broadenings of Highly Excited Helium Atoms for the

Measurement of Detached Recombining Plasmas in MAP-II Divertor Simulator, 19th International Conference on Plasma Surface Interaction May 24-28, Hotel Catamaran Resort and Spa, San Diego, P1-88,

(ポスター発表：査読論文[1])

[4] S. Kado, A. Muraki, Y. Iida and K. Suzuki, "Application of the Tunable Lyot Filter Spectra Camera to Helium Line Emissions in MAP-II Linear Divertor Simulator (II)", Combined meeting of the 2nd NIFS-CRC International Symposium on Plasma-Surface Interactions, the 1st International Workshop on "Lithium Applications to Boundary Control and their Effects on Core Plasma Performance in Fusion Devices" and the 3rd Korea-Japan Workshop on "Edge-Plasma and Surface Component Interactions in Steady State Magnetic Fusion Devices", National Institute for Fusion Science, Toki, Gifu, Japan, 18-20 January 2010.

[5] Shinichiro Kado, "Laser Thomson Scattering (LTS) in very Low Temperature Plasmas in MAP-II Divertor Simulator" Workshop on Advanced Technology of Lasers for Understanding of Plasma Physics, Korea-Japan Fusion Cooperative Program, KAIST, Daejeon, 13-14 February 2009.

[6] Shinichiro KADO and Filippo SCOTTI, "Laser Thomson Scattering and Optical Emission Spectroscopy for Low Temperature Recombining Plasmas", meeting abstract for the 7th EU-Japan Joint Symposium on Plasma Processing, Château Liblice, Liblice, Czech Republic, 2009.4.23-26. (招待講演)

<国内学会>

[7] プラズマ中のヘリウム原子による赤外領域の輝線スペクトル
門信一郎, 雨宮拓也, 飯田洋平, 阿部翔太, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学 (兵庫県) 2012. 3. 24-27, 24aYE-6 (2012)

[8] シンポジウム「高温プラズマにける高 Z 多価イオンの分光と原子構造に関する研究の新展開」～趣旨説明～
門信一郎, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学 (兵庫県) 2012. 3. 24-27, 2012. 3. 25aYC-1 (2012)

[9] 門信一郎, Xiaoqi XI, Junyu ZHAO, 可視 TV トムソン散乱計測のための透過型回折格子を用いた高スループット分光器の開発,

日本物理学会 平成 22 年度 秋季大会 (大阪府立大学中百舌鳥キャンパス, 2010. 9. 23-26), 25pQJ-7 (2010)

[10] 門信一郎, 飯田洋平, 村木厚哉, ダイバータ模擬装置 MAP-II におけるイメージング分光へのヘリウム原子衝突輻射モデルの適用, 第 27 回プラズマ・核融合学会年会 (2010. 1. 30-12. 3) 北海道大学学術交流会館, 30pB1, (2010)

[11] 門信一郎 「究極の軽元素・水素と物質科学」
「核融合境界層プラズマにおける水素原子・分子の分光診断からわかること」超精密加工専門委員会第 60 回研究会 (2010/08/27 大阪ガーデンパレス)
(招待講演)

[12] 門信一郎 第 66 回日本物理学会年次大会 (新潟大) 招待講演「低温プラズマにおけるレーザートムソン散乱法の開発とその境界層プラズマ研究への適用」28aGZ-1 (招待講演) (年次大会は中止となったが一般講演は成立とされた)

[13] 門信一郎 「敵 (プラズマ) を知り, 己 (データ) を知らば・・・」第 12 回若手科学者によるプラズマ研究会, 日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所 2009. 3. 16-18. (招待講演)
[http://www-jt60.naka.jaea.go.jp/wakate/pdf/wakate_12/0316-p4_Kado.pdf]

[14] 門信一郎, Xiaoqi XI, Junyu ZHAO, EAST トカマクにおける可視 TV トムソン散乱計測系の開発, 日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009. 9. 25-28, 熊本大学黒髪キャンパス) 25pYP-3. (2009)

[15] 門信一郎, 村木厚哉, 飯田洋平, 鈴木健二, 液晶リオフィルタースペクトラカメラによるイメージング分光, プラズマ・核融合学会第 26 回年会 2009 年 12 月 1~4 日 京都市国際交流会館, 3pA04 (2009).

[16] 門信一郎, 鈴木健二, 飯田洋平, 村木厚哉, ダイバータ模擬装置 MAP-II におけるヘリウム再結合プラズマの原子温度, 日本物理学会第 65 回年次大会平成 22 年 (2010. 3. 20-23) 岡山大学津島キャンパス, 20aTJ-10 (2010)

[図書] (計 4 件)

[1] 門信一郎 (共著・著者多数) シミュレーション辞典, コロナ社 p. 299 (2012)

[2] 門信一郎, 核融合境界層プラズマにおける水素原子・分子の分光診断からわかること, 超精密 17 pp. 24-30 (2011)

[3] 門信一郎, 後藤基志, 澤田圭司, 岩前 敦, 蓮尾昌, 輻, 射再吸収とプラズマ分光診断
J. Plasma Fusion Res. Vol.86, No.11 (2010)631 - 646 (プラズマ・核融合学会誌)

[4] 門信一郎, 第 48 回プラズマ若手夏の学校テキスト「プラズマ分光診断システムの ABC ～発光分光法及びレーザートムソン散乱法を例に～」 (社)プラズマ・核融合学会 (2009).

6. 研究組織

(1) 研究代表者 門 信一郎

(SHINICHIRO KADO)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：10300732