

令和元年6月26日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05631

研究課題名(和文) 近赤外領域の分光法を用いた核融合プラズマ診断法の新展開

研究課題名(英文) Novel Development in the Fusion Plasma Diagnostics Using a Near-infrared Spectroscopy

研究代表者

門 信一郎 (Kado, Shinichiro)

京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授

研究者番号：10300732

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：核融合プラズマの分光診断において、これまであまり積極的なサーベイがなされることがなかった近赤外領域における分光診断に着目し、(i)可視および近赤外域の分光器をそれぞれ用いた感度較正法の実施、(ii)感度較正における2次回折光の影響評価、(iii)水素原子パッシュェン系列の観測、(iv)近赤外のヘリウム原子輝線を利用した衝突輻射モデルの検証、(v)近赤外域の連続スペクトルの観測を行った。本システムをヘリオトロンJに適用し、プラズマの放電モニタ映像(可視カメラ)において見られる明るい閃光が、高エネルギー電子によるホットスポット形成による連続スペクトルであることを特定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、可視分光や真空紫外分光が用いられてきた核融合プラズマの分光診断において、近赤外領域の適用可能性に着目し、その有用性を示した。近赤外領域には可視光の2次回折光が重畳される懸念があるため、定量的な検出には注意を要する。一方、近年、この領域の小型分光器や検出器のラインナップが充実してきているため、定量評価・較正の手法を確立することは、意義深い。ホットスポットはプラズマ対向壁の溶損や不純物発生の原因となり得るため、その観測・制御が不可欠であり、多くの金属の融点を含む1400-3200Kの温度に感受性が高い近赤外分光は、今後イメージ計測や高速化へと発展するニーズが高まってくると期待される。

研究成果の概要(英文)：We have focused on near-infrared (NIR) spectroscopy, which had not been extensively exploited, to extend the target wavelength regime. We applied a simple and portable monitoring system to acquire the NIR spectra of Heliotron J plasmas in an attempt to survey the brightness of an unknown/unused line in the spectra, and a continuum spectra in NIR regime. Calibration of the visible(VIS) and NIR spectrometers were performed using the shorter and longer side of the tungsten halogen lamp and the second-order diffraction component of the VIS region was assessed. The He I Line intensity ratio method based on the CR model was extended to the NIR region. As a proof-of principle experiment, the electron density in the edge region was determined for H2-He plasma. Observed black-body radiation was identified to be due to the hot spot caused by super-thermal electrons due to electron cyclotron heating(ECH).

研究分野：プラズマ理工学、核融合学、分光学、プラズマ診断法

キーワード：近赤外分光 ヘリウム輝線強度比 MAP-II ヘリオトロンJ ホットスポット 黒体輻射 絶対感度較正

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

プラズマの分光診断は、比較的容易で簡便なシステムで選択肢も多い伝統的な可視分光器、あるいはプラズマの輻射損失への寄与が大きい真空紫外領域の分光器が用いられてきた。真空紫外分光器は、装置全体を真空中に排気しなければならないので、装置が大がかりかつ、高額にならざるをえない。加えて、紫外域は鉄などの High-Z 不純物(Z はイオン価数)の輝線が多数存在し、特定輝線単独の計測がしばしば困難になる。

一方、可視光における分光計測は歴史が古く、光学コンポーネントが豊富である。特に水素原子バルマー系列(主量子数 $n = 2 - p$)、およびヘリウム原子($2L - mL'$; L, L' は軌道角運動量項, $m \geq 3$) の可視輝線スペクトルは、核融合プラズマのダイバータ、境界層領域のモニタリングとして有用とされている。

一般的な電離進行プラズマでは、低 n 準位からの発光が主であるため、バルマー α ($n = 2 - 3$; 656 nm)、バルマー β ($n = 2 - 4$; 468 nm)などが計測の対象となっている。一方、ダイバータプラズマの冷却に重要な指標となる非接触プラズマ、すなわち再結合プラズマにおいては、主量子数が高いリドベルグ準位からの発光を測定する場合、発光の系列極限が紫外域に現れる(HI 系列は 360 nm 付近、He I 3 重項 D 系列の場合 345 nm 付近)。

しかしながら、光ファイバーの伝送効率は、400 nm 以下で急激に低下するため、将来の大型実験炉のモニタリングにおいては、系列極限の計測が困難になると予想される。

2. 研究の目的

本研究では、これまであまり積極的なサーベイがなされることがなかった近赤外領域における分光診断に着目した。応募者はこれまでの研究(科研費基盤(C), 2012-2014 年度)において、特定のヘリウム原子の輝線のうち 1 重項 2P 準位の新たな評価方法として、1 重項 2S - 2P 遷移(2058.130 nm)の測光可能性を検討し、測定に成功した[1]。その過程において、近赤外領域の水素、ヘリウムの輝線が観測に十分な強度を有していること、少なくとも、ダイバータ模擬装置においては不純物による輝線の混濁が少ないことが見出された。

そこで、本研究では、この近赤外領域の輝線スペクトルの有用性を積極的に評価することを目的とした。

3. 研究の方法

2014 年に東京大学から筑波大学に移設した直線型の定常ダイバータ模擬装置 MAP-II(Material and Plasma)[2]、および京都大学のヘリカル型閉じ込め装置ヘリオトロン J [3] において近赤外分光の適用を試みる。

MAP-II 本体は、移設後再稼働に向けた改修を行っている状態である。大きな改修箇所は、放電電源回路の簡素化と操作性向上のための、安定抵抗回路部分を再構築である。旧回路では現有部品を活用するため、10 Ω 定格 3A の可変抵抗 2 つを直列から並列につなぎ替えるような複雑なスイッチ操作となっていたが、新回路では、電流値増加に沿って可変抵抗値を最適化できるように、定格 500W で、抵抗値それぞれ 460、30、10 Ω の可変抵抗を直接に配置し、放電電流を 5A 程度まで連続に増加させることを可能とした。その後、可変抵抗を短絡させ、合成抵抗 1 Ω の固定抵抗群によって 45A 程度までの直流アーク放電が安定化される仕組みとした。

MAP-II で先行的に行った近赤外分光には、256 ch の InGaAs アレイ(Hamamatsu, G9208-256W, 30(H) \times 500(V) μm^2 、ピクセルピッチ 50 μm)を、既存の分光器を改修することによって用いた。

本研究で初めて着手したヘリオトロン J における近赤外分光においては、チャンネル数を増やすことを目的として 512 ch の InGaAs アレイ(Hamamatsu G9206-512W, 10(H) \times 250(V) μm^2 、ピクセルピッチ 25 μm)を搭載した簡易分光器(Ocean optics, Inc., NIRQuest512- 2.2)を用いた。

近赤外分光器では、可視領域の 2 次回折光の重畳が懸念されるため、検出器の感度によっては短波長をカットするフィルタ(ロングパスフィルタ)を併用した。

4. 研究成果

(1)可視および近赤外域の分光器をそれぞれ用いた感度較正法の実施

感度較正に用いるタングステンフィラメントハロゲン標準光源(USHIO, JC100V500W)の分光放射照度はピーク波長 850 - 900 nm の短波長側(可視側)と長波長側(近赤外側)で色温度が異なる。すなわち完全な黒体輻射ではない。そこで、可視側と長波長側を別の関数で近似して感度較正係数を導出する必要性が認識された。

(2)感度較正における 2 次回折光の影響評価

可視光の 2 次回折光の近赤外域への重畳は、近赤外の較正係数に影響を与える。そこで、適切な 2 次回折光カットフィルタを用いた感度較正、あるいは測定領域の制限の必要性を示した。

一方、輝線の計測は、2 次回折光が近赤外の輝線とちょうど重なり合わない限り、分離することができる。むしろ、2 次回折光は、しばしば分散特性関数(検出器ピクセルと波長の関係を表す式[4])の決定には有用となる。

(3)水素原子パッシェン系列の観測、

MAP-II で採用した検出器 G9208-256W とヘリオトロン J における G9206-512W は最大感度波

長がそれぞれ 2.3 および 1.9 μm と異なり、本研究の対象輝線には、後者のほうが適しているが、画素の有効面積は前者の 3 分の 1 (30/50 x 500 : 10/25 x 250 = 3:1)であり、さらにそれを倍のピクセル数で受けるので、必然的に信号強度が弱くなる。

そこで、ペレット入射のような明るい発光に適用することから始めた。図 1 にペレット入射時(shot#69550)における近赤外スペクトルを示す。バルマー α (H α)線は、可視域において近赤外用グレーティング反射率および、InGaAs 検出器感度の低下があってもなお、強い発光を呈しており、その 2 次光が近赤外の 1312 nm に現れている。隣接するパッシェン β 線は 1282 nm であり、スペクトル幅に対して分離が可能であることが示された。

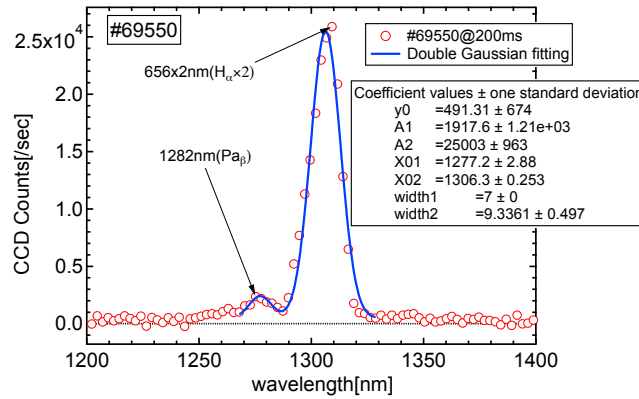


図 1 ヘリオトロン J におけるペレット入射時の近赤外スペクトル。2つのガウス関数でフィッティング。ピーク波長のフィッティング結果には 5 nm 程度、波長較正時の系統誤差が乗っていることに注意(shot# 69550)。

(4)近赤外のヘリウム原子輝線を利用した衝突輻射モデルの検証

ヘリウム原子の輝線強度比[5,6]は、1 重項と 3 重項とで電子衝突励起断面積のエネルギー依存性が異なるため、両者の比は電子温度に感受性が高く、同系列の比は励起後の励起・脱励起や輻射遷移による再分配が行われるため電子密度への感受性が高い。本研究では、近赤外の 3 重項 2S-2P 遷移(1083 nm)と可視の 3 重項 2P-3D 遷移(587.6 nm)の比が、電子温度に対して鈍感であるため、電子密度の計測に感受性が高いことを示した。

(5)プラズマ対向壁ホットスポットによる黒体輻射の観測

ウィーンの変位則より、黒体輻射のスペクトルは、1400-3200 K において、ピークが 2100-900 nm へシフトする。すなわち、この温度領域の計測に適することを示している。本システムをヘリオトロン J に適用し、プラズマのモニタ映像において、高エネルギー電子によるホットスポット形成に伴う黒体輻射が観測された。

図 2 にその結果を示す。観測ポートの制約で、2 次光カットフィルタを用いていないが、標準光源を用いた感度較正に定量性が満足される領域においてプランクの輻射式でフィッティングを行い、2400 K の黒体輻射が同定された。

ホットスポットはプラズマ対向壁の溶損や不純物発生の原因となり得るため、その観測・制御が不可欠であり、近赤外分光の有用性が高められた。

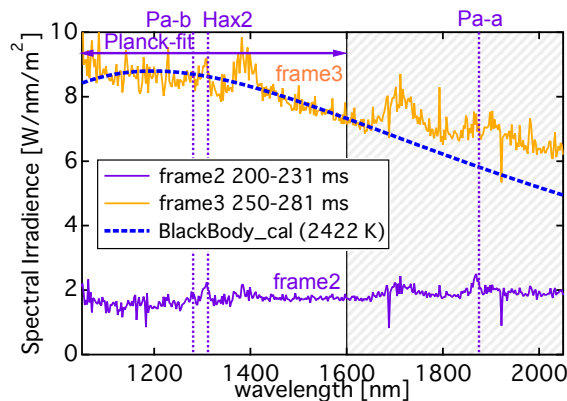


図 2. ECH によって生成された高速電子と壁との相互作用によると推定されるホットスポットの近赤外スペクトル(shot #69029)。

(6)総括

近赤外領域の分光診断における新たな展開として、輝線強度比に用いる輝線選択の拡張、ホットスポット検出への有益性が示された[7]。

さらに、この近赤外領域は Nd:YAG レーザー(1064 nm)を用いたレーザートムソン散乱スペクトルの計測に重要な領域でもある。高温プラズマでは、散乱スペクトルは 700 nm 程度まで広がり、それを干渉フィルターバンクで検出し、その強度比から電子温度を求めるため、強い輝線が混濁すると正しい温度を示さなくなる。

例えば、高性能のプラズマを達成するために、プラズマ対向壁のコンディショニングとして、リチウム壁を用いる場合、多くの Li 輝線は可視よりも短い領域に存在するが、Li II (812.6 nm) や、放射冷却のために行う窒素分子入射の場合に現れる 1st positive 帯(750 nm 付近)はスペクトル混濁の候補となり得る。

一方、制動放射のスペクトルは近赤外領域では無視できる程度に小さくなるため、連続スペクトルは、ほぼホットスポットの温度を反映すると見なせる。ホットスポットが観測視野の外側にある場合は、観測視野内の壁面に反射した間接光である「照り」を見ていることになるため、壁の分光反射率の影響を受ける。ただし、ウィーンの変位則による黒体放射ピークを有する波長域では、スペクトルの相対変化に鈍感であるため、得られる温度に与える影響は小さいことが示されている。

<引用文献>

- ① S. Kado, Y. Iida and T. Amemiya, JPS Conf. Proc. **1**, 015019 (2014).
- ② S. Kado *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **81** (2005) 810.
- ③ F. Sano *et al.*, Plasma and Fusion Research 41 (2000) 26.
- ④ S. Kado, J. Plasma Fusion Res. **83** (2007) 176. [in Japanese]
- ⑤ B. Schweer, G. Mank, A. Pospieszczyk *et al.*, J. Nucl. Mater., **196-198**, (1992) 174.
- ⑥ M. Goto, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, **76** (2003) 331.
- ⑦ S. Kado, A. Iwata, T. Kanazawa, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **89**, 10D129(2018).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Taiichi Shikama, Shinichiro Kado, Hiroyuki Okada, Satoshi Yamamoto, Leo Matsuoka, Toru Mizuuchi, Takashi Minami, Shinji Kobayashi, Kazunobu Nagasaki, Shinsuke Oshima, Yuji Nakamura, Akihiro Ishizawa, Shigeru Konoshima and Masahiro Hasuo, "Near-infrared Zeeman spectroscopy for the spatially resolved measurement of helium emission spectra in Heliotron J" Plasma Phys. Control. Fusion **61** 025001(2019) (査読有) <https://dx.doi.org/10.1088/1361-6587/aaebdf>
- ② S. Kado, A. Iwata, T. Kanazawa, H. Okada, S. Yamamoto, G. Motojima, H. Okazaki, T. Minami, S. Kobayashi, K. Nagasaki, S. Ohshima, Y. Nakamura, A. Ishizawa, S. Konoshima, and T. Mizuuchi "Application of portable near-infrared spectrometer to Heliotron J plasma diagnostics", Rev. Sci. Instrum. **89**, 10D129(2018). (査読有) <https://doi.org/10.1063/1.5039320>

[学会発表] (計 3 件)

- ① S. Kado, Equilibrium/Disequilibrium Features ~ in Fusion Edge And Laboratory Discharge Low-temperature Plasmas ~, 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics(AAPPS-DPP2018), The Kanazawa Chamber of Commerce and Industry& Ishikawa Prefectural Bunkyo Hall Organized by AAPPS-DPP, 2018.11.12-17. (招待講演)
- ② S. Kado, Application of He I Line Intensity Ratio Method to Lyot-Filter Based Imaging Spectrometry on MAP-II Divertor Simulator, the 12th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2018), Tsukuba, Japan, 2018.8.27-31.
- ③ S. Kado, A. Iwata, T. Kanazawa, H. Okada, S. Yamamoto, T. Minami, S. Kobayashi, K. Nagasaki, S. Ohshima, Y. Nakamura, A. Ishizawa, S. Konoshima, T. Mizuuchi, Application of Near-Infrared Spectroscopy to Heliotron J Plasma, Plasma Conference2017 (PLASMA 2017), 姫路商工会議所, 2017.11.20-24

[図書] (計 4 件)

- ① 門信一郎, プラズマ核融合学会、プラズマ計測～プローブおよび分光診断と基礎物理～ (改訂版), 第 57 回プラズマ若手夏の学校テキスト, pp. 1-20, 2018.
- ② Shinichiro Kado, "Laser Thomson Scattering (LTS)", Textbook for the 10th Korea-Japan Seminar on Advanced Diagnostics for Steady-State Fusion Plasma, 2018.
- ③ 門信一郎, プラズマ核融合学会、プラズマ計測～プローブおよび分光診断と基礎物理～、第 55 回プラズマ若手夏の学校第 30 回核融合炉夏期セミナーテキスト, pp. 56-75, 2016.
- ④ Shinichiro Kado, "Visible Spectroscopy", Textbook for the 9th Korea-Japan Seminar on Advanced Diagnostics for Steady-State Fusion Plasma, 2016.

6. 研究組織

(1)研究協力者

研究協力者氏名：四竈泰一

ローマ字氏名：Shikama, Taiichi

研究協力者氏名：坂本瑞樹

ローマ字氏名：Sakamoto, Mizuki

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。