

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540532

研究課題名(和文) 赤外線スペクトルを利用したヘリウム衝突輻射モデルとプラズマ診断

研究課題名(英文) Helium Collisional Radiative Model and Plasma Diagnostics by Using Infrared Spectra

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) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：ヘリウム原子の輝線スペクトル強度比を測定し、衝突輻射モデルを利用してプラズマの電子密度・電子温度を推定する、いわゆる「線強度比法」の利用が近年特に浸透してきた。しかしながら、ダイバータ領域や放電プラズマなど、電離度の低いプラズマが輻射場として自分自身の占有密度に影響を与える自己再吸収過程(輻射捕獲)の評価に重要な1重項2P準位の占有密度ないしその空間的な広がり、従来の可視分光の範疇では測定できない。本研究では、1重項2P準位の新たな評価方法として、これまで着目されなかった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。

研究成果の概要(英文)：In order to determine the electron density and temperature in fusion-relevant divertors and in divertor-simulating plasma facilities, the so-called "intensity ratio technique" of atomic helium line (He I) based on a collisional-radiative (CR) model has widely been used. Researchers have now recognized that the CR model will not give a correct answer unless the radiation trapping process between resonant singlet-P states and the ground state 1S is taken into consideration properly in low-temperature plasmas. In this research, we proposed a noble approach to measure the population of the single 2P states, by using a near infrared (NIR) radiative transition of singlet 2S-2P at 2058.130 nm. We developed a NIR spectrometer and success in measuring the line of interest in the MAP-II divertor simulator. The spatial distribution of the line exhibited a significant broadening in the spatial distribution, which indicates the effect of radiation trapping for the resonant state.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：近赤外スペクトル 衝突輻射モデル 輻射捕獲 ダイバータ模擬装置 MAP-II ヘリウム分光

1. 研究開始当初の背景

ヘリウム原子の輝線スペクトル強度比を測定し、衝突輻射モデルを利用してプラズマの電子密度・電子温度を推定する、いわゆる「線強度比法」の利用が近年特に浸透してきた。しかしながら、ダイバータ領域や放電プラズマなど、電離度の低いプラズマが輻射場として自分自身の占有密度に影響を与える自己再吸収過程(輻射捕獲)の評価に重要な1重項2P準位の占有密度、ないしその空間的な広がり、従来の可視分光の範疇では測定できない。そこで、ある仮定された空間分布形状の想定に頼り発光強度比の空間分布への感受性を調べる、計算に時間を要する光線追跡計算を行う、測定が大がかりになる1重項1S - 2P遷移(58.4 nm)の真空紫外分光計測を行う等のアプローチに頼らざるを得なかった[1]。

2. 研究の目的

本研究では、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た。具体的には、(i)その遷移の上準位である1重項2P準位占有密度の実測が可能なる分光システムを構築し、(ii)輻射捕獲を考慮した衝突輻射モデルに組み込む原理の実証を行い、(iii)プラズマ診断に適用する、ことを目的とした。

この輝線の有用性が確認されれば、より簡易なシステムで輻射捕獲を最も反映する1重項2P準位の評価が可能となる。

さらに、この輝線は1重項1S-2P遷移に比べ、吸収源となる下準位の占有密度が有意に小さいため、光学的に薄くなることが予測され、検出された信号強度を実際の輻射場の分布と解釈できる条件が緩和されると期待できる。

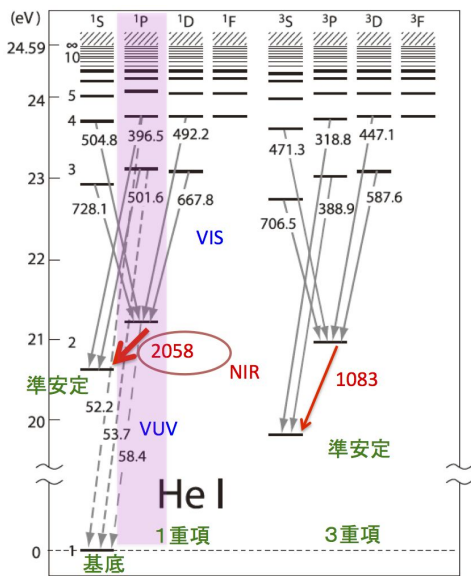


図1. ヘリウム原子エネルギー準位図

3. 研究の方法

本研究で改造・開発を行った分光システムを図2に示す[2]。可視分光に用いていた既存のツェルニ・ターナー型分光器(SOLAR TII社製 MS3504i, 焦点距離 $f = 35$ cm, F/3.8)を近赤外仕様に変更した。刻線数 300 G/mm、ブレイズ波長 1500 nm の回折格子を採用することで、近赤外領域の分光を可能とした。

検出器には、2段電子冷却型、256 ch の InGaAs リニアイメージセンサ(Hamamatsu G9208-256W)を用いた。感度波長範囲は 900 - 2550 nm、素子の冷却温度は -20 °C である。

測定対象となるプラズマを観測するポート部から光ファイバーによって伝送される光子は分光器入口スリットへ2枚の平凸レンズを用いて光学的にカップリングされる。スリット手前にフィルタボックスが装備しており、必要に応じて干渉フィルタの挿入が可能な構造となっている。

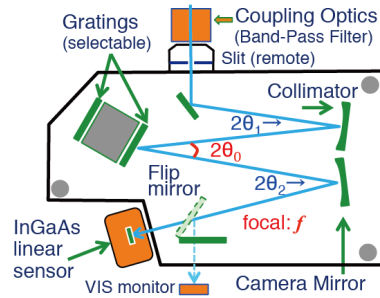


図2. 本研究で開発した近赤外分光システム[2]

4. 研究成果

(1) 分光器の較正

開発した近赤外分光システムを用い、ヘリウム放電ランプを用いて目的とする2S - 2P遷移(2058.130 nm)を確認した。波長同定のための較正光源としてはヘリウムの他に水素、ネオンの放電ランプを用い、可視光~近赤外にある輝線の多重回折光を利用した。

ゲルマニウムフィルタを通して検出可能であったことから、可視光からの高次回折光ではないことが確認できた。ただし、ゲルマニウムフィルタは2058 nmの輝線強度も数分の1程度まで低下させるので、計測はフィルタを用いずに行った。

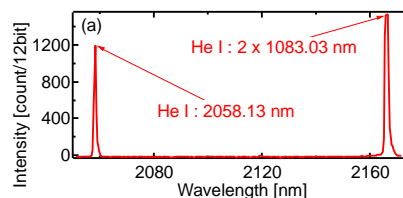


図3. 近赤外領域のヘリウム原子輝線スペクトル(放電ランプ)[2]

(2) 2S - 2P 遷移(2058.130 nm)の観測

東京大学ダイバータ模擬装置 MAP-II [3]のヘリウム放電に対し近赤外スペクトルの計測を行った。

プラズマは円筒形状をしており、空間構造はガウスあるいはダブルガウス分布でよく再現できる。

結果を図4に示す。可視光の空間分布計測には高解像度のリオフィルタスペクトラカメラ[4]を、電子密度の計測には静電プローブを用いた。

図4からわかるように、1重項 2P 準位の占有密度は他の輝線にくらべ、空間的に有意に広がっており、輻射捕獲の効果を反映する結果となった。これは、本研究代表者らが開発した、輻射捕獲の空間分布を考慮した衝突輻射モデル[5]からも予想される結果であり、計測の有用性が初めて示された。

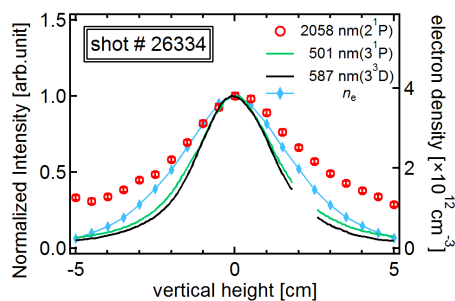


図4. ダイバータ模擬装置 MAP-II におけるヘリウム輝線強度および静電プローブによる電子密度の空間分布計測値。赤丸は1重項 2S-2P 遷移の近赤外スペクトル[2]。

(3) 光学的厚さの評価

上準位 q の系の大きさ L_q 、下準位 p の密度 n_p 、温度 400 K のとき、振動子強度 f_{pq} 、波長 λ_{qp} なる He I $q \rightarrow p$ 遷移に対する、スペクトル中心における光学的な厚さ τ_{pq0} は、

$$\tau_{pq0} = 1.16546 i f_{pq} (I_{qp} \times 10^{-9}) n_p L_q$$

で与えられ[1]、プラズマ中心を発した光子は体系境界で $1/\exp(\tau_{pq0})$ になる。

1重項 1S - 2P 遷移は $f_{pq} = 0.276$ であり、ヘリウム圧力 1 mTorr 時の基底準位密度のとき $\tau_{pq0} \sim 45 L_q$ となる。このとき $L_q > 2$ mm で光学的に厚くなり、発光強度の空間分布線積分値が実際の輻射場の局所分布を反映するとは限らない。

対して、1重項 2S - 2P 遷移は $f_{pq} = 0.376$ 、波長は 35 倍になるが、下準位密度が何桁も小さいので、たとえば、同圧力において 2^1S 準位密度が基底準位の 10^{-4} の場合でも光学的に厚い条件は $L_q > 45$ cm となる。

したがって半径数 cm のプラズマ柱で1重項 2S - 2P 遷移を観測して得られる発光強度の空間分布は、輻射場を視線方向に線積分値計測したものであるとみなせることが示唆

される結果となった。

引用文献

- [1] 門信一郎他「輻射再吸収とプラズマ分光診断」プラズマ・核融合学会 **86**, 631(2010).
- [2] S. Kado, Y. Iida, S. Kajita *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **81**, 810 (2005).
- [3] S. Kado, Y. Iida, T. Amemiya, J. Phys. Soc. Japan. (conf. proc.) 015019.(2014)
- [4] S. Kado, H. Suzuki, Y. Kuwahara *et al.*: J. Plasma Fusion Res. **2** (2007) S1125.
- [5] Y. Iida, S. Kado and S. Tanaka, Phys. Plasma **17**, 123301 (2010).

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 5 件)

- [1] 門信一郎, 理科教育の現場にプラズマ・核融合を, プラズマ・核融合学会誌, 91, 99-106 (2015), 査読無
http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2015_02/jspf2015_02-99.pdf

- [2] Shinichiro Kado, Thermal equilibrium/disequilibrium features in the excited-state temperature of atomic helium in MAP-II divertor simulator, Journal of Nuclear Materials (2014). 査読有 in press.
DOI: 10.1016/j.jnucmat.2014.12.089

- [3] S. Kado, Y. Iida, T. Amemiya, Measurement of Near-Infrared Atomic Helium Line for the Evaluation of Radiation Trapping in Map-II Divertor Simulator, J. Phys. Soc. Japan. (conf. proc.) 015019 (pp.1-4) (2014) 査読有
DOI: 10.7566/JPSCP.1.015019

- [4] M. Yamano, S. Kado, S. Watanabe, S. Tanaka, Liquid-Crystal-Based Tunable Lyot Filter Spectra Camera System Combined with Color CCD Detector, J. Phys. Soc. Japan. (conf. proc.) 015015(pp.1-4) (2014) 査読有
DOI: 10.7566/JPSCP.1.015015

- [5] Y. Iida, S. Kado and S. Tanaka, "On the application of He I collisional-radiative model to the He-H₂ mixture plasmas in MAP-II divertor simulator", J.Nucl. Mater. **438**, p. S1237-S1240(2013). 査読有
DOI: 10.1016/j.jnucmat.2013.01.274

〔学会発表〕(計 9 件)

[1] 門信一郎「理科教科書における光スペクトル再定義の提案」日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015.3.21-24,24aCK-4

[2] S. Kado, Excited State Temperature of Atomic Helium in MAP-II Steady-state Linear Divertor Simulator.
Decennial IAEA Technical Meeting on Atomic, Molecular and Plasma-Material Interaction Data for Fusion Science and Technology
Daejeon, Republic of Korea, IAEA, 2014.12.15 (招待講演)

[3] Shinichiro Kado, Thermal Equilibrium/Disequilibrium Features in the Excited State Temperature of Atomic Helium in MAP-II Divertor Simulator, 21st International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, Ongaku-do, Kanazawa, Ishikawa, Japan, National Institute for Fusion Science, 2014.5.26-30

[4] 門信一郎, 渡邊智史, 山野守史, 円筒プローブを用いた磁化プラズマ中の電子エネルギー分布関数計測, 日本物理学会第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27- 30 日, 東海大学) 30aAX-14.

[5] Shinichiro Kado, Anomalies in Various Temperature Diagnostics Using Spectroscopy and Laser Thomson Scattering, Japan- Korea Workshop on Anomalies in Plasma Science and Plasma Diagnostics, 2013.11.08~2013.11.09, Dong- A University, Busan, Korea

[6] 門信一郎, 飯田洋平, 山野守史, 渡邊智史, ダイバータ模擬装置 MAP-II におけるヘリウム赤外輝線スペクトルの空間分布, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013 年 9 月 25 日-28 日 徳島大学) 28aKC-10

[7] S. Kado, Y. Iida, T. Amemiya, Measurement of Near- Infrared Atomic Helium Line for the Evaluation of Radiation Trapping in Map- II Divertor Simulator
The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), Makuhari, Chiba, Japan, 2013.07.14~2013.07.19

[8] 門信一郎, 飯田洋平, 山野守史, 渡邊智史, 阿部翔太ヘリウム原子近赤外分光法のダイバータ模擬装置 MAP-II への適用, プラズマ・核融合学会 第 29 回年会, 29pC04, 2012.11.27-30 (クローバープラザ, 福岡県春日市).

[9] 門信一郎, 阿部翔太, 山野守史, 飯田洋平, 渡邊智史, 「プラズマイメージング分光の

ための可変波長液晶リオフィルタスペクトラカメラシステムの実用化」2012 年秋季大会 2012.9.18-21, 20pFA-9 横浜国立大学 (神奈川県横浜市)

〔図書〕(計 2 件)

[1] Satoru Tanaka and Shinichiro Kado, Analysis of Radioactive Release from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station , Reflections on the Fukushima Daiichi Nuclear Accident: Toward Social-Scientific Literacy and Engineering Resilience,(Chapter 3, pp 51-83) Springer; (2014/12/18)
http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-12090-4_3 (Open access)

[2] Shinichiro Kado, Textbook for Japan- Korea Seminar 2012 for Plasma Diagnostics, 2012.8.22-25, Organization committee for Japan- Korea Seminar 2012 for Plasma Diagnostics (13 pages) (2012)

6. 研究組織

(1)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