



Title	Simulation and experiments of optical emission spectroscopy for real-time plasma diagnostics
Author(s)	Arellano, Fatima Jenina Tolentino
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/98758
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

Abstract of Thesis

Name (ARELLANO FATIMA JENINA TOLENTINO)	
Title	Simulation and experiments of optical emission spectroscopy for real-time plasma diagnostics (実時間プラズマ診断を目指した発光分析シミュレーションおよび実験)
<p>Abstract of Thesis</p> <p>Optical emission spectroscopy (OES) is a highly valuable tool for real-time monitoring of plasma properties due to its non-intrusive and versatile nature. However, utilizing OES for real-time monitoring presents specific challenges, such as extracting the desired plasma characteristics from the information in the measured spectra and developing a corresponding real-time prediction model of the plasma properties. This work aims to address these specific challenges associated with determining the plasma parameters from the spectral measurements.</p> <p>The first part of this work takes a step towards a better understanding of the physics behind the measured spectra by validating existing widely-used simulation models with experimental measurements. Spectral line intensities are calculated through the one-way coupling of a one-dimensional Particle-in-cell/Monte Carlo collision (PIC/MCC) simulations with a global collisional-radiative model. In this way, the line intensities can be determined from specific electron density n_e and the electron energy distribution function (EEDF) values calculated using the PIC/MCC simulation for a capacitively coupled radiofrequency-argon plasma with pressure ranging from 2 to 100 Pa. Comparison of simulated spectral intensities to experimentally measured ones shows reasonable agreement for a gas pressure up to 20 Pa. The discrepancies at high pressures are attributed to incomplete ionization balance due to the neglect of the contribution from the metastable levels in basic PIC/MCC simulations, which is found to be important at this pressure range.</p> <p>The second part of this work aims to then make a prediction model of the n_e and the EEDF from the spectral data using machine learning (ML) techniques. It uses two different models to predict the normalized EEDF, namely the Kernel Regression for Functional Data and an artificial neural network. To predict the n_e, a Random Forest regression model is used. The ML models are trained with normalized simulated spectral intensities described in the first work, but this time with the peak-to-peak voltage varied from 200 V - 500 V. All three ML models developed in this study are found to predict the plasma parameters from the simulated spectral test data well. As an additional test, the model is also used to predict from experimentally measured normalized spectral intensities, in which the models show limited capability in predicting the n_e and the EEDF, indicating a need for further improvement in the robustness of these models.</p> <p>The last part aims to address the determination of plasma parameters during fluctuations and instabilities happening in magnetically confined plasmas over a short period of time (~ 100 μs). For such measurements, spectrometers with a high optical transmission-to-spectral resolution ratio must be used. A spatial heterodyne spectrometer (SHS) has field-widening prisms that realign the light passing through a detector, such that a higher resolution can still be achieved even with a large aperture size. In this study, the performance of an SHS in charge exchange spectroscopic measurements of the toroidal flow velocity and the ion temperature of the C⁶⁺ impurity ion in the Large Helical Device is explored. Additionally, the resulting measurements are compared to those of conventional dispersive spectrometers typically used and found to be in good agreement with them.</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (ARELLANO FATIMA JENINA TOLENTINO)		
論文審査担当者	(職)	氏 名
	主査 教授	浜口 智志
	副査 教授	桑原 裕司
	副査 准教授	垣内 弘章
	副査 准教授	濱田 幾太郎

論文審査の結果の要旨

本論文は、低温アルゴンプラズマの発光分光から得られる線スペクトルの相対的な強度比が、電子エネルギー分布に比較的強く依存することを利用し、発光分光データから、電子エネルギー分布、および、電子密度を導く手法を開発することを目的としたものである。その背景には、プラズマ中に擾乱を与えることなく、比較的簡便な方法で取得可能か発光分光データをもとにプラズマの内部状態を推定するにより、プラズマの実時間制御を実用レベルで達成したいという産業界からの要望がある。

本論文では、3件の研究テーマが議論されている。最初の研究テーマは、発光分光の理論的な導出であり、セル内粒子・モンテカルロ衝突法 (PIC/MCC 法) によるプラズマ・シミュレーションと、衝突輻射モデル (CRM) とを組み合わせることにより、アルゴン (Ar) 気体を用いた、理想的な1次元容量結合型プラズマ (CCP) の中央部における発光分光を予測するシステムの開発である。本研究で開発した手法により、ガス圧力が 20 Pa 以下では、シミュレーションで得られた発光スペクトルが、実験結果とよく一致することが示されている。それより高い圧力下では、PIC/MCC シミュレーションに、励起状態からのイオン化 (段階的イオン化) の効果を導入する必要があることも明らかにしている。

第2の研究テーマでは、多数の条件下で数値シミュレーションを行い、その発光分光データを訓練データとして用いることで、機械学習により、上記の手法の逆演算を行い、発光分光データから、プラズマの基本的なパラメータである電子密度と電子エネルギー分布を求める手法の開発と、その実験的検証を行っている。

第3の研究テーマでは、発行分光の全く別の手法を用いて、高温磁気閉じ込めプラズマに対して、プラズマの流体速度と炭素不純物イオンのイオン温度を測定している。更に、その測定結果が、他の実験手法から得られた、対応する実験データと一致することを示すことで、本研究で用いた発行分光解析手法の妥当性を確認している。

以上のように、本論文は、高温磁気閉じ込めプラズマに対しては、発光分光解析により、プラズマの流体速度と炭素不純物イオンのイオン温度を求めて、その妥当性を確認すると同時に、低温アルゴンプラズマに対しては、発光分光データを数値シミュレーションから導出する技術を確立し、かつ、機械学習を用いて、その逆問題を数値的に解き、発光分光データから、プラズマの電子密度と電子エネルギー分布関数を導出する手法を開発している。また、アルゴンプラズマ発光分光の実験データに、上記の解析手法を適用することにより、その妥当性と適用限界を検証している。

このように、本論文は、プラズマの内部を直接計測できないような状況においても、比較的取得しやすい発光分光データから、これまでの解析手法では得られなかったプラズマの物性データを取得する手法を提案するとともに、自ら取得した実験データを用いて同手法の妥当性を検証するという、独創的で斬新な研究成果を報告している。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。