

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	磁場閉じ込めプラズマの放射光線追跡を用いたトモグラフィーの開発
Title(English)	Development of Tomography using Radiation Ray-tracing of Magnetically Confined Plasmas
著者(和文)	宗近 洸洋
Author(English)	Koyo Munechika
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12776号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:筒井 広明,小原 徹,赤塚 洋,木倉 宏成,長谷川 純
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12776号, Conferred date:2024/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	融合理工学 原子核工学	系 コース	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	（ 工学 ）
学生氏名： Student's Name	宗近 洸洋		審査員主査： Chief Examiner	筒井 広明	

要旨（和文 2000 字程度）

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

磁場閉じ込め核融合において、高効率な発電を行うためには、プラズマの密度と温度、そしてエネルギー閉じ込め時間を上昇させることが重要であるが、トカマク・ステラレータ型両者においてそれぞれ密度上昇の限界が実験経験上存在することが分かっている。密度をその付近に近づけていくとプラズマからの放射が増え、エネルギー閉じ込めがうまくいかず、「放射崩壊」のような現象を引き起こし消滅してしまうからだ。また、プラズマからの放射によるエネルギー流出は壁などの不純物輸送にも起因していることが分かっている。よって、高性能なプラズマを長時間維持し、不純物輸送のメカニズムを解明するためには、常にプラズマからの放射を計測し、その空間分布をトモグラフィーによって明らかにすることが必要である。トモグラフィーとは空間分布を再構成する手段であり、様々な磁場閉じ込め装置で用いられており、非常に強力な解析手法である。

プラズマからの放射計測機器として、高速カメラやボロメータといったものがあるが、高速カメラは動きの素早い現象を高解像度でとらえることが利点であるが、全ての電磁波波長域に対応していない。一方、ボロメータは実質全波長域の放射を計測できるが、時間や空間分解能の制限が存在する。そこで本論文では、小型トカマク装置 PHiX において高速カメラを用いた可視光のトモグラフィー開発を行うとともに、より高温プラズマを生成できる大型ヘリカル装置 (LHD) を想定したボロメータ計測による3次元トモグラフィーの開発を行った。本論文は上記の研究について以下に示す6章構成で記述する。

第1章では、研究背景として磁場閉じ込め核融合プラズマにおける放射現象に対する取り組みや、核融合プラズマに対するトモグラフィーの開発についての先行研究内容を示し、解決すべき課題とそれに対する本研究の位置付けを示す。

第2章では、プラズマ中の放射現象の物理を解説し、プラズマパラメータとの関係性を明らかにするとともに、高速カメラやボロメータに共通の測光学の原理を解説することで、モデル化する際の原理式を幾何光学の立場から与える。また、可視光計測においては反射光の考慮が重要であるため、本研究で用いたモデル化手法について解説を行う。さらに、レイトレーシングによる計測器シミュレーションの方法を示した上で、本研究で用いた具体的な計測器(可視光高速カメラ、ボロメータ)の原理とモデル化手法について提案する。

第3章では、トモグラフィー原理について解説する。放射分布再構成は不適切な逆問題として表されることが多く、2種類の正則化手法(離散 Laplacian 正則化法、最小 Fisher 正則化法(MFR))を用いて逆問題の解を求めていく。正則化には最適な正則パラメータを求めることが必要だが、L-curve 法に基づく最適化法でもって解決する。また、LHD における3次元トモグラフィーでは、再構成解に EMC3-EIRENE コードに基づく計算グリッドを用いた非直交空間基底を活用することで解の未知数を制限する。さらにグリッド座標を曲線座標系で定義されたとみなすことで、非等方な勾配計算を MFR に適応することができ、磁場構造に即した平滑化効果が期待できることを示す。

第4章では、PHiX における2次元可視光発光分布の再構成結果について述べる。仮想放射分布によるシミュレーション値と実験値による再構成を行い、反射光考慮の重要性と両者におけるトモグラフィー結果の有効性について評価を行う。

第5章では、仮想放射分布を用いた LHD における3次元放射分布の再構成結果について述べる。MFR は非線形な繰り返し計算に基づくため、従来では生じる負のアーティファクトを低減させ、かつ少ないデータ数から多くの要素を持つ解を生成することに成功した。また、ホローな放射分布の再構成では、非等方的な勾配を用いることで、より元の解との誤差が少ない結果を得られた。よって本手法を用いることで不純物のエッジからコアへの滞留や輸送状況を把握することが可能となった。

第6章では、本研究で得られた新たな知見や残された課題についてまとめ、本研究における今後の展望について述べる。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	融合理工学 原子核工学	系 コース	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	（工学）
学生氏名： Student's Name	宗近 洸洋		審査員主査： Chief Examiner	筒井 広明	

要旨（英文 300 語程度）

Thesis Summary (approx.300 English Words)

In magnetic confinement fusion, achieving efficient power generation requires increasing plasma density, temperature, and energy confinement time. However, Tokamak and Stellarator types have experimentally observed limits to density increases. They are approaching these limits, which results in increased plasma radiation, leading to phenomena like "radiative collapse" and eventual destruction. Radiation-induced energy loss from the plasma is also linked to impurity transport to walls. Continuous measurement of plasma radiation and its spatial distribution through tomography is essential to sustain high-performance plasma and elucidate impurity transport mechanisms.

Various instruments like high-speed cameras and bolometers are used for plasma radiation measurements. High-speed cameras capture rapid phenomena with high resolution but lack coverage across all electromagnetic wave wavelengths. On the other hand, Bolometers measure radiation across essentially all wavelength ranges but have limitations in time and spatial resolution. This study focuses on developing visible light tomography using a high-speed camera in a small Tokamak (PHiX) and 3D tomography using bolometer measurements in a Large Helical Device (LHD) for higher-temperature plasma generation.

The paper is structured into six chapters, starting with the research background, previous studies on radiation in magnetic confinement fusion plasmas, and the positioning of this research. It then covers the physics of plasma radiation, explaining the principles shared by high-speed cameras and bolometers. The third chapter delves into tomography principles, addressing the reconstruction of radiation distribution as an inverse problem. The fourth chapter presents the results of 2D visible light emission distribution reconstruction in PHiX, emphasizing the importance of considering reflected light.

Chapter five discusses the 3D radiation distribution reconstruction in LHD using bolometer measurements, showcasing the success of the proposed method in reducing artifacts and obtaining accurate results. Finally, chapter six summarizes the new insights gained and outlines prospects and remaining challenges in this research.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).