

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	岩田 晃拓
論文題目	ヘリオトロン J における近赤外領域の分光診断に関する研究		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、従来核融合プラズマ実験装置への適用例が少なかった近赤外領域の分光診断手法として、連続スペクトルを真空容器内の高温輝点 (ホットスポット) の温度計測に、水素原子パッシェン系列の輝線スペクトルを固体水素ペレット溶発雲の電子密度・温度の計測に適用し、中型規模ヘリカル装置であるヘリオトロン J 装置におけるホットスポットの時間的な振る舞いや、ペレット溶発雲密度と原子過程の関係性を調べたものである。本論文の構成は以下のようになっている。</p> <p>第 1 章は序論である。エネルギー問題、環境問題の解決方法の一つとして期待される磁場閉じ込め核融合炉の実現に向けたプラズマ研究が行われており、プラズマ性能の向上に伴い装置も大型化し、光ファイバーによる紫外・近紫外光の伝送効率低下や多価イオン輝線同士の混濁などが懸念されている。それに対し、近赤外領域は重元素不純物の輝線の混濁が少なく、熱運動によるスペクトル広がりに対するゼーマン効果やシュタルク効果によるスペクトル分裂が広い利点を持つ。そこで本論文において、近赤外領域における連続スペクトル、線スペクトルの広がり、および輝線強度比の分光診断を提案し、初めてヘリオトロン J 装置に適用し、原理検証実験および物理現象の解析を行った。このような研究背景を説明し、本研究の目的と意義を述べている。</p> <p>第 2 章では、計測原理について説明している。初めに発光分光法の基本となる輝線スペクトルの素過程とそれを解釈するための物理モデルである衝突輻射モデルと局所熱平衡状態について述べている。次に、高温物体が発する連続スペクトルである黒体輻射について説明している。さらに、輝線スペクトルから電子密度・温度を評価する方法としてシュタルク広がりから電子密度を推定する方法、ボルツマンプロット法を用いた電子温度評価方法、輝線強度比を用いたパラメーター決定方法について述べている。</p> <p>第 3 章は、実験装置と計測系について説明している。放電実験に使用したヘリオトロン J 装置の目的、磁場配位、加熱装置および基本的な計測装置について述べている。次に、実験に用いた近赤外分光システムの詳細、分光器の較正手法、およびその結果を示している。さらに、近赤外領域で用いられる InGaAs 検出器と検出波長領域の広い HgCdTe 検出器との比較について述べている。最後に、ペレット入射装置の構成やペレットの生成・射出方法について記している。</p>			

第4章では、黒体輻射の連続スペクトルを利用したホットスポット表面温度計測について述べている。核融合プラズマ内の高エネルギー電子を主因とする溶損につながる真空容器壁表面の高温輝点はホットスポットと呼ばれ、その発生原因と物理的性質の解明及び監視が重要になる。ヘリオトロンJにおいては、電子サイクロトン加熱（ECH）時に真空容器壁上部の炭素材部分にホットスポットが発生する。その発光を近赤外低分散分光器で観測し、得られた連続スペクトルをプランクの輻射式を用いたフィッティングにより温度とホットスポットの面積を評価した。近赤外領域に重畳する可視光の2次回折光成分と真空容器による反射について定量的な評価を行い、それを補正する手法を提案した。

ECH入射パワーを変化させた実験では、ホットスポットの最高温度は約2000 K程度であることを明らかにし、推定したホットスポットのサイズは可視カメラで確認される実際のホットスポットのサイズと矛盾しないこと、温度推定に2次回折光の影響が無視できる程度であることを確認した。可視域全体の発光強度をモニターする可視光モニタの信号強度と定量的な比較を行い、近赤外分光計測の結果の妥当性を検討した。さらに、近赤外分光計測を利用して可視光の発光強度を温度へと校正し、組み合わせ、時間変化の時定数を解析した。その結果、ホットスポットが生じていた炭素材材料温度の熱伝導による時定数より有意に小さい応答がみられ、熱伝導ではなく輻射による熱の入出力がホットスポット表面の温度変化を支配していることが示唆された。

第5章は、ヘリオトロンJの固体水素ペレット溶発雲の電子密度計測に水素原子の近赤外輝線であるパッシェン α 線のシュタルク広がりを、電子温度評価にパッシェン系列の輝線強度比を適用した結果について述べている。

本章では第一に、温度1 eVの局所熱平衡（LTE）を仮定し、電子密度10の17乗から23乗/立米の範囲でシュタルク幅との対応関係の定式化を行った。測定したシュタルク広がり、観測できる密度下限をわずかに超えた程度であり、スリット幅の低減や回折格子の刻線数の増加で改善可能であることを示した。

第二に、パッシェン系列の輝線（ α 、 β 、 γ ）の強度比を計測し、衝突輻射モデルを適用することにより、電子温度が約0.9 eVの場合の強度比を表していること、およびLTE状態が成立していることを明らかにした。

さらに、パッシェン α 線のシュタルク広がりに対し0.4 eVから2 eVの範囲で電子温度依存性を含めた電子密度検量線を導き、LTE状態が成立する範囲における電子温度の影響は5%程度と小さいことを示した。水素原子の励起状態占有密度分布の素過程を評価し、LTE状態の成立可否に応じた電子温度決定手法の提案を行った。

第6章では、本研究のまとめと将来の展望について著している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、可視従来核融合プラズマ実験装置への適用例が少なかった近赤外領域の分光診断手法を真空容器内の高温輝点(ホットスポット)の温度計測や固体水素ペレット溶発雲の電子密度・温度の計測に適用し、中型規模ヘリカル装置であるヘリオトロンJ装置において、高エネルギー電子が容器壁に及ぼす影響や、ペレット溶発における原子素過程について詳細に調べたものである。

本論文で得られた主な成果は以下のとおりである。

- (1) 近赤外領域の黒体放射連続スペクトルを用いて、特定条件において可視光で観測されていたホットスポットの表面温度の最高温度が約 2000 K になることを示した。
- (2) 近赤外分光器の2次回折光と真空容器の反射によるスペクトル計測への影響を評価し、補正する手法を提案した。
- (3) 可視光の発光計測と近赤外分光計測を組み合わせ、可視光の発光強度を温度に較正することで、ホットスポット温度の高速な時間変化の検出を可能にした。
- (4) 固体水素ペレット溶発雲の発する近赤外領域の水素原子パッシェン α 線のシュタルク広がりを測定することでペレット溶発雲の電子密度計測を低密度側(10^{21} m^{-3} 程度)へ拡張することに成功し、近赤外分光が中型装置において有用な手法であることを示した。
- (5) 低分散分光器でシュタルク幅と同時測定可能なパッシェン系列($\text{Pa}_\alpha, \text{Pa}_\beta, \text{Pa}_\gamma$)の輝線強度比にCRモデルを適用することで、ペレット溶発雲の電子温度(約 0.9 eV)測定に成功し、その励起準位占有密度がLTE状態にあること、その温度領域において(4)のシュタルク分光結果への電子温度の影響が小さいことを証明した。

これらの成果(1)(2)(3)は、装置保護の観点から重要であり、加熱パワーの増大に従いますます重要になってくる。また成果(4)(5)は加熱パワーが比較的弱い、他の中規模装置におけるペレット溶発過程や、燃料供給の物理研究へも適用可能であり、核融合級の大型装置との比較やスケールアップ研究に重要な寄与ができる可能性がある。さらに、分光器や検出器の高性能化によって、今後、高速化やイメージングの可能性を有するものである。

これらの成果は核融合科学・エネルギー科学に大きく貢献するものであり、得られた結果は、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年2月22日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降