

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

京都大学 エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻 稲垣研究室 岩田晃拓

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、水素原子パッシュン系列の輝線スペクトルをペレット溶発雲の電子密度・温度計測に適用し、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挙動や固体水素ペレット溶発プラズマの原子素過程と電子密度・温度との関係性について調べたものである。

本論文の構成は以下のようになっている。

第 1 章では序論として、研究の位置付けについて述べている。

エネルギー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研究が行われてきた。核融合発電炉を目指した装置はプラズマ性能の向上に伴い大型化している。重水素-三重水素核融合反応で生成される高エネルギー中性子による損傷を避けるため、分光器などの計測装置はプラズマから離れた遮蔽場所に設置される。ファイバーを用いて光を導入する場合、ファイバーの伝送効率は紫外・近紫外域で急激に低下するため、従来の可視・紫外域のバルマー系列を利用したダイバータ領域の高電子密度計測などが困難になる。さらに、発電炉では観測用ポートが少なく、計測の制限が厳しくなる。このような問題を解決するため、ファイバーによる減衰の影響が少なく、近年検出器の開発が進んできた近赤外領域の核融合プラズマへの適用を進め、統合的な分光計測の開発が必要である。近赤外領域は重元素不純物の輝線混濁が少なく、周辺部・ダイバータ領域のモニタに有用である。波長が長い線スペクトルの広がり可視光より広く、スペクトル形状の計測に有利である。また、黒体放射スペクトルの 1400 – 3000 K のピーク波長が近赤外領域に対応し、高温計測に適すると考えられる。そこで、低分散近赤外分光器を用いて、連続スペクトルを用いた真空容器表面のホットスポットの温度計測、小型固体水素ペレットの溶発雲のパッシュン α 線シュタルク広がりパッシュン系列輝線による電子密度・温度計測手法を開発、ヘリオトロン J 装置に適用し、将来の核融合炉の高温・高密度なプラズマの計測・制御に適用可能であることを示すことを目的とした。

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物理モデルである衝突輻射（CR）モデルと局所熱平衡（LTE）状態について述べた。次に、電子密度・温度を評価する方法としてシュタルク広がりを用いた電子密度評価法と温度 1 eV を仮定した場合の電子密度 $10^{17} - 10^{23} \text{ m}^{-3}$ の範囲におけるシュタルク幅との対応関係の定式化、ボルツマンプロット法を用いた電子温度評価法、輝線強度比を用いたパラメータ決定方法について述べた。最後に、高温物体が発する黒体放射スペクトルについて説明した。

第 3 章は、実験装置と計測系について説明している。

初めに放電実験に用いたヘリオトロン J 装置の目的と磁場配位に関する特徴、加熱装置と計測装置について述べた。次に、実験に用いた近赤外分光システムの詳細と、分光器の特性、波長較正、絶対感度較正の結果を示した。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 検出器の比較について述べた。最後に、ペレット入射装置の構成とペレットの生成・射出方法について記した。

第 4 章では、連続スペクトルを用いたホットスポット表面温度計測について述べている。加速された電子やイオンの一部は閉じ込め領域から離れ、真空容器壁や容器内構造物に衝突し、スパッタリングや溶損によって不純物の発生や炉の損傷を引き起こす。これらはプラズマの性能低下や炉の保全の問題に関わる。そのため、真空容器壁表面の高温部分（ホットスポット）の発生原因と物理的性質の解明及び監視が重要になる。ホットスポットの表面温度は ELM など熱負荷の高い時、3000 K を超える可能性がある。通常のフィルターを用いた IR カメラによる強度計測では、放射率などの強度変化による影響が大きく、検出素子のダイナミックレンジの制約など、高温測定に最適ではない。この視点で、近赤外波長領域は核融合炉で用いられる材料（炭素やタングステン、鉄など）の融点を含むため、材料表面の温度計測に適している。

ヘリオトロン J において、電子サイクロトロン加熱（ECH）時に真空容器壁上部のロゴスキーコイルのカーボンカバー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から Planck の式のスペクトル形状から表面温度、強度からサイズを評価した。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、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を行い、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サイズと矛盾しないことを確認した。計測したスペクトルは可視光域の 2 次回折光を含み得るという制約下であったが、開発した評価法を用いて、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、近赤外分光計測と組み合わせて可視光の発光強度を温度へと較正し、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。ECH 入射パワー変調実験において、可視光の発光強度計測を適用し、シュテファン=ボルツマン則により信号強度の $1/4$ 乗が温度の定性的傾向を反映するとの作業仮説のもと、その時間変化の時定数を解析した。その結果、

ホットスポットの発生場所である炭素の熱伝導特性による温度変化の時定数より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、固体水素ペレット溶発雲におけるパッシェン α 線のシュタルク広がりを用いた電子密度計測とパッシェン系列の輝線強度を用いた電子温度評価結果について述べている。

固体水素ペレット入射法は核融合プラズマへの燃料供給方法の一つとして重要な研究課題である。ペレット溶発過程の解明はペレットの最適化のため重要であり、低温高密度プラズマである溶発雲の電子密度・温度を直接計測する必要がある。加熱パワーの小さい中型装置では比較的電子密度が低く、従来の可視光領域のバルマー β 線よりもシュタルク幅が広がる近赤外領域は有利であり、要求波長分解能を低下、または測定下限の引下げが可能となる。この利点を活かし、低分散分光器を用いてパッシェン α 線シュタルク広がりとパッシェン系列輝線による電子密度・温度計測を行った。

本章では第一に、ヘリオトロンJのペレット入射実験において、近赤外分光器を用いてパッシェン α 線(1875.1 nm)計測を行った。計測位置に関わらずVoigtフィッティングによりシュタルク広がり最大 1.5 ± 0.3 nmを検出し、露光時間10 ms中に最大 $4.0 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ と比較的低密度の測定に成功した。この結果が可視光バルマー β 線の結果と矛盾しないことを確認した。さらにヘリオトロンJにおける典型的な電子密度に測定可能領域を拡大するには、スリット幅変更とより刻線数の多い回折格子への変更によって可能であることを示した。

第二に、パッシェン系列輝線 Pa_α , Pa_β , Pa_γ の輝線強度比を計測し、CRモデルを適用することで電子温度(約0.9 eV)を評価できた。その縮退度当たりの占有密度について、CRモデルの計算とボルツマンプロット法を比較することでLTE状態が成立することを明らかにした。0.4 - 2 eVの範囲においてパッシェン α 線シュタルク広がりについて電子温度依存性を考慮した一般化電子密度検量線を導き、電子温度の影響がLTE状態の成立範囲では5%程度と小さいことを示した。さらにLTE状態が成立する電子温度領域で分類し、パッシェン系列輝線を用い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。

本論文で得られた主な成果は以下のとおりである。

- (1) 近赤外領域の黒体輻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(Pa_α , Pa_β , Pa_γ)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)-(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より重要になる。一方成果(4)(5)は、加熱パワーの比較的弱い、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、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。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2次元計測への発展が期待できる。