

核融合ダイバータ様プラズマにおける 水素原子パッシェン α 線を用いたゼーマン効果の高感度計測

村雲南斗¹、四竈泰一¹、門信一郎²、岩田晃拓³、守田常裕¹、大島慎介⁴、
鈴木琢土³、森敦樹³、本島巖⁵、南貴司²、小林進二²、金史良²、石澤明宏³、
中村祐司³、木島滋²、水内亨²、稲垣滋²、長崎百伸²、蓮尾昌裕¹

¹京大院工、²京大エネ理工研、³京大エネ科、⁴UCアーバイン、⁵核融合研

<http://oel.me.kyoto-u.ac.jp>

磁場閉じ込め核融合プラズマの分光計測では、視線積分量として計測される輝線スペクトルを、ゼーマン分裂の解析によって空間分解できる[1, 2]。この際、ゼーマン分裂が線幅と同程度以上である必要があり、この条件を満たす輝線を選択することが計測精度に影響する。従来は線幅が小さいスクレイプオフ層の水素やヘリウム原子輝線が主な対象とされてきたが、本研究では、より線幅が大きいダイバータ領域の水素原子輝線にもこの方法を適用可能か検討することを目的とした。

まず、可視から近赤外の明るい水素原子輝線を対象に、ゼーマン分裂とドップラー・シュタルク広がりとの線幅比を計算した。後述の実験条件を参考に、磁場強度1.2 T、電子温度1 eV、原子温度1 eVというダイバータ領域に近い条件を仮定して計算を行った。その結果、電子密度範囲 $10^{20} \sim 10^{21} \text{ m}^{-3}$ において、比がパッシェン α 線（波長1875 nm、主量子数3-4）で最大となることが分かった。この比の値は0.4~1であり、約1 T以上の磁場があればゼーマン分裂を観測できることが分かった。

次に、計算結果を基礎実験で検証した。ダイバータ領域と近い条件のプラズマを再現するため、ヘリオトロンJの水素ペレット溶発プラズマ[3]を利用した。ECHによって中心電子温度1.6 keV、電子密度 $4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ の重水素プラズマを生成し、このプラズマに小型の水素ペレットを入射した。溶発プラズマの電子温度は約1 eV、電子密度は $10^{20} \sim 10^{21} \text{ m}^{-3}$ である[4]。

溶発プラズマの発光を磁場に平行および垂直方向の直線偏光（それぞれ主に π 、 σ 成分）に分離した後、これらのスペクトルを分解能0.1 nmで同時計測した。得られたスペクトルにはゼーマン分裂が明瞭に観測され、視線上の1点発光と、電子・原子温度1 eVを仮定したモデルで解析を行った。その結果、磁場強度1.26 T、電子密度 $3.6 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 、原子速度3.0 km/sが得られた。磁場強度に対応する位置は、ペレット軌道と視線の交点から約4 cmの位置となり実験条件と概ね整合した。これらの結果から、ダイバータ領域の水素原子輝線に対しても、ゼーマン分裂を用いた空間分解法を原理的に適用できることが分かった。

[1] P. G. Carolan, *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **27**, 1101 (1985).

[2] J. L. Weaver, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **71**, 1664 (2000).

[3] G. Motojima, *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **61**, 075014 (2019).

[4] A. Iwata, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **93**, 113537 (2022); *Plasma Fusion Res.* **19**, 1402017 (2024).