

LHDにおける重元素多価イオンEUV分光データベースの構築

鈴木千尋¹、村上泉¹、小池文博²、東口武史³、坂上裕之¹、
田村直樹¹、須藤滋⁴、Gerry O'Sullivan⁵

¹核融合研、²上智大、³宇都宮大、⁴中部大、⁵UCD

重元素多価イオンからの発光スペクトルは、核融合実験装置におけるプラズマ・壁相互作用研究や、産業用の短波長光源開発において重要であるが、その複雑なスペクトル構造のため、原子データや分光モデルが十分に整備されていないのが現状である。核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）では、光学的に薄い超高温プラズマからのスペクトルを高輝度で観測することができ、かつ各種計測装置・不純物入射装置が充実しているという特徴を活かして、各種重元素多価イオンからの極端紫外（EUV）・軟X線発光スペクトルに関する実験データベースの構築を進めている。特に、ガスパフまたはトレーサー内蔵ペレット（TESPEL）[1] を用いてLHDプラズマ中に元素を導入し、Schwob-Fraenkel 型斜入射分光器 [2] を用いて1-20 nmの波長領域のスペクトルを観測する実験が系統的に行われた。一連の実験では、導入不純物量とプラズマ加熱パワーの適切な設定により、中心部で温度がゼロとなるような中空型の電子温度分布を意図的に形成し、様々な電子温度のプラズマからのスペクトルを効率的に得られるようになった [3, 4]。その結果、原子番号36から83までの元素のうち、過去の実験データがほぼ皆無な元素も含め、これまでに20種以上の元素がLHDプラズマに入射され、広範囲の原子番号と電子温度を網羅するスペクトルの実験データが拡充された。

原子番号がおおよそ50以上の元素では、EUV・軟X線領域における主要な発光は、基底状態の最外殻電子がN殻（ $n=4$ ）のイオンによるものである。プラズマの温度が比較的高い場合は、最外殻電子が4sあるいは4pのイオンによる離散的なスペクトルとなり、温度が低い場合は、最外殻電子が4dあるいは4fのイオンによる、多くのスペクトル線が密集した擬似連続的なスペクトルとなる傾向がみられた。これらのスペクトルの原子番号依存性を調べることで、いくつかのランタノイド系元素について、過去に実験的に観測されたことのない、新たなスペクトル線が同定された [4, 5]。一方、原子番号が36-45の元素では、基底状態の最外殻電子がM殻（ $n=3$ ）のイオンによる発光が支配的となった。このようなイオンの発光スペクトルは、最外殻電子が4dあるいは4fのイオンに比べてエネルギー準位の数が少ないことから、離散スペクトルに近い傾向を示している。

- [1] S. Sudo and N. Tamura, Rev. Sci. Instrum. **83**, 023503 (2012).
- [2] J. L. Schwob et al., Rev. Sci. Instrum. **58**, 1601 (1987).
- [3] C. Suzuki et al., Phys. Scr. **89**, 114009 (2014).
- [4] C. Suzuki et al., Plasma Phys. Control. Fusion **59**, 014009 (2017).
- [5] C. Suzuki et al., Atoms **6**, 24 (2018).