

大気圧プラズマの発光分光診断の課題

Issues of Optical Emission Spectroscopic Diagnostics of Atmospheric-Pressure Plasmas

○ 赤塚 洋 (東京工業大学 科学技術創成研究院)

○ Hiroshi AKATSUKA (Institute of Innovative Research, Tokyo Institute of Technology)

E-mail: hakatsuk@nr.titech.ac.jp

大気圧非平衡プラズマや液中プラズマが、応用研究を中心に盛んに行われるようになっていく。各種材料の表面処理・改質は言うに及ばず、医療分野でも期待は高まっている。こうしたプラズマにつき、従来の理解をしようとすると、電子温度・密度を測定したくなるが、これらの大気圧プラズマは極めて非平衡で、分光計測から電子温度・密度を求めることは困難を極め、今なお計測方法は確立していない。

こうした状況であるため、大気圧非平衡プラズマを研究対象の一つとする高名な学術誌 *Plasma Sources Science and Technology* でも、昨年には “Best practices for atmospheric pressure plasma diagnostics” なる特集号まで組まれていることから、学术界・産業界での関心の高さが窺えるであろう。そこでは発光分光診断に関するものとして (1) Stark 効果による電子密度測定 [1], (2) 連続スペクトル解析による電子温度測定 [2] などが紹介されているが、残念ながらこれらはプロセスという意味ではかなり高電子密度・高電子温度のプラズマにその適用が限られるものである。

本講演では、これら (1)–(2) 項の発光分光計測法の紹介を簡潔に行い、引き続いて、これまで筆者が取り組んできた、低温低密度でも適用可能な大気圧プラズマ分光診断法として、(3) 回転温度測定によるガス温度の近似測定 [3], (4) 線発光強度を衝突輻射 (CR) モデルなど、原子分子過程に立脚して解釈し、電子温度・密度を診断する試みと課題 [4] について紹介する。(3) 項は N_2 2PS などではある程度確立した感があるが、(4) 項はここに紹介するに当たり、今なお完成度は低い。しかし、(4) 項の将来の適用可能性は、完全に否定されたとも結論できない状況である。ここで、線発光分光で直接計測され

るのは、遷移の上準位の励起状態数密度に対応する。すなわち (4) 項の課題は、測定結果を解釈して正しい電子温度・エネルギー分布関数・密度など電子に関する情報を導くための、CR モデルのような励起状態生成消滅の化学カINETIックモデルの完成度が未だ不十分、ということに尽きると考えられる。

そこで、大気圧プラズマ分光の解釈に必要な励起状態生成消滅モデル作成の困難さの一端を、数年前に筆者が取り組んだ低温非平衡大気圧 Ar プラズマを例に紹介する [4]。さらに、その問題点～Maxwell EEDF の仮定の是非～や、適用限界～ N_2 , O_2 添加による発光特性の変化～も紹介する。こうした限界の克服のため、State-to-State Approach に代表されるような N_2 や O_2 も含めたモデルの精緻化が必要となるのだが [5], そのために必要となる素過程の断面積や速度係数の例を紹介し、非平衡プラズマ分野の研究の展開に資することとしたい。

[1] A. Yu. Nikiforov, C. Leys, M. A. Gonzalez and J. L. Walsh, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **24**, 034001 (2015).

[2] Sanghoo Park, Wonho Choe, Holak Kim and Joo Young Park, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **24**, 034003 (2015).

[3] T. Yuji, S. Fujii, N. Mungkung and H. Akatsuka, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **37**, 839–845 (2009).

[4] H. Akatsuka, *Phys. Plasmas*, **16**, 043502 (2009).

[5] M. Capitelli, R. Celiberto, G. Colonna, F. Esposito, C. Gorse, K. Hassouni, A. Laricchiuta and S. Longo, *Fundamental Aspects of Plasma Chemical Physics – Kinetics* Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics Vol. 85 (2016).