

GAMMA 10/PDX における非接触プラズマ形成過程の揺動計測

舩矢智温、江角直道、岡本拓馬、高橋理志、河野恵士、仙北裕己、姫野凌河、
東郷訓、平田真史、吉川正志、小波蔵純子、坂本瑞樹

筑波大プラ研

1. 研究背景と目的

核融合炉においてダイバータにかかる熱負荷を低減することは重要である。そこで高温プラズマに中性ガスを入射し、放射損失とプラズマの再結合によってダイバータに流入する熱粒子束を低減させる手法が検討されている。現在はその際に形成される非接触プラズマの形成過程の研究が行われている。筑波大学のタンデムミラー型装置 GAMMA 10/PDX では端損失プラズマを用いてダイバータ領域を模擬し、非接触プラズマの形成過程についての研究が行われている。

GAMMA 10/PDX を用いて行われた先行研究において非接触プラズマの数 kHz の揺動が確認されている[1]。プラズマの揺動現象はプラズマの磁力線垂直方向の輸送への関係が指摘されている。特にダイバータ部での垂直方向への輸送は熱負荷の広域化とともに、炉壁への熱負荷の増大も危惧され、その特性の理解が不可欠である。本研究では従来の高速度カメラに加えて光電子増倍管や静電プローブ、マイクロ波干渉計を使用してプラズマを計測した。これによって非接触プラズマ形成過程の揺動現象を測定することを目的とした。

2. 実験概要

実験は、GAMMA 10/PDX に設置したダイバータ模擬実験モジュール(D-module)を用いて行った。放電開始後 110 ms から中性ガスとして水素ガスを入射し、放電終了時(450 ms)に D-module 内の圧力が約 5 Pa になるよう調整した。この条件下で、放電時間中でプラズマは接触状態から分子活性化再結合(MAR)が支配的な状態を経て三体放射再結合(EIR)が支配的な状態へと時間とともに遷移する。

本実験では、水素原子のバルマー線($H\alpha$: 656 nm, $H\beta$: 486 nm, $H\gamma$: 434 nm) および水素分子の Fulcher 帯 (588~627 nm) の発光に注目した。ダイクロイックミラーを用いてこれらのうち 2 つの波長を同時に光電子増倍管で観測した。サンプリング周波数は 1 MHz、視線は D-module 中央のプラズマ中心軸上に設定した。また、高速度カメラを用いて $H\alpha$ 線の発光強度の 2 次元分布も計測した。さらに、電子およびイオンの揺動を観測するため、D-module 内に設置したマイクロ波干渉計と静電プローブを用いて電子線密度およびイオン飽和電流を計測した。また、プラズマ生成部や生成部から D-module の間の位置に存在するプラズマについてもマ

イクロ波干渉計を用いて電子線密度を計測した。

3. 実験結果・考察

D-module 内の $H\beta$ 線の発光強度を短時間フーリエ変換 (STFT) で解析した結果を図 1 に示す。MAR が支配的な 190~320 ms においては 2 kHz 付近のスペクトルが確認され、EIR 反応が支配的な 320 ms 以降では低周波数帯に発光の揺動が広がる傾向が見られた。高速度カメラの計測結果として、径方向に対称な 2 点のコヒーレンスが 0.5 を超えた周波数の位相差を図 2 に示す。プラズマ中心軸から ± 3.36 cm 離れた 2 点における 2 kHz の位相差は、200~300 ms では $\pi/2$ 、320~420 ms では $\pm\pi$ となっていた。さらに 320~420 ms では 2 kHz だけでなく、1 kHz や 6 kHz 付近の周波数帯にも高いコヒーレンスを持つ揺動が確認された。この結果から MAR 反応が支配的な時間と EIR 反応が支配的な時間に異なる揺動が発生していることが予測される。

発表ではマイクロ波干渉計や静電プローブで得た電子線密度やイオン飽和電流のデータと比較し、非接触プラズマ形成過程と揺動現象の関連を詳細に議論する予定である。

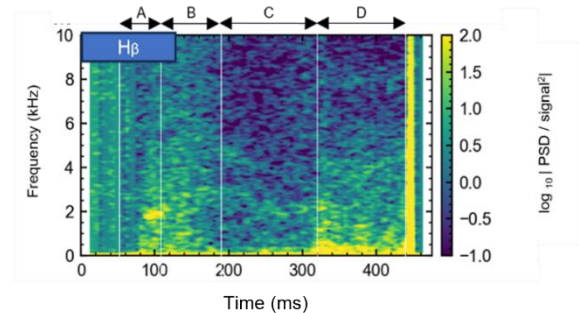


図 1 $H\beta$ 線発光強度の STFT 解析結果

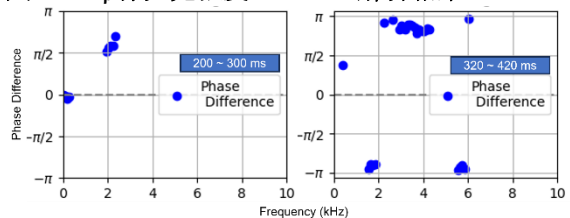


図 2 径方向対称な 2 点における各周波数の位相差

本研究の一部は JSPS 科研費 (22H01198, 23K22469) および核融合科学研究所双方向型共同研究(NIFS23KUGM174, NIFS23KUGM186)の助成を受けたものです。

[1] H TANAKA, *et al.* Plasma and Fusion Research Volume 14, 2402036 (2019).