

GAMMA 10/PDX セントラル部での印加波動に起因する ICRF 差周波波動によるイオン加熱の計測

栢野大樹¹, 平田真史¹, 江角直道¹, 山崎響², ジャンソウォン¹, 菅田海里¹, 相澤拓実¹, 野口大地¹,
KIM DOYEON¹, 杉本勇大¹, 松浦礼奈¹, 吉川正志¹, 池添竜也³, 市村真¹, 坂本瑞樹¹
H. Kayano¹, M. Hirata¹, N. Ezumi¹, H. Yamazaki², S. Jang¹, *et al.*

¹筑波大学プラズマ研究センター, ²量子科学技術研究開発機構,
³九州大学応用力学研究所附属高温プラズマ理工学研究センター
¹PRC Univ. of Tsukuba, ²QST, ³RIAM Kyushu Univ.

直線型装置は、プラズマのコントロール性、単純な磁場構造による計測の優位性などの理由から DEMO 炉に向けた PWI 研究に利用されている。しかし、そのパラメータとしては課題が多く、特に 10^{19} m^{-3} 以上の密度のプラズマにおいてイオン温度 $T_i \sim 100 \text{ eV}$ が期待されている一方、ほとんどの直線型装置では目標のイオン温度よりはるかに低いのが実情である。

イオンサイクロトロン周波数帯(ICRF)の遅波を利用したイオン加熱は、サイクロトロン共鳴による波動の吸収を利用しており、加熱効率が良いという利点がある。直線型プラズマ閉じ込め装置である GAMMA 10/PDX ではこの遅波加熱を用いて、 $2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 程度という低密度プラズマであるが、最高で 10 keV の磁力線に垂直方向のイオン温度 $T_{i\perp}$ 、数 100 eV の端損失粒子束を観測している。上記のように効率的なイオン加熱が可能なこと、また ICRF 加熱は定常運転に適していることから将来的な DEMO 炉を模擬した高温高密度直線型装置での加熱方法の有力な候補であると考えられる。しかし、高密度プラズマ ($> 10^{19} \text{ m}^{-3}$) においてはアンテナに印加した高周波がプラズマによってシールドされ、プラズマ中心部で励起されないという問題が報告されている[1]。また、高密度プラズマにおいて遅波による顕著な加熱効果は現在確認されていない。

プラズマ中の自発励起波動の一つとして、2つの異なる周波数の波動が励起された時、その差となる周波数の波動(差周波波動)が励起される現象が報告されている。そこで、高密度中でも適応可能性がある遅波励起の方法として、高密度プラズマ中でもアンテナによる励起が可能であるアルベン速波をプラズマ中に励起し、それらの差周波波動としてアルベン遅波を励起させる方法が考えられる。本研究では差周波波動を用いたイオン加熱の実現性について議論するべく、2つの速波をその周波数の差が、加熱に有効であるセントラル部中央でのイオンサイクロトロン周波数 f_{ci} になるように励起させ、加熱効果および波動計測を行った。通常実験では、主閉じ込め部であるセントラル部において 6.36 MHz (f_{ci}) を用いて遅波加熱を行っているが、本実験では 16.26 MHz ($2.6 \times f_{ci}$) の波動をプラズマ中に励起させた。これは、プラ

ズマ生成に用いている 9.9 MHz ($1.6 \times f_{ci}$) の速波との差周波数として 6.36 MHz ($2.6f_{ci} - 1.6f_{ci} = f_{ci}$) の波動をプラズマ中に励起させることを目的としたためである。密度を段階的に変化させたペースプラズマに加えて 16.26 MHz の波動をプラズマに印加した際の主閉じ込め部での反磁性量と電子線密度を Fig. 1 に示す。速波である 16.26 MHz の波動を重畳した際、線密度が約 $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 以上となる時間でプラズマの蓄積エネルギーが明らかに上昇した。線密度には顕著な変化はないため、プラズマ加熱が起こったと考えられ、平均温度の概算値で 50 eV 以上の加熱効果を観測することができた。 16.26 MHz はアンテナ直下でのイオンサイクロトロン周波数以上であるため励起する波動は速波となり、プラズマ中心部でイオンと共鳴を起こさず、効果的なイオン加熱を起こさないと考えられる。電子温度の上昇は観測されておらず、本結果は差周波波動による加熱を示唆している。また、磁気プローブ、反射計により周辺部及びプラズマ内部での揺動計測も行なった結果についても本発表で紹介する。

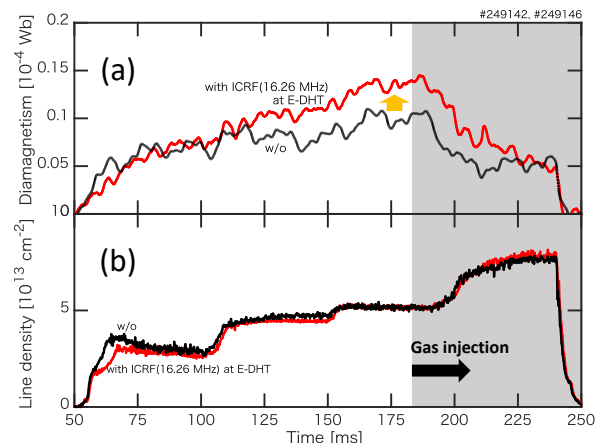


Fig. 1 プラズマの反磁性量(a)と電子線密度(b)の時間発展。追加熱とガスパフにより密度が数段階に上昇している。

本研究は NIFS 双方向型共同研究(NIFS20KUGM148, NIFS20KUGM158, NIFS19KUGM141)のもと実施されている。

[1] R. IKEZOE, *et al*, Plasma Fusion Res.,14,2402003, 2018