

ヘリカルプラズマにおける電子内部輸送障壁に与える磁場構造の影響 Effect of Magnetic Field Configuration on Electron Internal Transport Barrier in Helical Plasmas

釧持尚輝¹, 南 貴司², 高橋千尋², 望月聡一郎³, 小林進二², 長崎百伸², 中村祐司³,
岡田浩之², 門 信一郎², 山本 聡², 大島慎介², 木島 滋², G. M. Weir⁴, 西岡賢二⁵,
大谷芳明³, X. Lu³, 水内 亨²
Naoki KENMOCHI¹, Takashi MINAMI², Chihiro TAKAHASHI², Souichiro MOCHIZUKI³,
Tohru MIZUUCHI², *et al*

東大新領域¹, 京大エネ理工研², 京大エネ科³, IPP⁴, 名古屋大学⁵
GSFS, Univ. Tokyo¹, IAE, Kyoto Univ.², GSES, Kyoto Univ.³, IPP⁴, Nagoya Univ.⁵

磁場閉じ込め方式による核融合炉の実現のためには閉じ込め性能の改善が重要な課題である。閉じ込め改善現象の一つとしてエネルギー輸送を低減する領域である輸送障壁の形成は、トカマクプラズマのみならずヘリカルプラズマにおいても高性能プラズマ実現のための重要な課題である。その一つである、ヘリカルプラズマの電子内部輸送障壁(eITB)は、中心領域で正の強い両極性径電を形成し、電場の勾配により乱流を抑制する改善手法である。

ヘリオトロンJ装置は他のヘリカル型装置にはない連続巻線ヘリカルコイルにより、立体磁気軸を伴う先進ヘリカル閉じ込め磁場配位を実現している[1]。本装置はコンパクトな高ベータ閉じ込めヘリカル型装置を実現する可能性を持っているという点で他のヘリカル型装置にはない利点を有する装置である。近年、ヘリオトロンJにおいてもトムソン散乱計測[2]を用い、電子サイクロトロン波加熱(ECH)により中心部でピークした電子温度分布が観測され、この時 eITB が形成されていることが確認された[3]。ヘリカル型装置ではこれまでに、ヘリカルリップルや磁気島の存在が eITB に与える影響が報告されている。特に、磁気島の影響に関しては、TJ-II[4]やLHD[5]においてフローや揺動、熱輸送への影響が調べられており、磁気島の存在が eITB 形成のトリガーとなることなどが報告されている。しかし磁場配位が eITB 形成に与える影響、特に有理面や、それに伴う磁気島が eITB 形成にどのような影響を与えるのか明らかになっていない。そこでヘリオトロンJが多様な磁場構造を形成できることを利用し eITB の形成に磁場構造が与える影響を調査し

た。

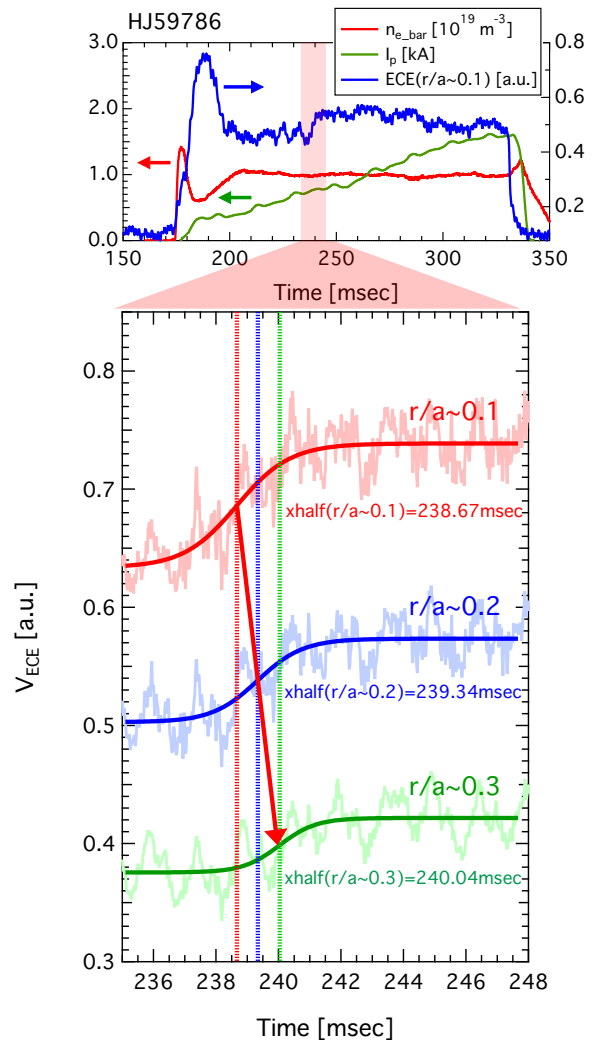


図1 $r/a \sim 0.1, 0.2, 0.3$ における急峻な電子温度の上昇。上昇のタイミングが外側のチャンネルほど遅れている。

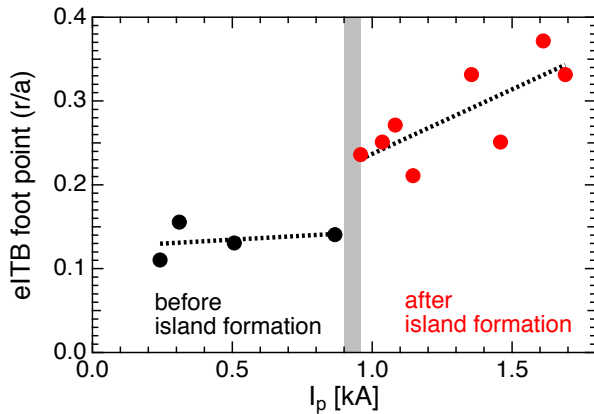


図2 トロイダル電流値の増加に伴う
eITB フット位置の変化

ヘリオトロンJにおいて実効ヘリカルリップルの大きさが異なる配位に対して、eITBが形成される密度閾値に違いがあることを観測した。この結果は新古典理論から予測される傾向と異なり、その要因として磁気島の形成の有無がeITBの形成条件に影響していることが考えられる。そこで、磁気島の存在に着目し、eITBの構造に与える影響を確認した。プラズマが存在しない状態（真空磁気面）において有理面が存在しない配位のヘリオトロンJプラズマに対し、加熱パワー・密度をeITB形成に十分な条件にすることでeITBを形成した。eITB形成を保持した状態で、トロイダル電流を ~ 0 Aから徐々に上昇させることで回転変換を変化させた。トロイダル電流値がある閾値(~ 0.7 kA)を超えるとeITBフット位置が数百マイクロ秒の間

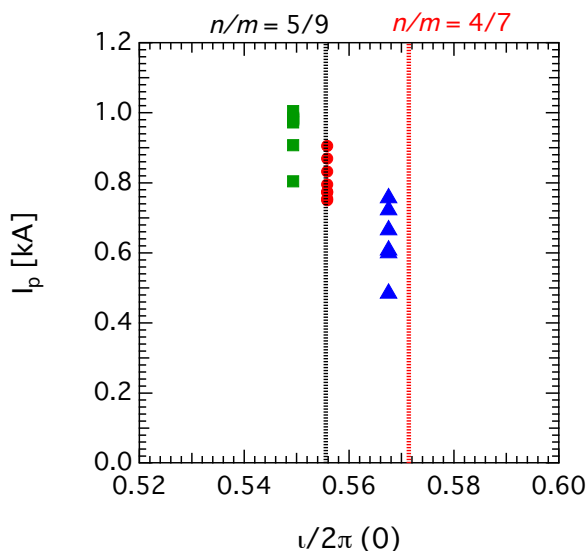


図3 真空磁場の中心回転変換値に対する
遷移時のトロイダル電流値

に $r/a \sim 0.1$ から $r/a \sim 0.2$ までプラズマ外側方向に向かって移動した（図1）。その後、トロイダル電流量の増加に伴いeITBフット位置が更に外側へ移動した（図2）。回転変換の初期値を変えて同様の実験を行うと、磁気島が形成される可能性が高い $n/m=4/7$ に近いほど、eITBフットの位置が移動を始めるトロイダル電流値が下がることが明らかになった（図3）。実験パラメータ領域には他にも磁気島を形成することができる低次の有理面が存在するが、そのような有理面にはeITBが影響を受けないことも確かめられている。実験的に得られたトロイダル電流値とeITBフット位置の変化を考察するため、新古典理論計算からブーツトラップ電流分布を求め、それを元にMHD平衡コード（VMEC）を用いて回転変換分布を見積もったところ、トロイダル電流値がある値を超えるとプラズマ中心領域（ $r/a \sim 0.3$ ）の回転変換が $4/7$ を越え、有理面が形成されることが示された。更に、その後電流値の増加に伴い有理面位置がプラズマ外側に移動することも示され、実験と定性的に矛盾しない結果となった。

ヘリオトロンJはプラズマ全域で磁気シアが非常に小さい磁場配位を有するため、わずかな電流によって有理面の形成・消滅や、有理面の位置を制御することができる。以上の結果はトロイダル電流制御を介した時間応答性の高いeITBの形成及び位置制御の可能性を示している。eITBフット位置は閉じ込め性能に対して $(r/a)^2$ の改善効果があり、閉じ込め改善領域を広げることで高性能プラズマの生成手法に新たな知見を与えるものである。本講演では、ヘリカルプラズマの多様な磁場構造がeITB形成に与える影響について報告し[6]、それらの影響を及ぼす物理機構に関して議論する。

- [1] F. Sano *et al.*, Plasma Fusion Res. 3, 26 (2000)
- [2] N. Kenmochi *et al.*, Review of Scientific Instrument. 85. 11D819 (2014).
- [3] N. Kenmochi *et al.*, 2015 Proc. of 42nd EPS conference p.5.131
- [4] T. Estrada *et al.*, Nuclear Fusion. 56, 026011 (2016)
- [5] K. Ida *et al.*, Nuclear Fusion. 56, 092001 (2016)
- [6] T. Minami *et al.*, Proc. of 26th IAEA Fusion Energy Conference