

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17800

研究課題名(和文) 定常化球状トカマク開磁気面領域における能動的放射損失が誘起する熱流変動

研究課題名(英文) Heat-flow change induced by active radiation loss in open magnetic flux of steady-state spherical tokamak

研究代表者

恩地 拓己 (Onchi, Takumi)

九州大学・応用力学研究所・学術研究員

研究者番号：00727216

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,100,000円

研究成果の概要(和文)：磁場閉じ込めプラズマ核融合炉におけるプラズマ対向材料の崩壊を防ぐ方法として、能動的放射損失による熱流束低減が重要であり、その実験的検証のための研究を行った。また放射損失を促すツールとして超音速分子ビーム入射システムを整備した。球状トカマク装置QUESTにおいて、スクレイブオフ層(SOL)及び真空容器壁位置の電子温度、電子密度、熱流束、プラズマ流速を計測した。大きな放射損失を伴うガス入射によって粒子及び熱がSOLから磁力線エンド部へ流れる様子が観測された。さらに約2時間の長時間トカマク放電における計測で、放電終盤の電子密度上昇・電子温度低下を観測した。

研究成果の概要(英文)：Damage of plasma facing component (PFC) is a serious issue for future nuclear fusion reactor, where plasma is confined magnetically. Active radiation-loss is one of the methods to reduce heat flux on PFCs. This experiment is a bench test to investigate effect of active radiation-loss. In the spherical tokamak QUEST, electron temperature, density, heat flux, and velocity of plasma flow are measured in the far scrape-off layer (SOL) and the end-plate. Substantial flow of particles and heat from the SOL to the end-plate is observed after strong gas puffing with high radiation-loss. Increase of electron density and decrease of electron temperature occur before a disruption with high H alpha line-emission in a 2 hours-long pulse tokamak operation. In addition, a system for super-sonic molecular beam injection to induce local radiation-loss has been prepared.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：プラズマ熱流束 放射損失 球状トカマク スクレイブオフ層

### 1. 研究開始当初の背景

将来の磁場閉じ込めプラズマ核融合炉(トカマク炉)におけるプラズマ対向材料(PFC)の耐熱設計は困難を極めている。入力パワー3 GW級の核融合炉では、中心部から500 MWがスクレイプ層(SOL)へ輸送されると言われており、その熱がPFCに流入した場合には材料の浸食・損壊が起きてしまう。材料にタングステンやフェライト鋼を用いて水冷した場合、熱流束限界は10 MW/m<sup>2</sup>程度であり、ダイバータ自身でのパワー消費が50 MW程度とすると、排出されるパワーの90%を周辺部、SOL及びダイバータ付近のプラズマ中で消費しなければ炉壁は破損することになる<sup>1</sup>。この数百 MWのパワー消費を担うのは中性ガス入射による放射損失である。SOLやダイバータ付近へガスを入射し、放射損失を十分に上昇させて熱エネルギーを消費することは核融合炉の運転において最重要課題の一つである。

よって適切なガス入射によるSOL中の熱消費には、熱を運ぶ“プラズマ流”の理解が不可欠になる。トカマク炉では一般的に中心部からSOLへのプラズマ輸送は装置の低磁場側で起きやすいが、SOL流の働きによってその熱は低磁場側だけでなく高磁場側ダイバータへも運ばれる。またSOL流の構造は中心部の流れと強く関わっており、プラズマの状態によって大きく変化する<sup>2</sup>。例えばトカマクのL-modeとH-modeではSOL流構造は大きく異なる。トカマク中には中性粒子ビーム入射(NBI)などの外部からの運動量入射がない状態でも数十km/sの固有流が生じる。外部からの運動量入射があればさらに流れの構造は変化する。このようにSOL流は複雑な機構を経て形成されているため、輸送される熱の流れも複雑化する。

[1] N.Asakura *et al.*, Nucl. Fusion 53 (2013) 123013

[2] B. LaBombard *et al.*, Nucl. Fusion 44 (2004) 1047

### 2. 研究の目的

磁場閉じ込めプラズマ核融合炉におけるプラズマ対向材料の崩壊を防ぐには、閉磁気面を持つ中心部(コア)プラズマから開磁気面領域のスクレイプ層(SOL)へ排出される熱を放射損失させる必要があり、その実験的検証を行うことを目的とする。SOL中で熱を運搬するプラズマ流及び高エネルギー粒子の振舞いを調べることで、熱の流れを把握することは放射損失の効率化に役立つ。球状トカマクQUESTでは遠方SOLにおいて複雑なプラズマ流と熱流束分布が観測されており、本研究ではその理解を進める。QUEST装置は10分以上の長時間放電を行うことが出来る国内唯一のトカマク装置である。PFCにおける熱の問題が発生しない短パルス装置に比べると、十分に長い

時間スケールで放射損失の効果を調べる実験研究が可能である。さらにSOLへの局所的中性粒子ガス入射を実施して、長時間パルスにおけるSOLプラズマのパラメータ計測を計測し、またプラズマ対向材料に流入する熱量を測定することで、放射損失がもたらす球状トカマク中の熱流変動を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1)遠方 SOL 領域における複合静電プローブ計測

球状トカマク装置QUESTの遠方SOL領域計測のため、複合静電プローブを設計・製作した。この計測器はマッハプローブとトリプルプローブの両機能を持つ、ピン数12のプローブアレイである。マッハ数に関しては4方向同時計測可能で、磁力線平行方向及び垂直方向の流れを理解するのに役立つ。トリプルプローブによって同じ位置の電子密度、電子温度が計測されるので、マッハ数は流速に変換できる。また熱流束計測にも使われる。プローブヘッドは大半径方向に移動可能なマウントに設置されている。

複合プローブをQUESTの遠方SOLに設置し、各パラメータを計測した。内側にヌル点が生じるInboard Poloidal field-Null(IPN)配位<sup>3</sup>では、コア部にも遠方SOLにも数十km/sの早い流れが存在し、互いに関係がある。流れの径方向分布を測定し、大量ガスパルスによって流れ、電子密度・温度や熱流束が変化する様子を詳細に調べた。またQUEST装置の特徴である長時間のトカマク配位において真空容器壁付近の電子密度、温度を計測した。

[3] K Mishra *et al.*, Nuclear Fusion 55 (2015) 083009

#### (2)局所的ガス入射システムの整備

システムは主にラバルノズル及び短時間開閉出来るパルスバルブで構成される。パルスバルブ上流側にプラズマの燃料である

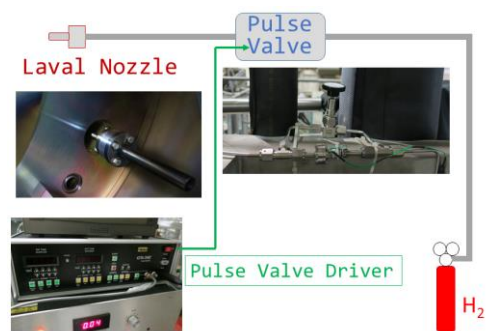


図1：局所ガス入射システム

水素ガスを10気圧程度まで封入し、バルブをマイクロ秒からミリ秒オーダーで開閉することで瞬間的に高気圧ガスをラバルノズルに突入させる。ノズルからは超音速分子ビームが出て、局所的ガス入射を可能とする。図1に組み立てたシステムのプロットと写真を示す。

#### 4. 研究成果

##### (1)複合プローブを用いた熱流束・プラズマ流速計測結果

電子サイクロトロン加熱のみで生成されるトカマク配位では、プラズマ対向壁に近い遠方 SOL 領域においても早い流れが観測されている。IPN 配位では  $v > 20$  km/s の磁力線平行方向プラズマ流が観測される。この流れの絶対値は見積った Drift-driven の成分よりも十分に大きい。よって Transport-driven の成分や、磁力線のエンド部のシンク効果が大きいと推定される。大量ガス入射によって遠方 SOL 領域で熱流束が急低下するが、開磁気面上の磁力線エンド部では急上昇する。この時遠方 SOL 領域で平行方向プラズマ流の速度はおおよそ半減しているが、それでも粒子は SOL から磁力線エンド部に大量に流れ込んでいいると考えられる。ガス入射で  $H\alpha$  線の強度は上昇したが、エンド部の熱流束も大幅に上昇した。水素ガス入射は放射損失の効果が小さく、熱流束軽減に至らない可能性がある。今後は SOL 部への局所的ガス入射実験を進め、放射損失による熱流束軽減の効果を詳細に調べる必要がある。

##### (2)長時間トカマク放電時の電子密度温度計測結果

QUEST では約2時間のトカマク配位・電流駆動を実現させ、その際に起きる遠方 SOL 領域のパラメータを調べることが出来た。放電後半では、真空容器壁付近の電子密度は上昇、電子温度は低下傾向にある。 $H\alpha$  線強度が上がり放射損失は高くなるが、熱流束としてはやや低下していることがわかった。

[4] K. Hanada *et al.*, Proceedings of the 26th IAEA-FEC (2016) EX/P4-49

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

① T. Onchi, H Zushi, K Mishra, Y Oyama, Y Nagashima, K Hanada *et al.*, Plasma Physics and Controlled Fusion 58 (2016) 115004, 査読有, [DOI: 10.1088/0741-3335/58/11/115004]

② K Mishra, H Zushi, H Idei, T. Onchi, M Hasegawa, K Hanada *et al.*, IEEE Transactions on Plasma Science 44 (2016) 441-447, 査読有, [DOI: 10.1109/TPS.2016.2522765]

③ 恩地拓己, “球状トカマク QUEST の IPN 配位における遠方スクレイプオフ層の熱流束とプラズマ流”九州大学応用力学研究所所報, 149 (2015) 47-50, 査読無, [http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/publicity/reports/riam-reports\\_149.pdf](http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/publicity/reports/riam-reports_149.pdf)

④ T. Onchi, Y Mahira, K Nagaoka, S Tashima, S Banerjee, K Mishra, H Idei *et al.*, Journal of Nuclear Materials 463 (2015) 428-431, 査読有, [DOI: 10.1016/j.jnucmat.2014.11.136]

⑤ T. Onchi, H Zushi, K Mishra, Y Mahira, K Nagaoka, K Hanada, H Idei *et al.*, Physics of Plasmas 22 (2015) 082513, 査読有, [DOI: 10.1063/1.4928878]

⑥ K Mishra, H Zushi, H Idei, M Hasegawa, T. Onchi, S Tashima *et al.*, Nuclear Fusion 55 (2015) 083009, 査読有, [DOI: 10.1088/0029-5515/55/8/083009]

[学会発表] (計3件)

① T. Onchi et al., “Non-inductive current built-up by local electron cyclotron heating and current drive with a 28 GHz focused beam on QUEST”, 58th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Oct.31-Nov.4,2016; San Jose, California

② 恩地拓己 他, 「QUEST-IPN 配位におけるガスパフ入射時の遠方 SOL 流の振る舞い」日本物理学会第71回年次大会 2016/3/19-22, 東北学院大学

③ T. Onchi et al., “Modification of far-SOL flow by substantial gas injection in the inboard poloidal field null configuration on QUEST”, 57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Savannah, Georgia, USA, Nov.16-20, 2015,

[その他]

ホームページ等

①高温プラズマ理工学研究センター  
[http://www.triam.kyushu-u.ac.jp/QUEST\\_HP/index.html](http://www.triam.kyushu-u.ac.jp/QUEST_HP/index.html)

②研究室  
<http://www.triam.kyushu-u.ac.jp/hanadalabo/ja/index.html>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

恩地 拓己 (ONCHI Takumi)

九州大学・応用力学研究所・学術研究員

研究者番号：00727216