

## 多階層複雑・開放系における粒子循環の物理とマクロ制御

関子, 秀樹  
九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センター

<https://doi.org/10.15017/1657850>

---

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 149, pp.1-9, 2015-09. 九州大学応用力学研究所  
バージョン：  
権利関係：

# 多階層複雑・開放系における粒子循環の物理とマクロ制御

凶子 秀樹\*

(2015 年 8 月 31 日受理)

## Physics and macro control of particle circulation in a multi hierarchical complex-open system

Hideki ZUSHI

Email of corresponding author: [zushi@triam.kyushu-u.ac.jp](mailto:zushi@triam.kyushu-u.ac.jp)

### Abstract

Fusion reactor research and development via a half-century has progressed to a validation of engineering and physics of nuclear burning as a source of energy generation through the construction of ITER. Although "steady state operation (SSO)" is an indispensable prerequisite for a reactor, the immediate goal of ITER is 400 seconds. In SSO the circulation control of the fuel particles will be the subject of challenging studies due to plasma wall interaction, though it is not a problem in pulsed operation. The present study is aimed at clarifying the particle circulation in three systems, core, boundary, and first wall. Elementary processes, the system interaction, a circulation model, and control of the particle circulation, are subjects to build the foundation for SSO. For this study the viewpoint of "Physics and macro control of particle circulation in a multi hierarchical complex-open system" is introduced. The elucidation of the circulation in each system and the mutual interference leads to the key macro control of the whole system.

**Key words :** *Plasma-wall interaction, Particle circulation, complex-open system*

## 1. まえがき

本研究(“多階層複雑・開放系における粒子循環物理とマクロ制御”)は、太陽や星の重力によって閉じ込められたプラズマにおいて実現される核融合反応を、地上においても磁場により閉じ込められた高温プラズマを用いて実現し、新しいエネルギー生成源として利用することをめざした研究開発に貢献しようとするものである。外部容器無しでプラズマと真空領域が存在しうる宇宙空間と違って、地上で作るプラズマは金属容器の中に作られた真空状態から生成されるため、プラズマ・気体・固体間重相相互作用が不可避でその克服が定常的なエネルギー源の実用化において重要課題となる。このような認識の下、平成 24 年度から 28 年度まで 5 年間研究支援を得て科学研究費基盤研究課題として研究

を行っている。

自動車のエンジンでは燃料と酸素の注入、圧縮加熱、点火、排気のプロセスを経て動力を得ているが、核融合炉においても同様なプロセスを必要とする。異なる点は化学燃焼と比べて高温のプラズマを対象にしている事である。本研究では三つの空間領域、即ち高温プラズマ、金属容器、プラズマイオンや燃料粒子の粒子循環に関する研究に着目している。三つの系における固有の物理過程と系間の相互作用の解明、粒子循環モデル、全系粒子循環制御により、核融合炉の定常運転のための学術基盤確立を目的としている。

最終講義では、ちょうど研究の中間地点に参りましたことと代表者の定年を機会として、長年お世話になりました応用力学研究所の方々、この研究を御支援頂いております学会・研究者の皆様、困難な製品の製作に関わってくださったメーカーの皆様、エネルギー問題に関心をお寄せいただい

\*九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センター

ている国民の皆様にも、当該研究の進捗状況を知っていただくために概要を紹介させていただいた。現在、国際協力が進められております熱核融合実験炉 ITER 計画においても避けられない”プラズマと壁の相互作用”に関する問題に対し、新しい切り口の研究によってブレークスルーを目指したいと研鑽を重ねている。

## 2. 研究の背景

半世紀を経た核融合炉開発研究は国際熱核融合炉 ITER の建設・実験によってエネルギー生成源としての核燃焼物理と工学の検証段階へと進展している。ITER 装置では重水素および三重水素の燃料注入を用いた核融合燃焼制御、核融合反応生成物である He 生成とそれに基づく核融合燃焼維持、He 灰の排出などの燃焼物理の理解と制御性の確認が予定されている。最終的に核融合炉が人類の基幹エネルギー源としての役割を果たすには、”炉の定常運転”が前提である。しかし、これまで世界中の大型核融合実験装置で、プラズマ電流を必要とするプラズマ閉じ込め方式では、10 分を超える運転実績はなく、ITER でも 400 秒が当面の目標である。自己点火後の高温プラズマの定常運転の実現のためには、パルス運転では問題とならない燃料粒子の炉内の循環制御が第一義的な研究課題となる。

## 3. 研究の位置づけ

外部からの燃料供給や外部への灰排気が必要とするエネルギー生成システムは本質的に“開放系”として外部条件に強く拘束される。核融合炉は燃料供給と灰排気を両立させる“粒子循環”機能が求められる。この問題解決の手法として、近年成功を収めつつあるマクロ、メゾ、ミクロの多階層構造による自然認識のモデルの適用とその発展を試みている。粒子開放系である核融合炉エネルギー生成システムの制御に関しては、入れ子状の多階層構造を持つ複雑系として新たに問題を設定すべきである。具体的に本研究では、各階層内部の独立した事象の解明にとどまらず、異なる階層構造間の相互干渉性を抽出するモデルに従っていかに安定にマクロ系（定常粒子循環）を維持・制御するかという観点で問題を設定している。

水素原子は容易に金属中に溶解し表面再結合するが、その物性は金属表面状況及び入射束に著しく支配され、対向面の著しい表面積のために壁排気・放出量は外部排気量や燃料注入量を凌駕しうる。こうした“燃料粒子開放系における粒子循環の複雑さ”がシステムの定常化を律速する。申請者たちのこれまでの定常運転に関わる高温プラズマと壁との相互作用（Plasma-Wall-Interaction）に起因する壁粒子循環研究に、周辺・境界プラズマが存在する開放磁場系に特有なスケール長を有する

Scrape-Off-Layer での粒子循環、ミクロな背景乱流がマクロ構造を支配する plasma core の粒子循環をあらたに課題として設定し、それらを個別にではなく、システム全体を時空スケール長が極端に異なる系から構成される複雑・開放系ととらえる新たな視点を導入する。これにより、この研究分野に研究者の幅広い関心を集め、自然認識の進化に貢献するとともに、非誘導電流駆動球状トカマクにおける粒子循環の制御を通じて定常炉の可能性を切り開く。

## 4. 研究の目的

本研究では上述のように、核融合炉の定常化に向けた研究課題として“多階層複雑・開放系における粒子循環物理とマクロ制御”という観点で終端・対向面、開磁気面、閉磁気面を特徴とする WALL、SOL、CORE 領域から構成される入れ子状の複雑系における粒子循環に関わるマクロ構造形成・伝達過程とその制御性を調べることを目的とする。具体的には温度制御可能な対向壁を QUEST に設置し、最外領域の壁での粒子循環過程の定常化・制御化を試みる。このような粒子循環系において、中性粒子を介した①壁吸蔵・放出過程の応答関数と燃料注入に対する壁循環遷移現象の確率密度分布、②SOL での blob 動特性と揺動および燃料注入とイオンの流れ、③燃料注入による CORE 密度分布形成と駆動電流やプラズマ剛体回転分布の運動量摂動に着目する。本研究では多階層複雑系という物理描像のもとで、燃料注入を摂動源として各領域の現象を支配する階層性と系全体としての複雑性を切り分けて研究すると同時に開放粒子循環系の定常制御の観点から複雑系相互の干渉性を明らかにし、核融合炉の定常密度運転実現への手法確立の展望を切り開く。

### (I) 各系の複雑性の特徴の認識、特有の研究対象や課題、必要なシステム

- (a) **閉磁気面複雑系**：閉じた磁気容器（閉磁気面）を形成している領域をさし、その外側の開磁気面系（磁力線が容器に終端する領域の総称）と界面をなし、複雑性の根源として、物理量勾配にもとづく乱流場に加えて、高周波で駆動される高速電子に支配された速度分布関数の歪みを自由エネルギーとする乱流輸送にも支配された領域。(b、c) 系との相互干渉ならびに乱流場での粒子供給に伴う電子・イオンの運動量輸送変化とその緩和過程を研究対象とする。
- (b) **開磁気面複雑系**：間歇乱流輸送を特徴とする領域であり、外部開放系の粒子注入・再放出の情報を閉磁気面に伝達する役割を担う。輸送は沿磁力線の流れとプラズマ塊 (blob) に支配されており、特徴時間は径方向、沿磁力方向ともに数ミリ秒以下である。粒子供給に対する

電子・イオンの運動量輸送に関して(a)系との相互伝達速度と緩和過程の同定、および(c)へ入射束乱流化を研究対象とする。

(c) 外部開放複雑系：粒子の注入、排気を通じて外部と連結し、壁温度と入射束分布に依存した粒子吸蔵・再放出があり、粒子循環の巨視的時定数を決定する領域。吸蔵・放出粒子バランスとその影響の空間・時間スケールの同定並びに、粒子循環の確率過程の解明を研究対象とする。

必要な 2 つのシステムとして、1) 粒子供給に伴う(a)系の密度変化に対応する高周波電流駆動システム、2) (c)系での粒子循環時定数の短時間化と温度制御による循環過程拘束化を目指して温度制御システムを構築する。前者では位相制御装置の入力として密度計測装置開発を目指し (2015 年 1 月完成)、後者では定常運転や入力パワーの大小に対応可能な高温壁システムの設計・製作・設置を目指した。2014 年 10 月に完了し、2015 年 2 月には 200°C での電流駆動実験を実施した。

## (II) 3 つの系の複雑性を特徴づける成果の概要

### (a) 非誘導電流駆動と平衡配位

トーラス状プラズマ中に直流電流を駆動するために一方向に進行する電子サイクロトロン波と高速電子の相対論的共鳴過程を利用する。期間内に電流値を 20kA から 66kA (最終目標値の約 7 割) に増大することに成功し、アスペクト比=1.4 の球状トカマク平衡配位を得た (Fig.1(a))。電流が作る磁気圧に比べてプラズマ圧力が大きい運転を実現することにより、ヌル点やセパトロクスが自発的に現れる高ポロイダルベータ配位 (Fig.1(b)) への遷移条件を見だし、古典的な平衡限界値での配位維持が形状の扁平化を補償する負の三角度の増大によることを定量的に解明した。

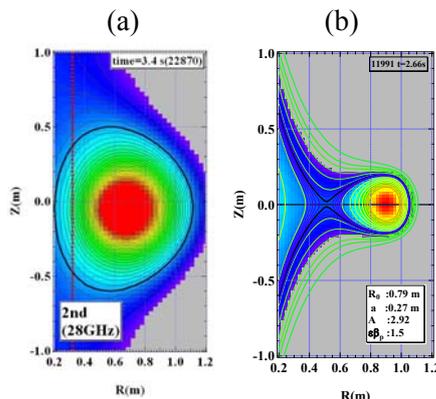


Fig.1 Contour maps of poloidal magnetic flux: (a) a standard inboard limiter configuration generated with 28 GHz ECH and (b) an inboard poloidal field null configuration with 8.2 GHz ECH.

またこの配位では自発的に剛体回転分布をもつトロイダル回転が存在することを見だしている (これらは重要な成果として Plasma2014 会議の招待講演、第 69 回日本物理学会年次大会「領域 2 学生優秀発表賞」、第 24 回 Toki 国際会議の招待講演の機会を得た)。期間内に揺らぎと流れ、自発流れとヌル点配位形成の関係解明を目指す。

### (b) SOL 乱流構造の可視化と確率密度分布

この領域は間歇的なプラズマ塊 blob の径方向輸送が特徴であり、沿磁力線方向も含めて 2 次元乱流構造を高速カメライメージにより解明した。光量の揺らぎがプラズマ密度のそれに対応するとして、blob が最外殻領域の急勾配( $L^{-1}(R,Z)$ )領域から発生し伝播する様子から、揺らぎの 4 次モーメント ( $K(R,Z)$ ) と 3 次モーメント ( $S(R,Z)$ ) の 2 次関数の空間構造を決定し、drift 波から乱流場への発達過程と結論した (Fig. 2)。このことを揺らぎの確率密度分布関数がガウス型からガンマ型に発展する様子として確かめ、さらに揺動力と非線形項、線形項の相対強度の関数として、揺動確率分布の時間発展とメゾ空間領域を予測する手法を開発した。流れ場の 2 次元観測に取り組んでいる。

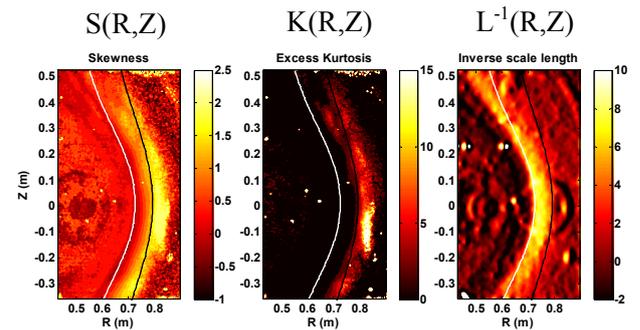


Fig. 2 Higher order moments  $s$  and  $k$  of the intensity PDF  $p(x)$ . Inverse gradient scale length of intensity is shown in the third panel. Radial regions representing the intensity gradient region and near scrape off layer are denoted in solid white and black lines, respectively.

### (c) 定常粒子循環制御法の開発と静的粒子収支における壁吸蔵・再放出の独立計測の確立

粒子循環束一定 (Fig. 3c の緑線) を保持する供給周期制御方式を確立し、820 秒の球状トカマク配位での定常運転の世界記録を達成した (Fig. 3)。定常化条件と粒子吸蔵率の関係、放電時間内の緩やかな粒子吸蔵率低下 (Fig. 3c の青線) が実測吸蔵束の減少と一致する成果 (Fig. 3g の 3 本の線) をあげた (これは世界で我々のみが開発した透過束観測の成果であり、2015 年 5 月開催の IAEA 磁気装置定常運転の国際会議で報告)。

粒子循環モデルと高温壁への予測として、吸蔵・放出

現象を金属表面の共堆積層、プラズマ密度発展と連立して解析する0次元モデル方程式を開発し、プラズマ照射試料からの重水素脱離スペクトルと比較し良い一致をみている。この解析より堆積層の表面再結合が壁排気の時間変化の支配因子であることが理解され、上記実測とも定性的な一致を見ている。室温から100°Cの範囲の壁温度依存性に対してモデル結果は実測の範囲と良く一致しており、2015年に本格的に実施する高温化の予測に用いている。計測の多点化と両者の比較はモデルの検証にとどまらず、申請時に指摘を受けたモデルの2次元化を目指すものである(同上招待講演)。

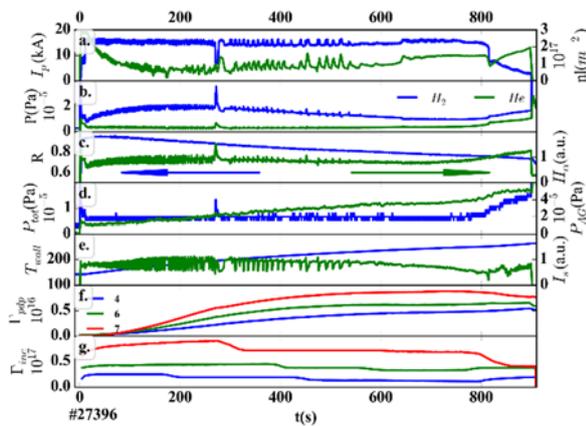


Fig.3 Discharge parameters for typical SSTO (#27396). a. plasma current and linear density, b. H<sub>2</sub> and He pressures, c. gas balance R and H $\alpha$ , d. total pressure and AG pressure, e. wall temperature (°C) and ion saturation current, f. permeation flux for PDP 4,6,7 (H<sub>at</sub>.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>), g. incident flux (H<sub>at</sub>.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>).

### (Ⅲ) 粒子供給に対する各系の応答と系間相互相関・干渉性に関する成果の概要

注入粒子はエネルギーと正味の運動量を持たない。粒子注入による高温プラズマの粒子循環の定常化において、(a)CORE、(b)SOLでのプラズマ運動量(電子については電流、イオンについては回転あるいは流れ)との応答と相関を調べている。COREでの急激な密度上昇(Fig. 4a)に伴い、駆動電流が減少(Fig. 4b)するが、イオンのトロイダル回転 $V_\phi$ は逆(+)電流方向に反転後、0.1秒間に順(-)方向へと緩和する(Fig. 4c)ことを見いだした。特徴は剛体回転の反転と緩和である。(Fig. 4d)。一方”遠 SOL”では $V_\phi$ は減少するが方向の反転は無く、ポロイダル流速のイオン反磁性方向から電子反磁性方向への反転緩和が観測されている(Fig. 4e)。このことは粒子供給によって、CORE周辺と”遠 SOL”の間の領域に非常に強い速度シアの形成が予想される。電子電流の回復は

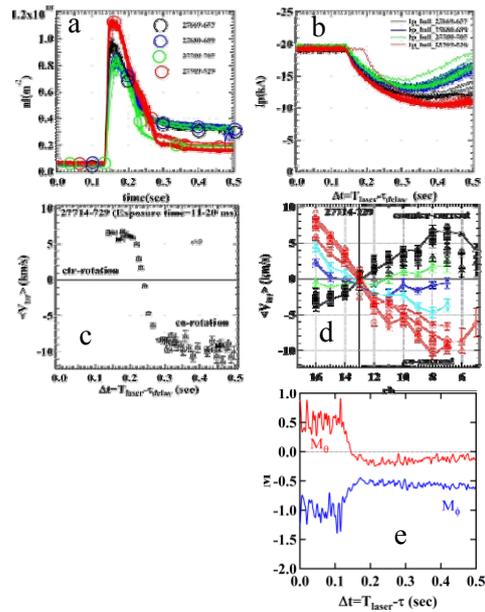


Fig. 4 (a) Line-integrated electron density, (b) plasma current, and (c) toroidal velocity right after substantial gas injection. (d) Distribution of toroidal velocity. (e) Mach numbers at the far-SOL in poloidal (red) and toroidal (blue) directions.

イオン流速の反転緩和過程に比べて緩やかであり、未知の物理量(高速電子起因の径方向電場)の発展が背景に予想される(これらを含めた自発回転の誘起と回転の反転に関しては2015 IEEE Transaction on Plasma science 国際会議で招待講演)。粒子供給を摂動源として、H<sub>2</sub>ガス圧力の応答関数を求める手法を開発している。放電停止に至る過程でSOL-壁近傍のプラズマの乱れと同時にH<sub>2</sub>圧力乱れが増大する。圧力の支配因子である吸蔵・放出束の摂動応答を周期的なガス供給下で調べた。Fig. 5aは真空中(点線)およびプラズマ中(赤線)のH<sub>2</sub>ガス圧変から決定した応答関数であり、粒子注入直後から7-8秒までは“新たな排気即ち壁吸蔵”が、その後のlong tailは壁放出が支配していることに対応し、同じプラズマで求めた吸蔵束の応答関数(Fig. 5b)の振る舞いとよい一致を示している。高温プラズマの定常化実験では帰還粒子供給に対する応答関数の時間発展が顕著となる。高循環状態(HR)から低循環状態(LR)への遷移を観測し、HR寿命確率密度分布関数がガウス分布からlong-tailを持つ分布へと時間発展する様子を定量的に見いだした(Fig. 5c)(これらの手法開発は世界で我々だけが取り組んでいる極めて画期的なものであり、今後は時間発展法則の解明に取り組む)。

こうして粒子供給は、”CORE、SOL、WALL”系に対して、粒子循環のみならず、運動量変化(摂動のみならずベクトル反転)も通じて、定常運転に影響する事を発

見した。高温壁 HW の導入により、熱バランスのとれた系において、これら 3 つの系の相互干渉性の定量化を HW 温度、循環遷移-寿命、壁入射束や運動量束の空間分布の関数として指標化し、多点計測を用いて多次元データとして取得する。こうしたデータを活用し全系での粒子循環モデル構築をめざす。

専念できたのも皆さまのおかげですので、ここで御礼申し上げたいと思います。

(当日の講演は

<https://www.youtube.com/watch?v=LJ0cE6Zbky&feature=youtu.be> を参照いただきたい)

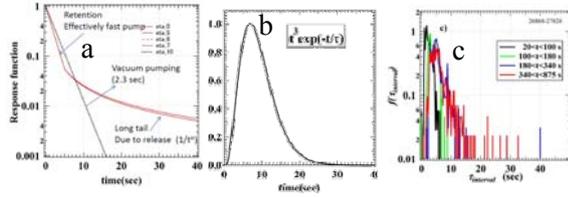


Fig.5 (a) Response functions of hydrogen gas pressure in a vacuum (dotted line) and a plasma (red solid line). (b) A response function of hydrogen retention flux at the wall. (c) Time dependent probability functions of gas puff interval  $\tau_{interval}$  in feedback-controlled steady-state tokamak operation.

## 謝辞

最終講義にあたり、大屋所長ならびに岡本副所長にはこのような機会を与えていただきありがとうございます。大変感謝しております。

私が紹介させていただいたのは、応用力学研究拠点共同利用実験装置の QUEST で行っている実験結果で、研究所の中でも我々と非常に関係の深い伊藤早苗核融合部門長ほか、部門の先生方には日常から非常にお世話になり、ここに厚く御礼申し上げたいと思います。

QUEST 装置は、元センター長の佐藤浩之助先生のリーダーシップの下、建設することができまして、また部門の吉田名誉教授には現在も専門的な知識を教えてくださいましてありがとうございます。このお二人には特にあらためてこの場を借りて御礼申し上げたいと思います。本日紹介した内容はセンターの教員、研究員、技官の方々の共同作業の結果として得られたものであり、代表して紹介できることを感謝申し上げます。QUEST 実験装置は、双方向型共同研究実験装置ということで、幾つかある大学のセンターの中でも拠点、中核装置としての役割を担っています。共同研究に関わられた皆様に感謝と御礼申し上げます。

私は先端エネルギー専攻で大学院教育に携わってきましたが、非常に優秀な学生が実験と一緒に参画していただきました。その成果の一端を紹介できたことに喜びを感じています。最後に、センターの事務補佐員の皆さん方には大変ご協力いただきました。私が研究と教育に

## 関子教授の主要論文リスト

### ○ 第1 著者論文リスト

1. H. Zushi, A. Kuzmin, I. Takagi, S.K. Sharma, M. Hasegawa, M. Kobayashi, Y. Hirooka, N. Yoshida, A. Rusinov, A. Inoue, H. Zhou, A. Fujisawa, K. Hanada, H. Idei, K. Nakamura, Y. Nagashima, K. Matsuoka, T. Onchi, S. Tashima, S. Banerjee, M. Sakaguchi, E. Kalinnikova, K. Mishra, X. Liu, S. Kubo, Y. Ueda, T. Fujita, S. Ide, N. Ohno, A. Hatayama, A. Ejiri, T. Yamaguchi, J. Hiratsuka, H. Togashi, Y. Takase, A. Fukuyama, O. Mitarai, Determination of the system function for the particle circulation process using perturbation technique in QUEST, Proc. of 25<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference, 2014.10.13-18, St. Petersburg Russian Federation, EX/P1-36,(8pp) 2014.
2. H. Zushi, S. Tashima, M. Ishiguro, M. Hasegawa, S. Banerjee, N. Nishino, M. Isobe, K. Hanada, H. Idei, K. Nakamura, A. Fujisawa, Y. Nagashima, K. Matsuoka, S. K. Sharma, H. Liu, K. Toi, T. Maekawa, A. Ejiri, T. Yamaguchi, J. Hiratsuka, Y. Takase, M. Kikuchi, A. Fukuyama, Y. Ueda, O. Mitarai, S. Okamura, Non-inductive current start-up and plasma equilibrium with an inboard poloidal field null by means of electron cyclotron waves in QUEST, Proc. of 24<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference, San Diego, CA, United States, 2012.10.8-13, EX/P2-14, 2012.
3. Zushi, H., Nishino, N., Hanada, K., Honma, H., Liu, H. Q., Higashizono, Y., Sakamoto, M., Tashima, S., Ryoukai, T., Acceleration of blob driven by helical instability in a simple magnetic configuration in QUEST, Journal of Nuclear Materials, **415**, S624-S627, 2011.
4. H. Zushi, N. Nishino, K. Hanada, H. Honma, H. Q. Liu, Y. Higashizono, M. Sakamoto, Y. Nakashima, M. Ishiguro, T. Ryoukai, S. Tashima, K. Nakamura, H. Idei, M. Hasegawa, A. Fujisawa, O. Mitarai, A. Fukuyama, Y. Takase, T. Maekawa, Y. Kishimoto, Study of Edge Turbulence from the Open to Closed Magnetic Field Configuration during the Current Ramp-up Phase in QUEST, Proc. of 23<sup>rd</sup> IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon, Korea, 2010.10.11-16, EX/S, 2010.
5. Zushi, H., Ryoukai, T., Kikukawa, K., Morisaki, T., Bhattacharyay, R., Yoshinaga, T., Hanada, K., Sakimura, T., Idei, H., Dono, K., Nishino, N., Honma, H., Tashima, S., Mutoh, T., Kubo, S., Nagasaki, K., Sakamoto, M., Nakashima, Y., Higashizono, Y., Sato, K. N., Nakamura, K., Hasegawa, M., Kawasaki, S., Nakashima, H., Higashijima, A., Two Dimensional Density Fluctuation Measurements During the Non-Inductive Current Ramp-up Phase in the Compact Plasma Wall Interaction Experimental Device CPD, Plasma Science & Technology, **11**, No.4, 397-401, 2009.
6. Zushi, H., Okamoto, K., Hirooka, Y., Bhattacharyay, R., Sakamoto, M., Sato, M., Surface temperature effects on the retention and pressure variation in continuous and cyclic plasma exposures on the tungsten, Journal of Nuclear Materials, **390-391**, 671-676, 2009.
7. Zushi, H., Hirooka, Y., Bhattacharyay, R., Sakamoto, M., Nakashima, Y., Yoshinaga, T., Higashizono, Y., Hanada, K., Nishino, N., Yoshida, N., Tokunaga, K., Kado, S., Shikama, T., Kawasaki, S., Okamoto, K., Miyazaki, T., Honma, H., Sato, K. N., Nakamura, K., Idei, H., Hasegawa, M., Nakashima, H., Higashijima, A., Active particle control experiments and critical particle flux discriminating between the wall pumping and fuelling in the compact plasma wall interaction device CPD spherical tokamak, Nuclear Fusion, **49**, 055020, 2009.
8. 関子秀樹, 田辺哲朗, 小特集「トリチウムの挙動を知る」, プラズマ・核融合学会誌, J. Plasma Fusion Res. 85, No.1, 2009.
9. Zushi, H., Hirooka, Y., Bhattacharyay, R., Sakamoto, M., Nakashima, Y., Yoshinaga, T., Higashizono, Y., Hanada, K., Nishino, N., Yoshida, N., Tokunaga, K., Kado, S., Shikama, T., Kawasaki, S., Okamoto, K., Miyazaki, T., Honma, H., Sato, K. N., Nakamura, K., Idei, H., Hasegawa, M., Nakashima, H., Higashijima, A., Active particle control experiments and critical particle flux discriminating between the wall pumping and fuelling in the compact plasma wall interaction device CPD spherical tokamak, Proc. of 22<sup>nd</sup> IAEA Fusion Energy Conference, EXP/P4-12, 2008.
10. Zushi, H., Hanada, K., Idei, H., Hasegawa, M., Sasaki, K., Bhattacharyay, R., Sakamoto, M., Nakamura, K., Sato, K. N., Kawasaki, S., Nakashima, H., Higashijima, A., Electron cyclotron counter current drive experiments in lower hybrid current drive plasma in TRIAM-1M, Fusion Science and Technology, **52**, No.2, 240-249, 2007.

11. Zushi, H., Morisaki, T., Inada, Y., Bouchard, J., Nakashima, K., Tsuchiya, H., Hanada, K., Sasaki, K., Bhattacharyay, R., Sato, K. N., Nakamura, K., Sakamoto, M., Idei, H., Hasegawa, M., Kawasaki, S., Nakashima, H., Higashijima, A., Two-dimensional density profile measurement with a sheet thermal Li beam on CPD, *Journal of Nuclear Materials*, **363-365**, 1429-1435, 2007.
12. Zushi, H., Nozaki, Y., Bhattacharyay, R., Nakashima, K., Sakamoto, M., Hanada, K., Idei, H., Nakamura, K., Sato, K. N., Nishi, S., Ogawa, M., Takaki, K., Sasaki, K., Hirooka, Y., Hasegawa, M., Xu, H., Kado, S., Shikama, T., Kawasaki, S., Nakashima, H., Higashijima, A., Relation between charge exchange flux and impurity influx studied by perturbation methods of gas puffing, heat load and confinement properties in TRIAM-1M, *Journal of Nuclear Materials*, **363-365**, 1386-1394, 2007.
13. H. Zushi, K. Hanada, H. Idei, S. Nishi, T. Maekawa, M. Azumi, A. Fukuyama, S. Kubo, T. Shimozuma, T. Notake, K. Sasaki, B. Bhattacharyay, K. Nakashima, H. Hoshika, M. Sakamoto, M. Ogawa, K. Nakamura, K. N. Sato, M. Hasegawa, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima, K. Toi, Y. Takase, T. Shikama, S. Kado, O. Mitarai, K. Takahashi, K. Takaki, N. Maezono, M. Kitaguchi, F. Wang, H. Xu, Y. Nozaki, Y. Wataya, N. Kimura, Bi-directional Lower Hybrid Current Drive and Electron Cyclotron Counter Current Drive Experiments in Full Current Drive Plasma in TRIAM-1M, Proc. of 21<sup>st</sup> IAEA Fusion Energy Conference, Chengdu, China, 2007.10.16-21, EX/P6-23, 2006.
14. Zushi, H, Nakamura, K, Hanada, K, Sato, KN, Sakamoto, M, Idei, H, Hasegawa, M, Iyomasa, A, Kawasaki, S, Nakashima, H, Higashijima, A, Kuramoto, T, Tanaka, A, Matsuo, Y, Esaki, K, Akanishi, H, Sugata, T, Hoshika, H, Sasaki, K, Maezono, N, Kitaguchi, M, Imamura, N, Yoshida, N, Tokunaga, K, Fujiwara, T, Miyamoto, M, Tokitani, M, Uehara, K, Sadamoto, Y, Nakashima, Y, Kubota, Y, Higasazono, Y, Takase, Y, Ejiri, A, Shiraiwa, S, Kado, S, Sikama, T, Tsuji-Iio, S, Takeda, T, Hirooka, Y, Ida, K, Nakamura, Y, Fujimoto, T, Iwamae, A, Maekawa, T, Mitarai, O, Steady-state tokamak operation, ITB transition and sustainment and ECCD experiments in TRIAM-1M, *Nuclear Fusion*, **45**, No.10, S142-S156, 2005.
15. H. Zushi, K. Nakamura, K. Hanada, K. N. Sato, M. Sakamoto, H. Idei, M. Hasegawa, A. Iomasa, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima, T. Kuramoto, A. Tanaka, Y. Matsuo, K. Esaki, H. Akanishi, H. Ayatsuka, S. Imada, T. Sugata, H. Hoshika, K. Sasaki, N. Maezono, M. Kitaguchi, N. Imamura, T. Hayasaki, K. Ichizono, S. Kugimiya, N. Yoshida, K. Tokunaga, T. Fujiwara, M. Miyamoto, M. Okitani, K. Uehara, Y. Sadamoto, Y. Nakashima, Y. Kubota, Y. Hihashizono, Y. Takase, A. Ejiri, S. Shiraiwa, S. Kado, T. Sikama, S. Tsuji-Iio, T. Takeda, Y. Hirooka, K. Ida, Y. Nakamura, T. Fujimoto, A. Iwamae, T. Maekawa, O. Mitarai, Overview of steady-state tokamak operation and current drive experiments in TRIAM-1M, Proc. of 20<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference, IAEA-CN-116-OV5-2, 2004.
16. Zushi, H, Itoh, S, Hanada, K, Nakamura, K, Sakamoto, M, Jotaki, E, Hasegawa, M, Pan, YD, Kulkarni, SV, Iyomasa, A, Kawasaki, S, Nakashima, H, Yoshida, N, Tokunaga, K, Fujiwara, T, Miyamoto, M, Nakano, H, Yuno, M, Murakami, A, Nakamura, S, Sakamoto, N, Shinoda, K, Yamazoe, S, Akanishi, H, Kuramoto, K, Matsuo, Y, Iwamae, A, Fujimoto, T, Komori, A, Morisaki, T, Suzuki, H, Masuzaki, S, Hirooka, Y, Nakashima, Y, Mitarai, O, Overview of steady state tokamak plasma experiments in TRIAM-1M, *Nuclear Fusion*, **43**, No.12, 1600-1609, 2003.
17. H. Zushi, S. Itoh, N. Yoshida, K. Hanada, K. Nakamura, M. Sakamoto, E. Jotaki, M. Hasegawa, K. Tokunaga, A. Iyomasa, A. Iwamae, Y. Hirooka, Physics and Technological Issues for Steady-State Tokamak Operation on TRIAM-1M, *Journal of Plasma and Fusion Research*, **79**, 1302-1316, 2003.
18. H. Zushi, S. Itoh, K. Hanada, K. Nakamura, M. Sakamoto, E. Jotaki, M. Hasegawa, Y. D. Pan, S. V. Kulkarni, A. Iyomasa, S. Kawasaki, H. Nakashima, N. Yoshida, K. Tokunaga, T. Fujiwara, M. Miyamoto, H. Nakano, M. Yuno, A. Murakami, S. Nakamura, N. Sakamoto, K. Shinoda, S. Yamazoe, H. Akanishi, K. Kuramoto, Y. Matsuo, A. Iwamae, T. Fujimoto, A. Komori, T. Morisaki, H. Suzuki, S. Masuzaki, Y. Hirooka, Y. Nakashima and O. Mitarai, Overview of Steady State Tokamak Plasma Experiments on TRIAM-1M, Proc. of 19<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference, IAEA-CN-94/OV/4-6, 2002.
19. Zushi, H, Itoh, S, Nakamura, K, Sakamoto, M, Hanada, K, Jotaki, E, Pan, YD, Hasegawa, M, Kawasaki, S, Nakashima, H, Steady state experiments on current profile control and long sustainment of high performance LHCD plasmas on the superconducting tokamak TRIAM-1M, *Nuclear Fusion*, **41**, No.10, 1483-1493, 2001.
20. Zushi, H, Itoh, S, Nakamura, K, Sakamoto, M, Hanada,

- K, Jotaki, E, Pan, YD, Hasegawa, M, Kawasaki, S, Nakashima, H., Steady State Experiments on High Performance , Current Profile Control and Long Sustainment of LHCD Plasmas on the Superconducting Tokamak TRIAM-1M, Proc. of 18<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference, Sorrento, IAEA-CN-77/OV5/3, 2000.
21. Zushi, H, Itoh, S, Sato, KN, Nakamura, K, Sakamoto, M, Hanada, K, Jotaki, E, Makino, K, Pan, YD, Kawasaki, S, Nakashima, H, Recent progress on TRIAM-1M, Nuclear Fusion, **40**, No.6,1183-1196, 2000.
  22. Zushi, H, Nakamura, K, Itoh, S, Sato, K, Sakamoto, M, Hanada, K, Jotaki, E, Makino, K, Kawasaki, S, Nakashima, H, High ion temperature discharge and its long sustainment in both limiter and single null configurations on TRIAM-1M, Nuclear Fusion, **39**, No.11Y, 1955-1963, 1999.
  23. Zushi, H, Hosotsubo, M, Wakatani, M, Self-organization mechanism of the pressure profile at the internal disruption in heliotron plasmas, Plasma Physics and Controlled Fusion, **40**, No.5, 779-784, 1998.
  24. H. Zushi, Y.Kurimoto, and the Heliotron E Group, Electric Field Induced Loss Cone Study by the Charge Exchange Energy Spectrum, Fusion Engineering and Design, **34-35**, 527-530, 1997.
  25. H. Zushi, Y. Suzuki, M. Hosotsubo, Y. Nakamura, M. Wakatani, F. Sano, K. Kondo, T. Mizuuchi, M. Nakasuga, S. Besshou, H. Okada, K. Nagasaki, C. Christou, Y. Kurimoto, H. Funaba, T. Hamada, T. Kinoshita, T. Obiki, S. Kado, K. Muraoka, S. Sudo, K. Ida, B.J. Peterson, V.Yu. Sergeev, K.V. Khlopenkov, V.V. Chechkin, V.S. Voitsenja, Resistivity Effects on the Critical Pressure Gradient for the Resistive Interchange Modes in Heliotron-E, Proc. of 16<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference, Montreal, Canada, IAEA-CN-64/CP-4, 1-7. 1996.
  26. H. Zushi, K. Nagasaki, T. Mizuuchi, K. Kondo, T. Nakayama, H. Takada, Y. Suzuki, A. Isayama, T.Obiki, T. Bigelow, M. Masanori, J. Lyon, A Study of Transition Phenomena Associated with Particle Transport Improvement in ECRH Plasmas on Heliotron E, Plasma Physics and Controlled Fusion, **36 A**, 231-236, 1994.
  27. H. Zushi, K. Nagasaki, T. Mizuuchi, K. Kondo, S. Besshou, H. Okada, F. Sano, B. Peterson, C. Christou, Y. Kurimoto, T. Nakayama, H. Takada, A. Sahara, H. Funaba, Y. Suzuki, T. Hamada, A. Isayama, T. Kinoshita, K. Yaguchi, S. Kobayashi, K. Sakamoto, M. Wakatani, T. Obiki and H-E Group, S. Sudo, M. Sato, K. Ida, M. Ima, S. Kado, K. Muraoka, T. Bigelow, M. Murakami, J. Lyon, Particle Transport Study of Electron Cyclotron Heated Plasmas in Heliotron-E, Proc. of 15<sup>th</sup> of Int. Conf on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Seville, **2**, IAEA-CN-60/A6/C-P-1, 1-6, 1994.
  28. H. Zushi, Y. Kurimoto, S. Taniguchi, F. Sano, M. Wakatani, S. Sudo, T. Mizuuchi, K. Hanatani, K. Kondo, H. Okada, K. Nagasaki, K. Yaguchi, T. Obiki, Resonant Loss and MHD Effects on Perpendicular Injected Fast Ions in Heliotron E, Proc. of the Fourteenth International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, **2**, 597-603.1993.
  29. H. Zushi and Heliotron E Group, Study of Resistive Interchange Modes in Heliotron E, Proc. of 1<sup>st</sup> Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion, **1**, 1990.
  30. H. Zushi, M. Sato, O. Motojima, S. Sudo, T. Mutoh, K. Kondo, H. Kaneko, T. Mizuuchi, H. Okada, Y. Takeiri, F. Sano, A. Iiyoshi, K. Uo, Heating and Confinement Studies of Electron Cyclotron Resonance Heated Plasmas in Heliotron-E, Nuclear Fusion, **28**, 1801-1812, 1988.
  31. H. Zushi, O. Motojima, H. Kaneko, M. Wakatani, A. Iiyoshi, K. Uo, Experimental Study of Current Driven Relaxation Oscillations in Heliotron E, Journal of Physics Society of Japan, Vol. **57**, 3009-3019, 1988.
  32. H. Zushi, T. Mizuuchi, O. Motojima, M. Wakatani, F. Sano, M. Sato A. Iiyoshi, K. Uo, Measurements of Edge Turbulence with Langmuir Probes in Currentless Heliotron E Plasmas, Nuclear Fusion, **28**, 433-441, 1988.
  33. H. Zushi, O. Motojima, M. Wakatani, F. Sano, S. Sudo, H. Kaneko, K. Kondo, T. Mizuuchi, K. Yaguchi, M. Sato, A. Iiyoshi, K. Uo, Density Fluctuations in Currentless High Beta Plasmas in Heliotron-E, Nuclear Fusion, **27**, 895-909, 1987.
  34. H. Zushi, O. Motojima, H. Kaneko, T. Mizuuchi, M. Wakatani, A. Iiyoshi, K. Uo,  $m=1/n-1$  Density Fluctuations in Currentless High-beta Plasma in Heliotron E, The Review of Scientific Instruments, **56**, 919-921, 1985.
  35. H. Zushi, M. Wakatani, K. Takeuchi, T. Mutoh, S. Sudo, M. Sato, S. Besshou, H. Kaneko, K. Kondo, T. Mizuuchi, O. Motojima, A. Iiyoshi, K. Uo, Transport Simulation of the Currentless ECRH Plasma in Heliotron-E, Nuclear Fusion **24**, 305-315,1984.
  36. H. Zushi, Electron Temperature and Density Measurement by the third harmonic Electron Cyclotron Emission from a Currentless Plasma, Kakuyugo Kenkyu,

- 49**, 245, 1983.
37. Zushi, H., Nakashima, Y., Noumi, Y., Kondo, K., Sudo, S., Mutoh, T., Motojima, O., Iiyoshi, A., Uo, K., Ion Energy Containment in Heliotron-E, *Nuclear Fusion*, **22**, 10, 1341-1348, 1982.
38. H. Zushi, Y. Nakashima, K. Kondo, A. Iiyoshi, K. Uo, Charge Exchange Neutral Particle Measurement in Heliotron E, *Journal of Physical Society of Japan*, **51**, 2673, 1982.