

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 4 月 20 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2012～2016

課題番号：24226020

研究課題名(和文)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

研究課題名(英文) Physics and macro control of particle circulation in a multi hierarchical complex-open system

研究代表者

関子 秀樹 (Zushi, Hideki)

九州大学・応用力学研究所・特命教授

研究者番号：20127096

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 154,800,000円

研究成果の概要(和文)：核融合炉の定常化に向けて“多階層複雑・開放系における粒子循環物理とマクロ制御”という観点で金属壁、境界(SOL)プラズマ、コアプラズマからなる入れ子状の複雑系における燃料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目的とした。1)電子サイクロトロン波による非誘導電流駆動(7万アンペア)、2)燃料注入に対する応答関数を用いた粒子循環制御法の開発、3) SOL領域のプラズマ揺らぎの可視化および燃料注入による自発プラズマ回転の反転と緩和の観測、4)温度制御可能(100-500度)な高温壁の導入による定常化(200度で最長6時間)と再堆積層を考慮した粒子循環のモデリングなどの成果をあげた。

研究成果の概要(英文)："Steady state operation(SSO)" is an indispensable prerequisite for fusion reactor. The present study is aimed at to clarify the fueled particle circulation in three systems, core, boundary, and first wall. Elementary processes, the system interaction, a circulation model, control of the particle circulation, long sustainment and influence of fueling on the intrinsic plasma flow are subjects to build the foundation for SSO. Thus "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. The following results has been achieved, 1) 70 kA non-inductive plasma current by radio-frequency waves, 2) application of the response function method to evaluate particle circulation, 3) intrinsic flow reversal in the core plasma by the fueling, and 4) steady tokamak operation for 6 hours by using the hot wall at 200 .

研究分野：プラズマ工学

キーワード：多階層 複雑・開放系 粒子循環 非誘導電流駆動 自発回転 定常トカマク

### 1. 研究開始当初の背景

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・実験を経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。燃料注入と燃焼制御、He 生成と燃焼維持、He 灰の排出などの核燃焼物理の理解と制御性の確認が予定されている。核融合炉が基幹エネルギー源としての役割を果たすには、“定常運転”が前提であるが、これまで世界中の大型核融合実験装置で 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。パルス運転では問題とならない燃料粒子の系内での循環制御が定常運転では第 1 議的な研究課題となるとの認識に基づき下記の研究課題と方法の導入を試みている。

### 2. 研究の目的

本研究では核融合炉を構成する 3 つの系 (炉心プラズマ CORE、周辺境界プラズマ SOL、第一壁 HW) における、燃料粒子循環の各系素過程と系間相互作用の解明、循環モデル、全系粒子循環制御により、炉の定常運転のための基礎物理の理解と工学手法の構築を目的としている。これらの粒子循環制御は正負の排気速度を示す金属壁と外部排気装置のために外部開放・複雑系を成している。この研究のために“多階層複雑・開放系における粒子循環物理とマクロ制御”という観点を導入し、3 つの系が入れ子状の複雑系を構成し、各々の系内の粒子循環と系間の相互干渉過程の解明が系全体の粒子循環マクロ制御の鍵であるという立場で研究を進めた。

### 3. 研究の方法

温度制御可能な第 1 壁(HW)をプラズマ実験装置 QUEST に設置し、100-500 °C で温度制御することにより壁での粒子循環時定数の短時間化と循環拘束化を試みる。HW は 2 ヶ年かけて整備し、3 つのステップ、1) HW (~100 °C)+パルス運転、2) HW(100 °C <温度制御無し)+連続運転、3)HW 温度制御

(300-500 °C) + 冷却系 + 連続運転、をへて放電管全系の熱収支を確認する。熱バランスのとれた系における粒子循環のもとで、壁温度に対する壁吸蔵・放出特性遷移、plasma 運転時間の長時間化や中性粒子密度の時間発展に伴う周辺境界プラズマにおける プラズマ塊(blob)粒子輸送特性の理解、燃料粒子注入とプラズマ運動量輸送、特に固有自発回転の駆動と回転方向への影響、等を明らかにする。これら 3 つの系の相互干渉性の定量化は HW 温度、放電時間、壁近傍の中性粒子束や空間分布の関数として指標化し、再堆積層を考慮した粒子循環モデル構築や、粒子注入を摂動と見なす粒子応答関数制御法の適用をはかる。さらに粒子輸送や運動量輸送を調べるために SOL/Core 部の揺動や速度場計測は高速カメラ、超多点計測により広域の 2 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循環モデルを構築する。

### 4. 研究成果

核融合炉の定常化に向けて“多階層複雑・開放系における粒子循環物理とマクロ制御”という観点で金属壁、境界プラズマ、コアプラズマ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・密度・流速分布に関わるマクロ構造形成・伝達過程とその制御性を調べた結果、以下の成果を得た。

1) 電子サイクロトロン波による非誘導電流駆動と定常維持、2) トカマク運転の定常運転と粒子循環制御法の開発、3) 温度制御可能な高温壁の導入による壁循環の拘束、4) SOL 領域のプラズマ揺らぎの特性と可視化および流れ計測、などを目標に成果をあげてきた。具体的には、高周波による駆動電流値として、最終目標である高周波パワー 1MW で駆動電流値 100kA の目標効率に対して、140kW で 70kA と 5 倍の効率での電流値を達成することができた。これは電子サイクロト

ン波第2高調波を用いた非軸上電流駆動としては**世界最高値**である。定常プラズマ維持に関しては、粒子注入周期帰還制御法の開発と循環レベル制御に加えて応答関数を元にした**粒子循環の定常性の予測**を可能にした。

研究期間後半に設置した高温壁を用いた壁温度による粒子循環の制御を試み、定常トカマク放電時間を820秒(壁温度100度2015)、6時間(壁温度200度2016)と着実に世界記録を更新した。粒子注入時にプラズマの自発回転方向がプラズマ電流順方向から逆方向に変転することを観測した。これはスカラー量の粒子注入がベクトル量である**プラズマ回転の方向に重要な寄与**を与えることを意味した発見である。

- の各成果の背景物理として新たに得た知見、方法、また大規模実験への適用・寄与に関しては以下の通りである。a)電子サイクロトロン第2高調波での電流立ち上げ・電流駆動を実証し、弱磁場化 ITER における適用可能性を示した事、b)粒子循環の定常予測性能を高めるための物理手法の開発とその背景素過程の理解のために、外部摂動と粒子循環の応答関数の決定、応答関数の時間発展や粒子循環確率密度分布を取得し、それらを利用した定常運転制御法を実証した事、c)世界で初めての試みである高温壁の導入による粒子制御を試み、再堆積層を考慮した粒子循環モデルにより粒子吸蔵・再放出過程の時間発展を定量的に再現したこと、d)分光Doppler法、Machプローブ法、高速カメラ流速計法を独自に開発し、単純トーラス配位、内側ヌル点トカマク配位、リミッター配位など様々な磁場配位で自発回転の発現条件を確認した。これらは特に運動量注入のない高周波プラズマで観測されたものである。とくに強力な粒子注入により回転方向の反転(逆プラズマ電流方向)と順方向への緩和を確認したこと。

## 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66件)

S.Banerjee, H.Zushi, N. Nishino, K. Hanada, S.K. Sharma, H. Honma, S. Tashima, T. Inoue, K. Nakamura, H. Idei, M. Hasegawa and A. Fujisawa, Statistical features of coherent structures at increasing magnetic field pitch investigated using fast imaging in QUEST, Nuclear Fusion, 52, 123016, 2013.

DOI.10.1088/0029-5515/52/12/123016

S.Tashima, H. Zushi, M. Isobe, K. Hanada, H. Idei, K.Nakamura, A.Fujisawa, K. Matsuoka, M. Hasegawa, Y. Nagashima, The Role of Energetic Electrons on Current Ramp-up and High Poloidal Beta Plasma Production in Non-inductive Current Drive on QUEST, Nuclear Fusion, 54, 023010, 2014.

DOI.10.1088/0029-5515/54/2/023010

K.Mishra, H.Zushi, H. Idei, M.Hasegawa, T.Onchi, S.Tashima, S.Banerjee, K.Hanada, H.Togashi, T.Yamaguchi, A.Ejiri, Y.Takase K.Nakamura, A.Fujisawa, Y.Nagashima, A.Kuzmin, Self organization of high p plasma equilibrium with an inboard poloidal magnetic field null in QUEST, Nuclear Fusion, 55, 083009, 2015.

DOI. 10.1088/0029-5515/55/8/083009

A. Kuzmin, H. Zushi, I. Takagi, S.K. Sharma, A. Rusinov, Y. Inoue, Y. Hirooka, H. Zhou, M. Kobayashi, M. Sakamoto, K.Hanada, N. Yoshida, K. Nakamura, A. Fujisawa, K. Matsuoka, H. Idei, Y.Nagashima, M. Hasegawa, T. Onchi, S. Banerjee, K. Mishra, Global gas balance and influence of atomic hydrogen irradiation on the wall inventory in steady-state operation of QUEST tokamak, Journal of Nuclear Materials, 463, 1087-1090, 2015.

DOI. 10.1016/j.jnucmat.2014.12.092

T.Onchi, H.Zushi, K.Mishra, Y. Mahira, K.Nagaoka, K.Hanada, H. Idei, M.Hasegawa, K.Nakamura, A.Fujisawa, Y.Nagashima, K.Matsuoka, S.Tashima, S.Banerjee, A. Kuzmin, S.Kawasaki, H.Nakashima, A.Higashijima, O.Watanabe, Heat flux and plasma flow in the far scrape off layer of inboard poloidal field null configuration in QUEST, Physics of Plasmas, 22, 082513, 2015.

DOI. 10.1063/1.4928878

〔学会発表〕(計130件)

H.Zushi, S.Tashima, M.Ishiguro, M.Hasegawa and the QUEST group, Non-inductive Current Start-up and Plasma Equilibrium with an Inboard Poloidal Field Null by Means of Electron Cyclotron Waves in QUEST, 24TH IAEA FUSION ENERGY CONFERENCE, 2012.10.8-13, San Diego, USA.

K.Mishra, H.Zushi, H.Idei, M.Hasegawa, K.Hanada, K.Nakamura, A.Fujisawa, Y.Nagashima, K.Matsuoka, T.Onchi, A.Kuzumin and QUEST Team, An analytical description of high  $p$  equilibrium with negative triangularity in QUEST, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014.3.27-30, 東海大学.

K.Mishra, H.Zushi, H.Idei, T.Onchi, M.Hasegawa, K.Hanada, ORIGIN AND EVOLUTION OF SPONTANEOUS ROTATION IN PLASMA UNDER DIFFERENT MAGNETIC FIELD GEOMETRY IN TOKAMAK QUEST, The 42nd IEEE International Conference on Plasma Science, 2015.5.24-28, Belek, Antalya, Turkey.

H.Zushi, A.Kuzmin, I.Takagi, S.K.Sharma, M.Hasegawa, M.Kobayashi, T.Mutoh, Y.Hirooka, K.Hanada, A.Fujisawa, H.Idei, K.Nakamura, Y.Nagashima, T.Onchi, K.Mishra, N.Yoshida, S.Kubo, Y.Ueda, T.Fujita, S.Ide, N.Ohno, A.Hatayama, A.Ejiri, T.Yamaguchi, H.Togashi, Y.Takase, A.Fukuyama, O.Mitarai, Response function and Statistical approach for particle circulation on QUEST, 8th IAEA Technical Meeting on Steady State Operations of Magnetic Fusion Devices, 2015.5.26-29, 奈良.

関子秀樹, Kishore Mishra, 四竈泰一, 永島芳彦, 花田和明, 恩地拓己, 出射浩, 長谷川真, 藤澤彰英, 中村一男, QUEST team, 単純 toroidal 磁化 plasma 配位におけるトロイダル流反転結果と drift-fluid model による解析, 日本物理学会 72 回年次大会, 2017.3.17-20, 大阪大学.

〔図書〕(計 1 件)

T.Tanabe, Y.Nakao, T.Yamanishi, M.Hara, H.Zushi, Y.Hatano, K.Isobe, H.Matsuura, K.Katayama, K.Noborio, Springer, Tritium: Fuel of Fusion Reactors, 2017, 165-205.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)  
取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.triam.kyushu-u.ac.jp/QUEST\\_HP/gaibu.html](http://www.triam.kyushu-u.ac.jp/QUEST_HP/gaibu.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

関子 秀樹 (ZUSHI, Hideki)  
九州大学・応用力学研究所・特命教授  
研究者番号: 20127096

(2) 研究分担者

花田 和明 (HANADA, Kazuaki)  
九州大学・応用力学研究所・教授  
研究者番号: 30222219

藤澤 彰英 (FUJISAWA, Akihide)  
九州大学・応用力学研究所・教授  
研究者番号: 60222262

出射 浩 (IDEI, Hiroshi)  
九州大学・応用力学研究所・教授  
研究者番号: 70260049

永島 芳彦 (NAGASHIMA, Yoshihiko)  
九州大学・応用力学研究所・准教授  
研究者番号: 90390632

(3) 連携研究者

高瀬 雄一 (TAKASE, Yuichi)  
東京大学大学院・新領域創成科学研究科・教授  
研究者番号: 70292828

福山 淳 (FUKUYAMA, Atsushi)  
京都大学大学院・工学研究科・教授  
研究者番号: 60116499

(4) 研究協力者

小野 雅之 (ONO, Masayuki)  
Sanjeev Sharma  
Rusinov Aleksandr  
Banajee Santanu  
恩地 拓己 (ONCHI, Takumi)  
Kuzmin Arseniy