

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔研究進捗評価用〕

平成24年度採択分  
平成27年2月27日現在

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

課題番号：24226020

図子 秀樹（ZUSHI HIDEKI）

九州大学・応用力学研究所・教授



研究の概要

核融合炉の定常運転では、燃料循環制御が不可欠である。外部システムと連結した炉心・境界・壁の階層構造における燃料粒子の循環を、系内・系間・外部との相互作用を取り込んだ多階層モデル化することにより、安定制御を狙う。系内素過程の応答関数や相互作用の確率密度分布関数の時間発展としてモデル方程式を構築し、循環制御の実証を行う。

研究分野：工学 総合工学 核融合学

キーワード：プラズマ・壁相互作用、核融合炉の定常運転、多階層複雑・開放系

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燃焼制御、He 生成とそれに基づく燃焼維持、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。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、“定常運転”が前提である。しかし ITER でも 400 秒間の運転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。

2. 研究の目的

外部からの燃料供給や外部への灰排気を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る。そのために入れ子状の多階層構造を持つ開放・複雑系として新たに問題を設定している。

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・制御するかという問題に取り組む。

3. 研究の方法

各系の複雑性の起源・特徴を定義し、研究方法・対象・課題を設定する。

**(a)閉磁気面複雑系**：閉じた磁気容器を形成している領域であり、複雑性の根源として物理量空間勾配・速度空間勾配にもとづく乱流場に支配された領域。他の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が研究対象。

**(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。径方向、沿磁力方向ともに輸送が大きい。粒子供給に対する(a)系との相互伝達速度と緩和過程の同定、および(c)へ入射束乱流化が課題。さらに電子・イオンの運動量輸送変化を対象とする。

**(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。

**複雑系の階層構造による相互相関・干渉**を明らかにするために、まず WALL 温度制御により壁での粒子循環時定数の短時間化と循環の拘束化を試みる。この条件下で3つの系の相互干渉性を、粒子注入に対する応答関数の温度、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決定し、多点計測により多次元データとして取得する。

#### 4. これまでの成果

3つの系の複雑性を特徴づける成果を記す。

##### 1. プラズマ電流駆動と平衡配位

サイクロトロン第2高調波を用いて世界初の駆動電流値 66kA の達成、アスペクト比=1.4の球状トカマク配位の実現、自発ダイバーター配位形成と維持機構の解明に成功した。配位形成に関するポロイダルベータ値の閾値を明らかにしたこと、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。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いだしている。

##### 2. 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径方向輸送が特徴であり、高速カメライメージにより”偶然力”の可視化とその統計確率法則の時空間構造解明に取り組んだ。揺らぎの4次、3次モーメント間の2次関係の空間構造、drift 波から乱流場への発達過程、ガンマ型確率密度分布関数など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。

##### 3. 粒子収支と循環モデリング

球状トカマク運転の世界記録である 820秒の定常運転を実現し、粒子収支を調べるための新手法、a) 摂動インパルス法を世界で初めて適用した素過程応答関数の決定、b) 循環寿命の確率密度分布の決定と時間発展の観測、に成功した。吸蔵・放出現象を金属表面に共堆積層が存在し、捕捉サイトのあるモデル方程式を開発し、照射試料からの脱離スペクトルと比較し良い一致をみている。

##### 粒子供給に対する応答の階層性と系間相互相関・干渉性に関する成果

粒子供給による CORE-SOL の急激な密度上昇と異なる減衰時間から、WALL 放出粒子の SOL への粒子逆流を確認した。世界で初

めて粒子循環の動特性の側面を応答関数の低周波成分の成長や寿命確率分布の長寿化への歪度指数で定量的に解明した。

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）を通じて、定常運転に影響する事を発見した。

#### 5. 今後の計画

高温壁を用いた熱バランスのとれた複雑系における、①壁温度・温度摂動に対する素過程応答関数とその時間発展、②”SOL-中性ガス圧乱流”確率密度分布による時間発展物理モデル、③粒子循環・自発回転の連動制御方法論の提案 に取り組む。得られた知見を活用し全系での粒子循環モデルを構築する。

#### 6. これまでの発表論文等

##### 【発表論文】

- H. Zushi, et al., Determination of the system function for the particle circulation process using perturbation technique in QUEST, Fusion Energy Conference (FEC 2014), EX/P1-36, 2014.
- H. Idei, et.al, “Fully Non - Inductive Current Drive Experiments Using 28GHz and 8.2GHz Electron Cyclotron Waves in QUEST”, *ibid*, EX/P1-38, 2014.
- K. Mishra, et.al., “Self Organization of High  $\beta_p$  Plasma Equilibrium with an Inboard Poloidal Null Sustained by Fully Non-inductive Current Drive in QUEST”, *ibid*, EX/P1-39, 2014.
- K. Hanada, et. al., “Investigation of progression from low to high hydrogen recycling during long duration discharges on a spherical tokamak, QUEST”, *ibid*, EX/P1-37, (8p) 2014.
- Banerjee, S. et. al., “Role of stochasticity in turbulence and convective intermittent transport at the scrape off layer of Ohmic plasma in QUEST”, *PHYSICS OF PLASMAS*, **21**,072311, 2014.

##### 【受賞】

- 永島芳彦：平成24年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学賞

##### URL:

<http://www.triam.kyushu-u.ac.jp/QUEST-PJ>