

2021年8月23日

ユニットテーマ提案書

1. ユニットテーマ

非平衡交差輸送

2. 提案者（氏名・所属）

本島巖(NIFS)、田村直樹(NIFS)、井戸毅（九大応力研）

3. テーマと研究内容の概要

【テーマの意味】「非平衡交差輸送」は、非平衡統計力学の基本的かつ未解明の研究課題であるとともに、核融合炉における喫緊の課題となっている核融合炉内粒子循環制御の突破口となる可能性があることから、核融合科学に立脚して学術の地平を切り拓く今後の核融合科学研究所が掲げるべき研究テーマにふさわしいと考える。ここで言う非平衡交差輸送とは、一般的に言う複数の勾配が駆動・結合している非平衡クロス効果と同義であるが、一方通行である循環の流れを非平衡な流れ（輸送）と捉え、それを交差輸送によって駆動するという意味も含まれている。またここで強調したいのは、本テーマでは交差輸送として、例えばプラズマと中性粒子の場合、中性粒子によるプラズマの制御（ミクロ）と中性ガスによる粒子循環の制御（マクロ）、それぞれを俯瞰的視点で交差させながら研究展開を図ろうとしている点である。これまで多階層・複雑系である核融合炉内で発生する様々な現象について、要素還元主義に基づいて多くの研究が進められてきた。これにより、炉心プラズマ内やプラズマ・物質相互作用において様々な物理機構が解明されたことから、要素還元主義は他の自然科学に対してと同様に、核融合研究の発展に大きく寄与したと言える。しかし、既に他の自然科学の分野では、時空間的に多階層であるシステム全体の記述には、自己組織化構造など還元不可能な特性の理解が不可欠であるとして、P. Anderson 氏の“More is different”やホーリズム（俯瞰統合主義）に代表されるような、要素還元主義からの脱却を目指した様々な取り組みが行われている。このような研究の潮流を見れば、本質的に多階層・複雑系である核融合炉内の粒子循環に潜む学理探求のためには、要素還元主義からの脱却が必要なのは明らかである。

【具体的な研究課題】 1) 多階層複雑系である核融合炉内粒子循環を効果的かつ効率的に制御するためには、粒子循環の主たる駆動力である粒子輸送を詳細に理解しておく必要がある。粒子輸送は主に粒子の濃度勾配に依存するが、温度勾配により粒子輸送が駆動されるソレー効果のような非共役的な力と流れの関係である交差輸送（これは、核融合プラズマ研究では輸送行列における非対角項輸送と呼ぶ）の寄与も考えられる。ここでは、平衡から大きく外れた系における交差輸送のミクロな機序解明とマクロな影響解明を具体的な研究課題とする。 2) 多階層複雑系である核融合炉内粒子循環をより小さく、かつ異なる応答時定数を持つ俯瞰的なサブシステムからなる統合体と考えると、最適な制御点（ボトルネック）は最も長い応答時定数を持つサブシステムにあると考えられる。ここでは、このクリティカルサブシステムの同定とそのクリティカルサブシステムにおける「揺らぎ」がシステム全体にもたらす影響（ロバスト性）の解明を具体的な研究課題とする。以上の他、異相（例えば、中

性粒子と荷電粒子) 間交差輸送の機序解明や循環制御への応用(例えば、中性粒子流れや電磁場による制御)研究なども考えられる。

【10年間のプロジェクトで達成する目標】1) 遠非平衡・開放系における粒子輸送の機序を解明する。2) 粒子輸送に潜む交差輸送の機序を粒子循環の制御に利用するための応用手法を構築する。3) 核融合炉内粒子循環のボトルネックとなるサブシステムの同定とそれを効果的かつ効率的に制御するための手法を提案し、構築する。

【予測される成果の学術的な意義】本ユニットテーマが目指しているのは、核融合炉内粒子循環の機序解明とその制御手法獲得であるが、そのために構築される知的基盤は他の自然科学分野との共通語で水平展開できるものであり、学術的な意義は深いと言える。

4. 位置づけ

【研究課題の背景】3. **テーマと研究内容の概要**でもある程度述べたように、本テーマで取り扱う研究課題は、実施する研究手法も含めて喫緊の課題となっている。これらの課題を取り込み、解決して「循環の制御」を行うためには、一方向の流れを駆動・制御しなければならず、それは「非平衡交差輸送」そのものである。すなわち「非平衡交差輸送」は、本ユニットテーマを一言で表現する、特徴をもったものである。また、要素還元主義からの脱却を目指した本ユニットテーマは、現在進行中のパラダイムシフトを加速させる挑戦的かつ独創的なテーマであると言える。異相間相互作用、あるいは何らかの制御を掲げているテーマとはアナロジーを有しているが、本ユニットテーマは、それぞれの多様な研究課題を包摂することができる骨太の概念を持ち出しており、ユニットとして優位性を持つ。

5. 研究の方法

データ同化、同位体トレーサー、現有シミュレーション手法の両面的かつ段階的拡張による多階層シミュレーション手法の構築、シミュレーション支援による統合的計測 (synthetic diagnostics) 必要とする装置：

常伝導 LHD、QUEST、JT-60SA、W7-X、TESPEL、TPD-II、CDPS (大洗センター Compact Divertor Plasma Simulator)、ヘリオトロン J、水素透過装置、プラズマガン、気体分離 R&D 装置、LHD 真空排気系、LHD-HIBP

6. 自己評価

1) **未来志向であること** 本テーマでは、将来の核融合炉において必要となる知的基盤の構築を目指しており、また核融合炉というプラットホームを使った物理学における未解明の問題に取り組んでもおり、未来志向と言える。

2) **目標を具体的に示していること** 俯瞰的視野に立ち、粒子循環を左右しうるクリティカルポイントに焦点を絞った研究展開を検討しており、目標を具体的に示していると考えられる。

3) **10年後に学术界に輝くテーマに育つこと** 多階層・複雑系の包括的研究は、要素還元主義からのパラダイムシフトを促進し、今後より発展が期待できる学術的テーマと考えられる。

4) **多様な「個人のテーマ」を包摂できること** 粒子輸送の詳細機序解明研究や粒子循環サブシステムに関する各研究は、コアプラズマから周辺プラズマ、プラズマ・固体相互作用に至るまで様々な研究テーマ、即ち「個人のテーマ」を包摂しうる。