

ユニットテーマ提案書

1. テーマ名

構造形成・持続性 Structure formation and sustainability

2. 核融合科学としての課題

閉じ込め改善と定常維持 (■L-H 遷移, ITB 形成と維持 ■非熱的粒子の輸送・バースト的損失
■MHD 崩壊現象 ■粒子バランス, 不純物輸送, ダイバータ配位 ■磁場配位の設計・最適化)

3. 学術的な特徴づけ (なんの研究だと言えるか)

核融合科学の目標の一つは、物質・エネルギー・運動量の流れの中に置かれた非平衡開放系である磁場閉じ込めプラズマを高温・高密度で維持するための、効率的な方法を確認することにある。物理機構や時空間スケールの異なる多様な散逸過程が存在する磁場閉じ込めプラズマは、電磁流体、乱流、分布形成など様々なスケール・階層において自律的に構造形成・自己組織化し、維持された“自己閉じ込め”的な構造へ到達し得ることがわかってきている。本テーマは、プラズマにおける散逸過程に対して磁場を通じて課される実効的な次元性、対称性、トポロジー等が構造形成に対する一種の束縛条件として働くことに着目し、磁場の3次元構造や外部からのエネルギー・運動量注入の制御を通じて、非平衡開放系における構造形成の起源および構造の分岐や持続性を支配する本質的な物理機構を研究する。

4. 定式化・アプローチ

核融合科学の未解決課題を物質・エネルギー・運動量の流れの中における構造の形成と持続性の物理の問題として引き受け、閉じ込め改善現象の物理解明と定常維持手法の体系化、および核燃焼プラズマ閉じ込め配位の研究に取り組む。散逸に伴う自律的な構造形成はエントロピー生成と矛盾せずに生じる必要があり、構造の維持はエントロピーの流出入と生成率とのバランスの必要性を意味する。また、エントロピー生成率は熱力学的には流束と勾配の積であり、これらに関係付けるインピーダンス(輸送係数)が非線形性を持つ場合にはプラズマにおける閉じ込め遷移のような遷移や分岐が生じる。このことを踏まえ、輸送係数の非線形性と磁場構造の関係を体系的に明らかにすること、およびエントロピー生成率最大原理・最小原理、またそれらを包括する拡張された原理等の普遍的原理の適用・検証を通じて、ある種のポテンシャル関数の停留点としてプラズマの定常構造を理解すること、を試みる。これらを実現するために、実験と理論シミュレーションの協働によって以下の研究を展開し、構造形成の駆動源であるエネルギーの吸収とその緩和過程、力学的平衡構造の安定性、巨視的な分布や流れ場の遷移と分岐といった専門的分野の研究およびその統合を行う。

プラズマ実験：“無電流トカマク”である準軸対称(QAS)配位をはじめとする多様な磁場配位の装置を用いた実験により、磁場の対称性や、磁場構造による共鳴粒子分布の違い、平均的な流れ場等がプラズマの構造形成に与える影響を体系化するとともに、構造形成の駆動源であるエネルギーの吸収と伝達の効率への影響を明らかにする。温度密度計測に加えて、HIBP 計測と先進的な高速イオン速度分布計測を用いて、密度揺動、径電場、非熱的粒子分布の時間変化を同時計測することで、自

律的な閉じ込め改善や分岐現象の背後にあると考えられる複数の物理機構（プラズマ回転/帯状流/プラズマ電流/共鳴粒子/粘性の非線形性 etc.）の役割とそれらの非線形な相互作用の研究を行う。
理論シミュレーション・統合コード：運動論的效果，プラズマ回転，運動量・粒子バランスを記述可能な統合コードを開発し，磁場の非対称性に起因する粘性やトルクの効果を含めた放電全体にわたる輸送シミュレーションを実現し，異常粘性，非局所輸送等のモデル化・検証を行う。複数の物理現象を跨いだ複雑なフィードバック機構を取り入れて輸送時間スケールの構造形成の物理機構を明らかにするとともに，定常構造の大域的な決定機構を説明する原理（エントロピー生成率やその alternative)の数理的検証を行う。また，崩壊現象や強い流れにおける二流体的効果といった MHD 現象や複数イオン種輸送の磁場構造への依存性およびエントロピー生成との関係を研究する。

自己組織化現象の活用：磁場構造を通じて課される束縛を通じて，閉じ込め遷移や不純物吐き出しといったプラズマの自己組織化現象を制御し，核燃焼プラズマの高効率定常閉じ込めを実現する閉じ込め配位の創出に取り組む。局所的な対称化と真空 q_{\min} 面の形成による電子系乱流のエネルギー逆カスケード促進の組合せ等，新概念を積極的に検証し，外部資金獲得による原理実証装置での実験検証を目指す。自己組織化による閉じ込め改善を利用したステラレータ炉の設計活動を行う。

他ユニットとの連携：階層間の結合や階層性が消失するような現象の理解（ダイナミクス），構造形成・崩壊における因果推定（計測・データ），位相空間構造（乱流），高速イオン-MHD-乱流連結（シミュレーション），プラズマ-壁相互作用（異相，素過程），不純物イオン計測（プラズマ量子過程），真空・加熱装置（装置学），炉工学的考察（炉システム）等での連携を想定する。

学術的展開

特定の系によらない具体的な原理を探究しその検証を行うことで，生命科学や地球環境等の他分野との議論が可能となり，また，非平衡開放系一般の構造形成，維持・遷移・崩壊に関する分野を問わない理解が得られる。海洋循環や生態系，経済ネットワーク等においても検証・適用が行われてきているエントロピー生成最大原理など，共通の枠組みでの議論の土壌がある程度できている。地球温暖化においては，エントロピーバランスの変化が気候状態の急激な遷移を引き起こすことも懸念され，物質・エネルギー循環の大域的な構造が決定される機構の理解は喫緊の課題であり，相当の波及効果が予想される。代謝する生物とその進化の方向，地球の物質・エネルギー循環，社会といった複雑な秩序構造の持続あるいは遷移・崩壊の統一的な理解に寄与できる可能性がある。

独自性・優位性

磁場閉じ込めプラズマは異なる条件（磁場構造，熱・粒子供給，壁条件 etc.）で繰り返し実験が可能という点で，他の複雑系と比べて詳細な検証が可能である。QAS 配位での実験は世界初のものであり，これを主導し成果発信することはトカマク系含めコミュニティ全体にインパクトを持つ。磁場による束縛の下でのエントロピー生成過程という観点からプラズマの構造形成を理解し，既存の閉じ込め概念にとらわれずに閉じ込め配位設計への応用を追求するという点で，他の研究グループとは異なる独自のアプローチと言える。NIFS は非軸対称磁場を取り扱うシミュレーションコード群とノウハウを有しているだけでなく，磁場配位および装置設計のための独自ツールの整備も大いに進展しており，装置の具体形を設計・提案することが可能であり，優位性を持つ。