

ユニットテーマ提案書

1. テーマ名

3次元構造形成制御 3-D structure-formation control

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)

核融合研究の目標の一つは、物質・エネルギー・運動量・エントロピーの流出入に加えて、散逸によるエントロピー生成が釣り合った状態で高温プラズマを維持するための、信頼できる方法を確立することにある。プラズマにおける散逸には物理機構やスケールの異なる多様な経路および束縛が存在し、このことがプラズマを様々な階層の秩序立った構造に自己組織化させ、“自己閉じ込め”的な、エネルギーの流れの中で維持された遠非平衡状態へ到達させ得ることがわかってきた。本テーマでは、磁化プラズマにおけるエントロピー生成の多様化と構造形成の関係を支配する磁場構造を制御ノブとして考え、プラズマにとっての実効的な次元性、対称性、トポロジーといった束縛と、自己組織化されたプラズマの定常状態との間の関係を研究する。システム全体としての最適性を停留点として規定する普遍的な量を、エントロピー生成最小/最大原理といった既存の仮説に捉われずに定式化する。これらを通じて、非平衡開放系がいかにして乱雑化を免れて複雑・多様化し、高度な秩序を維持しうるのか、何がエントロピーを担うのか、といった問題に取り組む。

4. 定式化・アプローチ

プラズマの定常閉じ込めの基盤である熱エネルギーの閉じ込めを、エントロピー生成率を通して定式化すると、マクロなエントロピー生成率は流れ(束)と力(勾配)の積であり、これらはインピーダンス(輸送係数)で関係づけられ、インピーダンスの非線形性が閉じ込め改善のような分岐解をもたらす。インピーダンスの非線形性の背後には、エントロピー生成を担う経路や物理的実体の多様化と競合をもたらす自己組織化プロセスが存在し、この多様性の起源は、マクロに見れば、エネルギー原理やエントロピー最大原理に対して次元性や対称性、トポロジーを通じた束縛が課されることにある。異なる磁場配位におけるプラズマ実験と理論研究を通じて、3次元磁場構造を制御ノブとして、システムにおけるエントロピーの生成物理を明らかにするとともに、マクロ構造とミクロ機構が支え合う定常系の原理としての汎化を試みる。システムの安定な定常解を停留点とする普遍的な量を、エントロピー生成率を母関数として用いる定式化によって探求し、駆動源の上下流を自律調節する系へ拡張する。これにより、非平衡系一般に適用できる原理としての定式化を目指す。

プラズマ実験：“無電流トカマク”である準軸対称(QAS)配位装置等を用いた実験では、磁場の対称性や、磁場構造による共鳴粒子分布の制御、外部からのフロー駆動等をノブとして、構造形成への影響を研究する。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、高速イオン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現象の

2 ページ以内で記述し、10.5pt・行間1行を使用してください。青字の注意書きは削除してください。

背後にある複数の物理機構（例.プラズマ回転/帯状流/共鳴粒子 etc.）の役割の切り分けや、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：運動論的効果，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，輸送時間スケールの構造形成と，エントロピーバランスを明らかにする。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輸送シミュレーションを可能とし，インピーダンスの背後にある，複数の物理現象を跨いだ複雑なフィードバック機構と構造形成の関係を物理的に明らかにするとともに，大域的な構造形成を説明する原理（エントロピー生成率やその alternative)の検証を行う。また，未解決問題である MHD 安定性や，異常粘性，非局所輸送等のモデル化・検証も行う。さらに，散逸過程の多様性・競合性がいかんして安定な構造を作るのか，また，階層間の相互作用を定式化する理論研究を実施する。

自己組織化現象の活用：磁場構造がもたらす実効的な次元性・対称性・トロポロジーといった束縛を通じて，非平衡プラズマの「自然な閉じ込め状態」を制御し，自己組織化を活用した核燃焼プラズマの高効率定常閉じ込めを実現する配位を創出する。局所的な対称化，真空 q_{\min} 面の形成（電子系乱流のエネルギー逆カスケード促進）等を検証し，外部資金獲得による原理実証装置の製作・実験検証を目指す。また，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）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，その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。磁場構造によるエントロピー生成の束縛と多様化という観点から維持されたプラズマの構造形成を理解し，自己組織化を活用した定常閉じ込めを追求するという点で，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。