

ユニット構築提案書 (■新規・□再提案)

1. ユニット仮称

プラズマフローと構造形成研究 (仮)

2. ユニットテーマ

プラズマ中での非線形な構造形成はなぜ起こるか、遷移が起こるとなぜその構造になるのか (その構造に落ち着くのか) をフローの観点で研究をする。(要検討、文章ではなく箇条書きが良い気がする)

3. 共同提案者

・所内および所外の共同提案者の氏名と所属 (略称可) を記載してください。

例：氏名 (NIFS)、氏名 (NIFS)、氏名 (京大)

・ユニットテーマを共同提案するメンバーを記載してください。人数は問いませんが、他のユニットテーマとのメンバーの重複は無いようにしてください。ただし、最終的な所属を決めるものではありません。また、所外メンバーについては、ユニットテーマを議論するにあたり必須なメンバーを記載してください。

高橋裕己 (NIFS)、清水昭博 (NIFS)、吉村泰夫 (NIFS)

4. 研究概要

・図表の使用も可能です。

・核融合科学研究所の新しい研究ユニットとして何を目指すかを明示しながら、ユニットテーマに取り組むために実施する研究の概要を研究課題の具体例などを挙げながら説明してください。

・下記の観点から、ユニットテーマの自己評価を記述してください。

1. 未来志向であること (後追いでない)
2. 目標を具体的に示していること (永遠のテーマでない)
3. 10 年後に学术界に輝くテーマに育つこと (月並みでない)
4. 多様な「個人のテーマ」を包摂できること (独りよがりでない)

本ユニットでは磁場閉じ込め核融合プラズマ研究の最重要課題の一つである、プラズマのフロー形成と構造形成メカニズムを明らかにすることを目的とした研究を展開する。

1. 未来志向であること (後追いでない)

磁場閉じ込め核融合プラズマ研究において、電場やフロー、及び、それらのシアがプラズマの閉じ込めや安定性に大きな影響を与えることが分かっている。フロー形成と閉じ込め改善のメカニズム解明を目的として、これまでに優れた研究が理論・実験の両面から展開されているが、どのような

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(フォントは自由)。下記の赤字の注意書きは削除してください。

条件を満たすことで遷移が起こるのかは、1982 年に ASDEX で H モードが発見されて以来、依然として未解明の研究課題であり続けている。また、閉じ込め改善の度合いは、将来の核融合炉の実現性、コスト評価に大きく影響するため、閉じ込め改善モードへの遷移が起こった後に、どのような構造を伴ったプラズマが形成されるのかは極めて重要な研究課題である。トカマク・ヘリカルにとらわれない研究という題目はこれまでもあったが、本研究では、本当の意味で磁場の対称性をトカマク-ヘリカルの間で制御できる世界初の実機となる QAS をプラットフォームとして、世界最高レベルの S/N を持つ重イオンビームプローブによる電場計測や、この時代において自然科学の研究に適用され始めたデータ駆動手法(**ユニット構想#4: データ駆動核融合研究 (横山雅之さん)と連携**)、先進的な計測シミュレータ(**ユニット構想#1: 定量プラズマ乱流輸送物理の創設 (小林達哉さん)と連携**)などを活用して、フローと構造形成という観点で、核融合プラズマの最重要課題に対して取り組むものである。

2. 目標を具体的に示していること (永遠のテーマでない)

以下は個人的な興味で閉じ込めの遷移のみにフォーカス。ユニットテーマとして『フローと構造形成』を掲げるなら、よりスペクトルを広げた書きぶりをする必要があるのでは？

閉じ込め遷移がなぜ起こるのかは明らかになっていない。入力加熱量や、その結果としての電場、フローが大きくなると遷移が起こる。このように電場やフローは遷移の要因となるが、一方、閉じ込め遷移とフロー形成はしばしば鶏と卵の関係と呼ばれており、遷移が起こると大きなフローが形成されるなど、非線形な関係にある。

- ・ 構造形成のダイナミズムのもとになっているのは、ローカル量の勾配。

プラズマへの加熱入力

-> プラズマ中のスカラー量・ベクトル量の線形な変化

-> あるところまで変化が起こると、それらが非線形に変化 (遷移)

-> あるところ (閾値)は何で決まるのか？

- ・ どのような条件を満たせば閉じ込めの遷移が起こるのかに決着をつける。
- ・ 何がどうなると遷移が起こるのか -> 遷移閾値を決める key parameter(s)は何か。
- ・ それをフォーミュレートし、物理的な解釈を示す。
- ・ 遷移閾値のパラメータ依存性が解明できれば制御にも有用。
- ・ プラズマは極めて多くのパラメータがあるので、フォーミュレーションのしっほをつかむのも難しい。そのために、データ駆動科学を適用し、遷移が起こるときのさまざまなパラメータの依存性を得ながらモデリング・フォーミュレーションにつなげていく。
- ・ 遷移が起こった後の閉じ込め状態・プラズマ分布が、なぜそのようなになっているのか (なぜ、その状態がエントロピー極大 (ポテンシャル極小、居心地の良い状態) になるのか)。

3. 10 年後に学术界に輝くテーマに育つこと (月並みでない)

核融合プラズマの強みを活かすことで得られるアウトカムを一般化につなげることができれば学术界に大きなインパクトを与えることができる。ユニット構想#7: 制御可能な複雑系に潜む普遍性・特異性の探究 (沼波政倫)と連携し、一般化への展開をはかる。

(以下、沼波さんのアイデアを援用) 自然界にはさまざまな構造形成が見られる。物理・化学の分野は言うに及ばず、生物学の分野でも広くみられる。例えば、渡り鳥の群れが V 字型になって飛行するなど。構造形成の基本は集団が特定の分布を持つことである。また、ただ集団であるだけではなく、特定の構造が形成されるためには何かのきっかけ(閾値)があるはずである。鳥の V 字型飛行は数羽集まっただけでは形成されないし、ランダムに飛ぶかもしれない。こういった現象は現象論的な説明はされているが、実験的アプローチで再現性を求めることは不可能であるため、何がきっかけとなって構造が形成されるのかを調べることは困難である。太陽フレアの発生機構も一種のアナロジーだが、周期的な特徴を調べるためには長い時間をかけることで観測することはできるが、現象を制御することはできない。

一方で、プラズマ研究では第一原理がわかっている。実験的なアプローチとしてもプラズマというコレクティブな集団の中で、構造形成ダイナミズムのもととなるフローや閉じ込め磁場を制御でき、また、高精度で集団の中身を調べることができる。再現性を得ることも容易である。これがプラズマ実験としての本研究の大きな強みである。さらに、磁場の次元の制御は、環境の自由度の制御である。すなわち、本ユニットテーマの研究では環境の自由度を能動的に制御することが可能であり、それが変わったときにそれがフローや形成される構造にどのような影響を与えるのか、あるいは、与えないのかを調べることができる利点がある。

自然界に存在する構造形成とのアナロジーにおいて、何がそのアナロジーの原因になっているのかをプラズマ研究ならではの強みを活かして研究し、その普遍原理を見つけることができれば自然科学分野全般に対して大きなインパクトを与える。また、揺らぎなどの何かの契機が構造を作るところを突き詰めると、プラズマ、鳥の群れなどの自然科学にとどまらず、消費者心理・パニック心理などの集団心理や人流形成といった、人の行動原理を研究する学問(心理学、社会科学)など、幅広い分野への波及が見込まれる。

4. 多様な「個人のテーマ」を包摂できること (独りよがりでない)

本ユニットでは多角的な観点でプラズマのフローと構造形成にアプローチする。閉じ込め改善モードへの遷移とフローの関係、外部アクチュエータによるフロー駆動のメカニズム、磁場の三次元性に起因するマルチ遷移、磁場の対称性のフロー形成への影響、磁場トポロジーとフローの関係、高マッハ数でのショック、乱流とゾーナルフローなど、極めて広範な物理トピックを包摂する。また、プラズマ自身を対象とした実験・理論研究だけではなく、配位最適化研究や、そのフィージビリティ研究など、モデリングや工学研究も包摂する。

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(フォントは自由)。下記の赤字の注意書きは削除してください。

このように、すそ野の広い研究展開が可能であり、また、特徴的な機能を有し小回りの利く中型装置を実験プラットフォームとして活用することで、実験者にとって装置全体を俯瞰する視点の涵養が期待できるため、若手研究者や学生の教育にも適する。以上より、本ユニットが掲げるテーマは、学術機関、教育機関、大学共同利用機関である NIFS の在り方に適合する。

5. 国際的競争力など、ユニットテーマの個性に合わせた観点からの自己評価

磁場配位最適化研究の国際潮流など。世界初の QAS 装置である CFQS を活用し、磁場閉じ込め核融合プラズマにおける、閉じ込め形式を問わず共通する重要課題に取り組む先進的な研究を展開。データ駆動、計測シミュレータなどの最新の知見や技術も活用。

5. 研究手法

・**ユニットテーマに取り組むために必要となる施設・装置、研究環境を簡単に列記してください。**

本ユニットテーマ研究を実施するために、対象とする装置に求める最重要の機能はフローを広範囲に能動的に制御できることである。そのため、準軸対称ヘリカル装置 CFQS を主プラットフォームと想定する。CFQS は世界で初となる QAS 装置であり、コイル電流の組み合わせを制御することで、実効磁場リップルを通常のヘリカル装置レベルからトカマクレベルまで変化させることが可能である。単一の装置で磁場構造とそれに伴って形成されるプラズマフローを大きく変えられることは重要な特性である。すなわち、装置間比較研究では、プラズマと壁の距離や、リミター配位、ダイバータ配位の違い、電離度の違い、衝突周波数領域の違い、使用している加熱手段の違い、使用できる計測器の違いなどで、大きなアンビギュイティが生じるため、単一の装置で幅広いプラズマを対象にして研究できるのは極めて大きなメリットである。一方で閉じ込め方式の異なる装置での結果を、理論やモデルで統一的に説明できるかどうかの検証は、プラズマ中のフローと構造形成のメカニズムを一般化する上で重要である。このため、PLATO や Heliotron J、HSX や TJ-II 装置などの、国内外の小型・中型装置と連携し、それぞれの装置の機能や特徴を活かした実験を行い、装置間比較研究を展開する。さらに、このような小型・中型装置での原理検証研究と並行し、JT60-SA や W7-X などの大型トカマク・大型ステラレータ装置で並行して実験・理論研究を行う。

磁場配位最適化は国際的にも大きな潮流となっており、その中で、本ユニットでは対称性を持った先進ヘリカル配位 QAS の世界初の実機である CFQS をプラットフォームとして、フローと構造形成についての発展的な実証実験を行いつつ、さらにマスタープラン・ロードマップを視野に入れた中・大型の先進最適化配位装置での研究展開を検討する。