

## ユニットテーマ提案書

### 1. ユニットテーマ

構造的代謝: 自己置換する開放系の学理 “Structural metabolism” of self-replacing open system

### 2. 提案者 (氏名・所属)

山口裕之, 藤原大, 關良輔, 奴賀秀男, 佐竹真介(NIFS), 村上定義(京大), 田辺克明(京大)

### 3. テーマと研究内容の概要

**【テーマの意味】** 本テーマでは、従来は生命分野の用語である代謝を「準定常な開放系一般における、物質流出入を伴う自由エネルギー獲得・散逸と構造維持の相補」と一般化して考える。核融合プラズマは、熱運動によって粒子・波動を吸収して（将来的には核融合反応も含め）獲得した自由エネルギーによって、これを可能とする温度勾配・電流・イオン種の純度等の構造を維持しており、構成する物質を順次置換しながら

ら、粒子/波動/核子間のエネルギーを準定常的に解放・散逸させる代謝システムとして成立している。生物(分子結合エネルギーを解放・散逸)における有機的な代謝と区別して、これを構造的代謝(structural metabolism)と仮称する。本テーマではこれらの系を、生物と非生物を包含する非平衡開放系の新しいパラダイム「自己置換する開放系」として捉える。その位置づけを図1.に示す。生体内活動から自己複製や情報の感受といった機能を脱離して残るのがこの自己置換性であり、自己置換する開放系の成立が生命的秩序の起源の一端である可能性が洞察される。(構造形成の主要部分を純粋に力学的に記述できるという意味で) 最も単純な自己置換系の一つである核融合プラズマと、その周辺環境の統合的記述(≠特定の現象/スケール/空間領域)、および最適化を通じて、自己置換系一般における普遍原理や、環境適応・進化の本質的意味と情報の役割等を明らかにし、学理として体系化することが、本テーマの目標である(“ダイナミクスとダーウィニズムの接続”)。その過程で、核融合炉早期実現に資するブレークスルーを目指すことは言うまでもない。

**【具体的な研究課題例】** ■非軸対称系環状プラズマにおけるコア～周辺～壁領域を接続した統合モデリング: 物質/エネルギー収支・マイクロ～マクロ構造・エントロピー排出の相互関係の解明, データ駆動的アプローチも活用した予測・実時間制御 ■異なる物理現象間の相互影響を考慮した核融合炉設計・最適化手法の確立: 自由エネルギー獲得と構造維持の効率化という観点からの核融合炉の最適化や既存実験の再検証 ■提案した手法やモデル, 原理の実験的な実証。

**【10年間のプロジェクトで達成する目標, 期待される成果の学術的価値】** 不純物イオンの定常的吐き出しと核燃焼プラズマ定常保持という「高度な構造的代謝」を可能とする新装置概念を創出し、その原理の基本部分を実験的に実証する。物質の均質化に抗う構造を非平衡複雑系の内部に能動的に生み出し、その背後にある基本原理を明らかにするという学術的価値を持つ。

### 4. 位置づけ

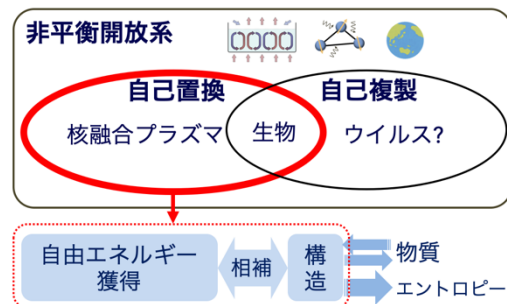


図1. 本テーマが開く新たなパラダイム「自己置換」の位置づけ

これまでの磁場閉じ込め核融合炉研究により、3次元磁場の幾何形状や外部からの加熱を通じて、プラズマの微視的構造や巨視的フロー、また粒子種による空間分布の違いが多様なあり方を示すことが明らかとなってきた (LHD の遺伝子)。このことは、非平衡開放系としての核融合プラズマの自由度の高さと、普遍原理を探究する研究の場としての価値・可能性を示唆するものである。本テーマは、自己置換する開放系という全く新しい視点から、磁場閉じ込め・核燃焼プラズマの保持における秩序の構築に取り組み、生物と非生物にまたがる当該系の基本原理に迫ろうとする独自の研究テーマである。他テーマとも連携し、NIFS の資産でもあるシミュレーション、統合モデリング、最適化といったメソッドを提供する他、各要素研究の成果を、核融合炉の諸課題に対する解決策へと昇華するという、知を統合する場としての機能を果たす。また、将来の学術プラットフォームの背景となる学術的知見と、物理・工学設計を完遂できるだけのノウハウを醸成する。

## 5. 研究の方法

NIFS を中心に開発・整備が進められてきた豊富な非軸対称系のシミュレーションコード群を基盤とし、炉心コードと周辺コードを接続した統合コードを開発する。特に、運動論的モデルと波動関連のモジュールを重点整備し、速度空間制御による構造形成の記述を可能とする。大規模並列計算機を利用した第1原理シミュレーション、モデル化を進める。外部電流系を変量とする配位最適化コード (既に運用中) と統合コードを接続し、核燃焼プラズマの内部状態を考慮した最適化を可能とする。LHD, Heliotron-J, HSX, CFQS, W7-X, トカマク等の既存装置との比較により確度を高める。また、共同研究を通じて実験提案を行い、要素物理や最適化の検証を進める。統合コードとデータ駆動の連携により、核燃焼プラズマの自律性と現実的な計測・アクチュエータを想定した、制御手法および実時間制御の研究を行う。CHS, LHD の設備も流用し、最適化により得られた新装置概念の基本原理を実証する小型装置 (大半径 $\sim 0.2\text{m}$ - $1.0\text{m}$  まで段階的に) の製作・実験を行う。

## 6. 自己評価

### 1) 未来志向であること

当該分野における従来の最適化研究では、磁場の隠れた対称性の探究など、閉じ込め性能の向上を配位設計における主要な目標としており、不純物イオンの選択的排出という、物質の均質化に抗う配位の構築、あるいはエントロピー排出の促進を評価軸に据える本テーマは本質的に未来志向である。

### 2) 目標を具体的に示していること

これまでの研究展開を踏まえた明確な目標として、不純物イオンを選択的に排出しつつ核燃焼プラズマを定常維持することが可能な閉じ込め装置および運転モードの具体案の創出を掲げている。

### 3) 10年後に学術界に輝くテーマに育つこと

核融合プラズマは典型的な非平衡開放系として議論されてきているが、本テーマはこれを能動的に最適化・設計し、低エントロピーな動的平衡状態が実現される過程を明らかにする例として、10年後に学術界に輝くテーマに育つ。地球・生命・社会科学と連携した学術領域の創成も見込まれる。

### 4) 多様な「個人のテーマ」を包摂できること

本テーマは特定の物理現象やスケールのみに着目しないため、全体を再構成するための要素物理の理解やそのモデル化が必須であり、多様な物理テーマが内包される。また、最適化に関連する数理・アルゴリズムや、データ駆動科学の関連する手法や原理など、多様な個人テーマを包摂する。