

## 1. テーマ名

仮称：プラズマ装置学 英名仮称：Plasma Apparatus

## 2. 核融合科学としての課題

核融合科学研究（核融合プラズマが関わる物理、超伝導材料を含む核融合材料および機器制御・運用等の研究）には、実現性や経済性を含む前人未踏の性能が要求される装置群が必要であり、核融合炉開発では更に高い性能が求められる。本テーマにおいて、これら装置群を実現する学問的知見を深化させるとともに基盤技術を確立する。核融合研究は装置群の統合・大型化とともに各要素研究（原子分子過程、ダイバータプラズマ、炉材料、負イオン源等の他、様々な核融合炉方式の基礎研究等を含む）が行われている。前者は中枢機関が担っており、大型装置でしかできない研究を行っている一方で、多様な研究を行うことは容易ではない。後者の要素研究は大学等の学術機関が担っているが、核融合科学研究の学問的知見を深化させるためには更に裾野を広げて多様な研究をする必要がある。このために、本テーマにおいて既存の要素研究領域に加えて、これまで大型装置で行われてきた研究においても問題を学術的要素に分解して課題を定式化し、大学等においてこれら定式化された多様な学術テーマを研究する環境を構築する。

科学と技術には、細分化され個別の対象に向けて発展してきた分野の知と技を、その機能とはたらきに着目して、他分野への展開や融合、または新分野の開拓が求められている。本テーマの研究で得られた装置技術や、実現するために得られた学問的知見・手法を、プラズマ・核融合科学および核融合炉開発以外の分野の装置へと展開・融合および新分野開拓を図る。

## 3. 学術的な特徴づけ（何の研究だと言えるか）

プラズマ科学では密度で約 28 桁、温度で約 7 桁に及ぶ領域、すなわち星間プラズマからコロナ、プラズマ応用機器のプラズマ、レーザー生成プラズマ、恒星中心のプラズマ、物質反物質プラズマ等を対象とする。現状、実験室では、密度は 10 桁強であるが温度は同等の領域を扱うことができる。ここでは、エネルギーの流出入、発生、散逸がある中で、パラメータ領域に応じた化学反応過程や原子分子過程、核反応過程等の様々な反応過程が起こり、荷電粒子群の集団現象として静電磁場によるプラズマへの作用、電磁波動を含む変動電磁場とプラズマとの相互作用、光とプラズマの相互作用、物質とプラズマの相互作用等の作用がはたらき、これらが複雑に絡み合った輸送、拡散、粘性、乱流、構造形成、線形・非線形現象等が出現する。また、高電流密度ビームを含む非中性プラズマや正負電荷粒子が質量対称性をもつペアプラズマでは特異な性質が観測もしくは予測されている。プラズマ物性基礎研究、宇宙・天体プラズマ研究および核融合科学を始めとしたプラズマ応用研究を更に推進するためには、如何にプラズマ物性を理解して計測・制御し、対象とする科学の本質を抽出するかが重要となる。このために、本テーマではこれまでプラズマ・核融合科学実験で培ってきた最先端の計測・制御技術を更に高度化する。合わせてこれらの手法を応用して自然科学と応用科学の深化に質的变化もたらす手法および自然科学と応用科学の新展開を追究する手法を探求する。

## 4. 定式化・アプローチ

プラズマ装置は荷電粒子集団を制御する装置であり、プラズマ・核融合科学では、最先端の学問的知見（プラズマ物理/応用工学、ビーム物理/工学、光/レーザー科学、原子分子科学、電気電子工学（電力工学、電磁波工学を含む）、材料工学、極低温物理・超伝導工学等）およびこれらに関連する極限技術（真空技術、プラズマ・荷電粒子生成/閉じ込め/輸送/制御技術、粒子/エネルギー循環技術、高電圧技術、レーザー技術、電気/電子/電力/電磁波技術、超伝導技術、各種検出・計測技術、放射線取扱技術等）を開拓しつつ、それらを駆使してプラズマ制御を行ってきた。本テーマでは、更なるプラズマ装置の高度化を着実に進めると同時に、これらの基盤学問分野および技術の発展に寄与する。プラズマ装置の高度化は、単に既存技術の統合を第一とするのではなく、装置を個別要素に分解してその仕組みを科学的に理解し、この理解に基づいた最善の手法に個別要素および装置を再構築することによって実現する。また、他分野に対する知見を広め、プラズマ核融合分野

で培ってきた最先端の学問的知見と極限技術をテクノロジードライバとして、他分野との連携・協奏によって自然科学の深化に質的変化をもたらすと同時に自然科学の新展開を追究する。本テーマは NIFS を始めとした全国、世界各地にある既存および新規プラズマ装置をアプローチ（プロジェクト）の対象とする。以下に、これら多様なプロジェクトの一部を説明する。

- [既存装置の高度化] 中性粒子ビーム入射装置 (NBI) 用負イオン源  
放電の物理、原子分子科学、プラズマ物質相互作用の科学、負イオンプラズマ科学、ビーム物理、真空技術、除熱技術、荷電粒子制御技術、高電圧技術、大規模装置取扱技術、数値計算技術等を駆使した装置である。直流 (FA) -高周波 (RF) ハイブリッド大型負イオン源を用いて、プラズマ生成から高密度負イオン生成、ペアプラズマ様プラズマからのビーム引出・形成に関わる FA と RF の物理的類似性と相違性を明らかにし、大型 RF 負イオン源から高ビーム電流密度かつ低発散角をもつ大面積ビームの実現に向けた学問的知見を深めるとともに基盤技術を構築する。また、この学問的知見と基盤技術を他のプラズマ装置や他分野への展開を図る。
- [他分野へ展開/新分野の創生] 反物質プラズマ/ペアプラズマ生成装置  
プラズマ・核融合科学の荷電粒子制御の物理的知見と制御技術および超伝導磁石技術を駆使して、希少粒子である反物質を含む粒子から構成される反物質プラズマの安定捕獲を実現する、新概念に基づく軸対称かつ小体積閉じ込め配位をもつ装置を開発する。反物質プラズマの一種である電子・陽電子ペアプラズマの物性研究に対する先行研究用装置として、NBI 技術を基盤とした新概念に基づくペアイオンプラズマ生成装置を実現する。
- [他分野との融合] 新概念核融合炉：ミュオン触媒核融合 ( $\mu$ CF) 装置  
プラズマ・核融合科学の学問的知見と極限技術（原子分子科学・プラズマ・水素同位体取扱技術・NBI・レーザー加速）との融合により  $\mu$ CF 触媒効率の検証等を実施する。

## 5. 学際的展開

学際的展開自体が本テーマの二大要素のひとつである。例えば、通常のプラズマから反物質プラズマへ拡張による反物質科学への展開、高エネルギー天体現象の素過程を理解する上で重要な電子・陽電子ペアプラズマの実験的物性研究および更にこの基礎研究となるペアイオンプラズマ物性研究による宇宙物理学への展開、 $\mu$ CF を通したミュオン科学/原子核物理学/原子分子物理学への展開、 $\mu$ CF 装置に関連して超流動ヘリウムによる風洞実験も可能な高レイノルズ数流体物理学への展開、ミュオン科学と複雑磁場中の荷電粒子運動研究との融合による地球惑星科学/宇宙天気予報への展開、および極低温物理/工学および大型プラズマ閉じ込め装置で培った大型高磁場超伝導装置技術を駆使したアクシオン探索による素粒子/宇宙物理学への展開等、様々な分野へ展開を図る。

## 6. 独自性・優位性など

NIFS はプラズマ・核融合科学関連装置の知見と技術において世界的な優位性を持つ 1 機関である。なかでも NBI 研究について、NIFS は ITER 機構や QST 等との研究を実施中もしくは実施協議中であるなど世界をリードする機関のひとつであり、NBI 研究をする上で基盤施設を有するとともに世界で唯一の FA-RF ハイブリッド大型負イオン源を整備中であるなど世界的に特異な優位性を保持している。例として挙げた反物質プラズマ/ペアプラズマ生成装置、 $\mu$ CF 装置およびアクシオン探索については、プラズマ・核融合科学の知見、プラズマ・核融合科学研究の中核研究所として NIFS および共同研究先大学が持つ技術、施設および新概念に基づく研究であり、優位性および独自性をもつことは明らかである。例として挙げたアプローチに限らず、本テーマで扱う様々なアプローチでは、科学および技術を一部共通の基盤としているため、これらをひとつのユニットとして実施することで相乗効果が期待できる。また、NIFS はプラズマ・核融合科学研究の中核研究所として、これら様々なアプローチを推進する学術ネットワークのハブとなり得る。

分野の多様性は、その分野の発展をもたらす要素のひとつである。プラズマ・核融合科学関連プラズマ分野は、既に幅広い自然科学と応用科学分野（宇宙・地球・惑星科学関連、素粒子・原子核・加速器科学関連、宇宙航空工学関連、材料工学関連、環境工学関連、生物・医学関連等）と繋がりを持っている。本ユニットテーマの遂行は、これらの分野を始めとした多様な分野と実験装置および装置に内在する科学を通じた更なる協奏を可能とし、更なるプラズマ・核融合科学関連プラズマ分野の多様性をもたらすと同時に、分野融合や新分野の開拓の可能性を大いに秘めている。