

2021年12月21日

## ユニットクラスタテーマ提案書

### 1. テーマ名

異相連成現象：プラズマ・物質三態システムの理工学

### 2. 核融合としての課題

磁場閉じ込め核融合炉の開いた磁力線領域から対向壁へ、そして対向壁を冷却する冷媒、あるいは排気装置を経て燃料循環系に至る系における粒子・エネルギー・運動量の輸送現象の理解と予測、制御

### 3. 学術的な特徴づけ（何の研究だといえるか）

本テーマでは、学術的問題を、「プラズマと、固体、液体、気体が接する系における、熱・粒子・運動量輸送の理解と予測、制御」とする。主軸となる研究は、磁化されたプラズマと物質三態が連成する非平衡・非線形系の物理、輸送現象の物理の研究と言える。このために進めるべき研究として、原子物理、光－物質相互作用、分子構造形成・制御、プラズマ源、プラズマ計測、異種金属接合、材料分析法、データ解析手法などがある。

### 4. アプローチ（定式化）

「2. 核融合としての課題」に対して、非接触プラズマ生成・維持のための気体との相互作用、固体あるいは液体対向壁との相互作用、対向壁中の粒子・エネルギー輸送と粒子蓄積などの素過程の理解を得ることにより、これに取り組む。プラズマ、固体、液体、気体という異なる状態間にまたがる研究を一つのユニットで行うことにより、それぞれの研究分野間の synergy 効果を促進し、核融合炉の周辺・ダイバータ領域における多様な連成現象の理解に新たな展開をもたらす。

非接触プラズマの生成・安定維持については、これを光とプラズマ（物質）の相互作用として捉える。すなわち磁力線構造とプラズマの熱的不安定性および乱流等の微視的不安定性に起因する輸送の時空間スケールが、原子分子過程による輻射とどのように相互作用しているかという観点からアプローチする。この研究には、低温高密度プラズマ中の輻射輸送や、水素分子の回転・振動状態の原子・分子過程への影響、負イオンの効果などが含まれ、トラスプラズマの密度限界研究にも関わる。さらには Fano 効果等を用いた光によるプラズマの光学的特性の積極的な制御へと発展させる。固体あるいは液体金属壁とプラズマの相互作用においては特に、中性子照射による固体材料の物性の変化、例えば水素同位体やヘリウムの材料内蓄積・放出について、中性子照射材や重イオン照射材へのプラズマ照射を行い、照射損傷の詳細な分析から明らかにする。また、原型炉の次を見据え、液体金属で構成するプラズマ対向壁を研究対象とし、プラズマと液体金属界面の不安定性、液体金属中の水素同位体やヘリウム蓄積に注目して研究を進める。対向壁中の粒子・エネルギー輸送については、プラズマ対向面と冷却管間の急峻な温度勾配下での材料および水素同位体・ヘリウム挙動について、ソレー効果に注目した研究などを行う。粒子・エネルギー輸送制御では、異材接合など工学的な取り組みも進める。理論・シミュレーションからも取り組みでは、国内外の研究者と連携し、光と原子・分子の相互作用には量子力学理論、固体原子分子の動的な振舞には分子動力学法、周辺プラズマ輸送には流体プラズマ・中性粒子輸送コードや PIC を用いたシミュレーション研究を行う。

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。

これら実験及び理論・シミュレーション研究の成果を統合、モデル化し、周辺プラズマから非接触領域の弱電離プラズマ、プラズマ対向壁、そして冷媒に至る多様な現象を繋ぐ予測精度の高い熱・粒子・運動量輸送シミュレーションを可能とする。また、研究を進めるために必要な、プラズマ源、プラズマ計測、異種金属接合法、材料分析法、データ解析手法の研究を並行して行う。大学共同利用機関の役割を意識し、特徴ある装置、所外研究者にとって魅力的な装置の開発も進める。

双方向拠点をはじめとする大学等や自然科学研究機構の各機関、QST、海外研究機関での共同実験・共同研究の推進は必須である。

## 5. 学際的展開

プラズマ中や壁材料中の粒子輸送は、例えばソーラー効果のように複数の勾配が駆動する「非平衡交差輸送（クロス効果）」が関係する。また、プラズマと固体あるいは液体界面では、母材、界面、そしてプラズマへと「多層間」でのフォノン・フォトン・電子の受け渡しがあり、多相間の多様な相互作用が起きている。このように複雑な系を現す数理モデルは、半導体プロセッシング・物性物理・光物性物理・統計基礎論などの分野を横断して展開できる可能性を持つ。非接触プラズマにおける原子・分子過程の研究で得られる「光とプラズマ」に関する知見を、弱電離プラズマの総理解、光によるプラズマ物性の計測・制御法の確立、固体・ソフトマター（生体分子）等物質との相互作用の解明、プラズマ中の化学物質の形成・分解過程などの研究に適用する。さらに「光とプラズマ」に関する知見は、プラズマバイオや、SDGs、ひいては宇宙空間における生命材料物質の形成メカニズム解明などへも発展し得る。また、研究対象となる現象のアナロジーを活用し、例えば熱プラズマや、液体金属を用いたプラズマプロセスへの展開も考えられる。本テーマで用いる、あるいは新たに開発する機器や実験・計測手法などを他分野の研究に適用した新たな展開も期待できる。

## 6. 独自性、優位性など

本テーマは、基礎プラズマ、核融合プラズマ、材料、水素同位体、そして理論シミュレーション研究者の共同提案であることが大きな特徴であり、「2. 核融合としての課題」で述べた研究を主軸として多様な研究テーマを包摂することができる。これまでもプラズマと固体壁の相互作用では、プラズマからの関心と壁からの関心の両面から研究を進めてきた。また、弱電離プラズマについても、実験および理論の知見を重ねることで理解を得てきている。ユニット構築後はさらに議論を密に行い、新たな研究課題に取り組む。既設の設備である、直線型プラズマ装置Hyper-IおよびTPD-II、熱負荷試験装置ACT2、NBIテストスタンド等を用いた実験、集束イオンビーム装置、透過型電子顕微鏡、イオンビーム分析装置など表面分析機器群を用いた試料分析等、また、これまで開発および導入してきたコードを用いた計算機シミュレーション研究が協同して進められることも本テーマの優位性と言える。これまでのLHD実験で蓄積された膨大なデータを、データ駆動科学の手法を用いて解析し、活用できることも優位性と言える。

所外の研究者と、核融合炉の実現のために必要な中性子照射影響について、プラズマと固体壁相互作用の観点での共同研究を進めている。また、「光とプラズマ」に関する知見を活かし、分子研との共同研究や名大低温プラズマセンターとの共同研究など、学際的な共同研究も進めている。これらも本テーマの優位性と言える。