

名古屋大学工学研究科 総合エネルギー工学専攻  
核融合工学講座

## 核融合炉工学グループ

田中照也(客員准教授)、中野治久(客員准教授)  
博士後期課程0名、博士前期課程3名、学部2名(2023年度の実績)

### 研究分野と研究方針

#### 【概要】

地球温暖化、エネルギー問題の解決に向けて、将来基幹エネルギー源となり得る革新的エネルギーの開発が喫緊の課題であり、核融合発電はその有力な候補の一つである。本研究室がある核融合科学研究所では、世界最大級のヘリカル型環状磁場閉じ込め装置である大型ヘリカル装置(LHD)を用いた環状プラズマの総合的理解を推進するとともに、核融合発電炉の実現に必要な先進工学技術の確立を目指した学術研究を展開している。

本研究室では核融合発電を実現するために必須となる、(1)高温高密度プラズマの生成・制御に必要な加熱システムに関する研究、及び、(2)高性能プラズマで発生する核融合中性子エネルギーを熱エネルギーに変換し、安全で高効率の発電を実現する”ブランケットシステム”に必要な材料・機器の開発研究を進めている。

#### 【キーワード】

- 準光学ミリ波伝送、波動加熱物理、電子サイクロトロン波、光渦、中性粒子ビーム入射装置、大電力大型イオン源、負イオン源、粒子ビーム物理学・工学、プラズマ物理学
- 発電ブランケットシステム、核融合炉用機能材料、電気絶縁材料、光学材料、放射線照射効果、照射実験

#### 【主な研究と内容】

##### (A) プラズマ中の電子サイクロトロン加熱物理

電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)の特徴はプラズマ中の電子が実空間・速度空間上で局所的に加熱されることである。この特徴を最大限活かすために、ミリ波ビームがプラズマ中を伝搬する過程で回折、屈折、吸収を扱うことができ、大規模なシミュレーションに頼らず、電子サイクロトロン加熱の評価を簡便に行う手法を開発している。

##### (B) 中性粒子ビーム入射装置研究

中性粒子ビーム入射装置(NBI)は水素負イオン源を起点とする大電力プラズマ加熱装置であり、ITERや核融合原型炉に向けて、高出力・定常化、高信頼性化、高効率化が求められている。高出力・定

常化および高効率化に関連して、ビーム発散角が実用レベルにあるフィラメント・アーク直流放電 (FA) 負イオン源とビーム発散角が大きい高周波放電 (RF) 負イオン源を同時実現可能な NBI 用ハイブリッド放電負イオン源を構築し、RF 負イオン源のビーム発散角の縮小に向けた研究を ITER 機構や量子科学技術研究開発機構等と共同で進めている。また、高信頼性化に関連して、メンテナンスレスに向けた開発項目のひとつであるセシウムフリー負イオン源の基礎研究に取り組んでいる。

#### (C) 核融合炉用セラミック電気絶縁材料の照射効果研究

液体金属を冷却材とする先進発電ブランケットシステムでは、強磁場下で金属配管中を流れる液体金属に生じる MHD 圧力損失 (電磁ブレーキ効果) を低減し、効率よく冷却材を循環させるために、金属配管の内側に酸化物や窒化物のセラミック電気絶縁被覆を施すことが考えられている。このブランケット用絶縁材料には核融合炉の運転中に高フラックス中性子が入射し続け、最大約 100dpa (displacement per atom, 全ての原子が 100 回位置を変える) のはじき出し損傷を受けることが予測されているが、このような過酷な環境下でのセラミック材料の電気絶縁特性の変化は未だ調べられていない。そこで、イオンビーム照射実験によりはじき出し損傷効果を模擬し、起こりうる特性の変化や耐放射線性に優れる材料の選別について研究を行う。

#### (D) セラミックの発光スペクトル変化を利用した炉内環境モニタリングシステムの研究

希土類酸化物である酸化エルビウム ( $\text{Er}_2\text{O}_3$ ) は紫外光を照射すると、発光スペクトルの中に緑色と赤色の強いピークが見られる。この2つの発光ピークの強度比は、結晶性の低下 (結晶の乱れ) や温度 (室温 ~ 400°C) に応じて変化することを明らかにした。この特性を核融合炉内に設置された材料の中性子のはじき出し損傷の度合い (結晶の乱れ度合い) や温度のモニタリングに適用する研究を進めている。核融合炉内の誘導  $\gamma$  線環境下における発光測定が必要となるため、測定に使用する光ファイバーに誘起される放射線ノイズの評価等を進め、放射線環境下で使用できる炉内環境モニタリングシステムの開発研究を進める。また、 $\text{Er}_2\text{O}_3$  以外の炉内環境モニタリングに適した発光特性を持つ材料の探索を行う。

## 2023 年度の研究・教育の概要

### 【電子サイクロトロン吸収の相対論的プラズマへの拡張】

核融合炉では中心電子温度が数 10 keV の高温高密度プラズマが想定されている。この核融合炉心条件での ECRH の物理検討を行うためには、相対性理論の効果を含めた ECRH の吸収を高速で正確に評価することが必要である。このため、電磁波の伝搬・吸収を扱う誘電率テンソルの導出をレビューするとともに、相対論効果を導入することで任意の分布関数に対する相対論的誘電率テンソルの表式を求め、数値的に高速に計算するアルゴリズムを考え、コーディングする指針を示した。

### 【セシウムフリー水素負イオン源の性能評価に向けたイオン源開発】

既存の磁場閉じ込め核融合炉の加熱装置である中性粒子ビーム入射装置 (NBI) 用水素負イオン源では、Cs をイオン源プラズマとビーム境界の電極 (プラズマ電極) 表面に付着させ、プラズマ電極表面を低仕事関数化させることで水素負イオンを大量に生成している。しかし、Cs の導入は運転を不安定化させる

ため、究極的には Cs を用いない Cs フリー負イオン源の開発が期待されている。Cs フリー負イオン源の実現に向けて、Cs 付着プラズマ電極の代替としてアルカリ金属並みの低仕事関数を持つ C12A7 エレクトライドに着目した。既存の装置と違い Cs フリー環境で実験を行うため、昨年度に新たに小型の Cs フリー負イオン源を構築した。昨年度のイオン源プラズマの計測結果においてプラズマ密度が不十分であったため、放電部とプラズマ電極間の距離を短縮すると共に、放電電力を 1.2 kW から 3 kW に増強した。これに伴って漏洩電磁波の影響で各種機器の誤作動が起こったため、ファラデーシール等の漏洩電磁波対策を強化した。確実にビーム電流が得られる正イオンビームにてイオン源加速器の特性を確認した。

負イオン生成量は仕事関数に大きく依存する。負イオン生成量と仕事関数の関係を明らかにするために、仕事関数計測法の構築を開始した。

#### 【高速エミッタンスメータの設計】

FA 負イオン源に比べて RF 負イオン源のビーム発散角が大きくなる原因として、RF 放電に伴うプラズマの振動がビームを振動させている可能性が指摘されている。これを実験的に明らかにするために、ビームの位相空間構造を高時間分解能で計測する高速エミッタンスメータの開発を開始した。高速エミッタンスメータを設計するに当たり、先行研究による非一様な位相空間構造が放電周波数で振動すると仮定し、ビームの位相空間構造計測における必要条件を定めた。この必要条件から高速エミッタンスメータの装置仕様を決定した。決定した装置仕様を用いて計測シミュレーションを行い、想定したビームの位相空間構造の振動を計測可能であることを確認した。

#### 【核融合先進ブランケット用電気絶縁セラミック材料のイオンビーム照射下特性評価】

2022 年度まで、大型構造物であるブランケット配管内への大面積被覆の成膜に対して有効であると考えられる金属有機化合物分解法(Metal Organic Decomposition(MOD)法、有機溶剤の塗布と焼結による成膜) を利用した酸化物セラミック薄膜試料の製作を行ってきた。2023 年度は電子ビーム蒸着装置の製作と立ち上げを行い、より高品質の酸化物薄膜試料の製作に加え、窒化物等の電気絶縁薄膜試料の製作を可能とした。

また、大阪大学オクタビアン施設の 250keV、D<sup>+</sup>イオンビームを用いて Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜試料の照射下電気伝導度を高温(～500°C)、電界印加条件でその場測定するための測定系の構築と予備的照射実験を開始した。今後、照射下電気伝導度変化のデータ蓄積を行っていく。

#### 【酸化エルビウム(Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)の結晶性、温度による発光特性変化】

希土類酸化物である酸化エルビウム(Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)は波長 365nm の紫外光を照射した際の光誘起発光(Photoluminescence; PL)スペクトル中には、緑色と赤色の強い発光ピークが見られる。焼成温度の異なる Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 材料に対してこの2つの発光ピークの強度比を調べ、焼成温度の低い(結晶性が低い)試料では赤色の発光ピーク強度が大きく低下することを確認した。また、室温から 400°C の範囲で温度を変化させたところ、温度の上昇とともに緑色の発光ピーク強度が低下すること等が分かった。これらの発光特性の変化は、核融合炉内の材料の照射損傷度合いや温度をモニタリングするためのセンサー材料として適用できる可能性がある。

#### 【本年度の研究成果発表の概要】

	国内会議発表	国際会議発表	国際会議予稿	学術論文
教員	2	3	3	1
学生	2	0	0	0

## 本年度の卒業論文・修士論文・博士論文のタイトル

### 【卒業論文】

- ・核融合プラズマ加熱用イオンビームの位相空間における時空間構造計測法の開発
- ・酸化エルビウム発光特性の核融合炉内照射損傷・温度モニタリングへの適用研究

### 【修士論文】

- ・電子サイクロトロン吸収の相対論的プラズマへの拡張

## その他・特記事項

なし