

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2名、学部2名(2022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】

- (1) 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
- (2) 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) 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・アーク直流放電負イオン源とビーム発散角が大きい高周波放電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、高周波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。

(B)プラズマ中の電子サイクロtron加熱物理

電子サイクロtron加熱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tron加熱の評価を簡便に行う手法を開発している。これまでに、ビームの径に対して十分緩やかに変化する不均一プラズマについての結果の妥当性を確認した。さらに、散乱や光渦などを扱うためにビーム径に対する制限を緩めた拡張を行う。

(C)核融合炉用セラミック機能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。

2022年度の研究・教育の概要

【準光学光線追跡コードの開発及びその核融合プラズマへの適用】

磁場中のプラズマは磁場の方向に対して伝搬特性に異方性が生じる、この異方性のために、真空中では縮退していた二つのモードが分離しはじめる。核融合プラズマの電子サイクロtron共鳴加熱においては真空領域から大電力ミリ波を入射し、プラズマのコア部にある電子サイクロtron共鳴領域まで伝搬させ効率よく吸収させる必要があるが、通常、分離した二つのモードは独立の伝搬経路をとり、効率よく吸収されるモードは片方のみである。したがって、効率よく電子サイクロtron共鳴加熱を行うためには、真空領域からコアプラズマまで、プラズマの密度、温度、磁場の向き、強度が不均一な条件で入射ビームの有限の広がり considering して伝搬を計算しなければならず、これを3次元的な配位で正確に計算するためには膨大な計算資源を必要とする。このため、これらの効果を取り入れた新たな拡張幾何光学近似を用いた準光学光線追跡コード(PARADE)を開発し、その妥当性の確認とLHDなどの実装置や将来のDEMO炉への適用によって、有用性を示した。また、PARADEコードの検証と光渦への応用も視野に入れ、近軸近似のみを適用し、ヘルムホルツ型方程式を数値的に解く拡張準光学ビーム解析コード(QUASI)の開発を行っており、真空中での準光学ビームの伝送においてはその妥当性を確認できた。プラズマ中での伝搬に適用している。

【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】

核融合原型炉の中性粒子ビーム入射装置で利用が期待されているセシウム(Cs)フリー水素負イオン源の基礎研究を行った。現在、Csは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するために導入されている。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、新たに小型の Cs フリー負イオン源を構築した。負イオン源プラズマは 13.56 MHz、1.2 kW の高周波電源より生成する。ビーム引出電圧および加速電圧はそれぞれ最大 15 kV および 50 kV である。高電位部に設置する高周波電源や引出電、イオン源プラズマ計測機器等をはじめとした機器を遠隔制御し、ガス導入から、放電、ビーム引出・加速まで連動動作するシステムを構築した。プラズマ電極近傍のプラズマ密度および電子温度を取得した。電子衝突による負イオン崩壊を抑制するためのフィルター磁場をプラズマ生成部と C12A7 エレクトライド製プラズマ電極間に追加し、電子温度の低下を確認した。

【核融合炉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手法の研究】

先進ブランケットにおける液体金属冷却材の MHD 圧力損失(電磁ブレーキ効果)低減を目的として研究が進められている電気絶縁セラミック被覆材料に対し、イオンビーム照射により中性子照射効果を模擬し、その特性変化を調べる手法について研究した。核融合科学研究所・タンデム加速器、名古屋大学・ダイナミロン、大阪大学・オクタピアン各装置を用いた場合のセラミック材料中におけるイオンビーム粒子の飛程や材料に与える損傷速度を計算コードにより評価した。また、飛程の計算結果に基づき、厚み 1 μm 以下の MgO 層を持つ照射実験用セラミック被覆試料を金属有機化合物分解 (Metal Organic Decomposition: MOD) 法により金属基板上に製作した。被覆試料の電気絶縁性能を評価し、照射実験に使用可能な高い絶縁性を持つ試料が製作できることを確認した。イオンビーム照射実験の立ち上げは核融合研のタンデム加速器を使用して行うこととし、ビーム軌道等の計算・検討を行い、高温セラミック被覆試料の電気伝導特性をイオンビーム照射下でその場測定するための新規ビームラインの設置を行った。

【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	1	1	1	1
学生	1	1	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】

- ・核融合炉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手法の研究
- ・セシウムフリー高周波負イオン源の性能評価に向けたイオン源開発

【修士論文】

- ・拡張準光学ビーム追跡コードの開発

その他・特記事項

なし