

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 1 名 (2021 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とそれらを用いた環状プラズマの研究、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、ペアプラズマ、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)ミリ波領域の電子サイクロトロン放射とその光渦性の研究

電子がサイクロトロン運動する際に放出する電波がサイクロトロン放射であるが、それが光学的に厚い条件を満たす場合には、その強度が局所温度に比例した黒体輻射強度として観測される。これは電子サイクロトロン波を用いてプラズマを加熱する場合の逆過程である。したがって、電子サイクロトロン放射強度を観測することで、電子サイクロトロン共鳴領域の電子温度が測定できることになる。こ

の電子温度測定法の開発と検証、さらに、計測された温度の絶対較正と、非熱的放射の取り扱い、また、電子サイクロトロン放射が持つ渦性が研究のテーマである。

(B) 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。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、散乱を扱う必要がある。準光学的手法を導入することにより、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。また、これらの実験的検証についても検討を進めている。

(C) 先進液体金属冷却ブランケットシステムのための材料・機器開発

磁場閉じ込め核融合発電炉では、炉心プラズマを取り囲むように厚み 50 cm 程度の”ブランケット”と呼ばれる金属壁が設置される。発電ブランケットは炉心プラズマで発生する核融合中性子のエネルギーを受け止めることにより高温となるが、液体金属を冷却材として循環させる先進発電システムの技術確立することにより、500℃以上の高温領域における高効率発電を実現させることを目指している。

2021 年度の研究・教育の概要

【電子サイクロトロン放射が持つ渦性の解析】

円運動する単一電子は、円運動に伴う加速度(中心力)によって、電磁波を放射する。一般的に加速度運動する電子の放射は遅延ポテンシャルを用いて計算することは古くから知られているが、2017 年になってその放射の高調波成分に渦性(伝搬の等位相面がヘリカル状の構造を持つこと)が示された。これは、電子サイクロトロン放射の発生起源である電子サイクロトロン放射にも適用できるが、通常のサイクロトロン放射では多数の電子がランダムな旋回位相で回転しているため、この渦性が相殺されているものと考えられる。このため、新たに旋回位相を外部から印加する大電力共鳴ミリ波によって揃えることで、コヒーレントな位相構造をもった光渦が生成できることを数値計算を用いて示した。これを実験的に検証するために iVORTECE 装置と位相構造計測器の開発を行い、光渦によるとみられる位相構造を見出した。

【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トロン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トロン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トロン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を考慮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、コードの検証を行った上で、大型ヘリカル装置で実際におこなわれている配位でプラズマ中の伝搬を正確に解析し実験結果

との照合を行った。また、PARADE コードの検証と光渦への応用も視野に入れ、近軸近似のみを用い、ヘルムホルツ型方程式を数値的に解く準光学ビーム解析コードの開発 を行っており、実験結果を用いて検証を行うための検討も進めている。

【先進液体金属冷却ブランケット用電気絶縁被覆の開発研究】

最大 8-10T になる強磁場下において金属流路中に液体金属冷却材を流動させる際には、強力な MHD 圧力損失(電磁ブレーキ効果)の発生が問題となり、条件によっては千気圧以上にもなる。この MHD 圧力損失を著しく低減させる技術として、金属配管内側への電気絶縁被覆技術の開発研究が進められている。2021 年度、LiPb 冷却材中において化学的に安定と考えられる MgO 電気絶縁被覆を、大型構造物流路への成膜に適している MOD 法(有機液体を基板に塗布した後に焼成する)により試作し、電気絶縁性能を評価した。被覆成膜条件の最適化を図った結果、 $\text{SiO}_2 + \text{Pt}$ 基板上に成膜した厚み $2\mu\text{m}$ の MgO 被覆の電気伝導度は、低温領域で 10^{-10}S/m であった。この電気伝導度は、ブランケット温度 500°C では熱励起により $10^{-6} - 10^{-5}\text{S/m}$ に上昇すること、また、名古屋大学 Co-60 γ 線照射施設における実験結果の外挿から、核融合炉の数 kGy/s の放射線環境下においては放射線励起(放射線誘起伝導)効果により約 10^{-6}S/m に上昇する見通しであること、が分かった。これら熱励起効果、放射線励起効果ともに、電気絶縁被覆に求められる絶縁性能 $< 10^{-3} - 10^{-2}\text{S/m}$ の確保を妨げないことを明らかにした。

【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	3	3	1	0
学生	1	0	0	0

本年度の卒業論文・修士論文・博士論文のタイトル

【修士論文】

- ・ミリ波サイクロトロン放射の渦性の実験的検証(小林遥)

【卒業論文】

- ・核融合炉液体金属ブランケット用酸化マグネシウム被覆の試作と電気絶縁性能評価(竹内千明)

その他・特記事項

准教授・中野が 2021 年 10 月から新たにグループに加わった。専門分野は、核融合プラズマの加熱法である中性粒子ビーム、イオン源(特に、負イオン源)、磁場閉じ込め高温プラズマである。イオン源からの派生研究として高エネルギー天体現象の素過程としても現れるペアプラズマの研究にも興味を持っている。大学等を始め、量子科学技術研究開発機構 量子エネルギー部門や ITER 機構とも連携を取りながら研究を行っている。