

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

核融合工学グループ

久保伸(教授)、田中照也(准教授)

博士後期課程 0名、博士前期課程 2名、学部 1名 (2020年度の実績)

研究分野と研究方針

【概要】

核融合発電を実現するために必要とされる高温高密度プラズマを生成し、計測するための加熱・計測システムの開発研究とそれらを用いた高性能プラズマの研究を行っている。

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。我々が主たる研究対象としている核融合プラズマの生成とその高性能化は、この核融合発電を実現するためには必須の研究であり、世界でいくつかの大型プラズマ閉じ込め実験装置で実験が進展しているなかで、核融合科学研究所では、ヘリカル型装置としては世界最大の大型ヘリカル装置(LHD)を用いたプラズマの高性能化研究を行っている。この中で、当グループでは、マイクロ波やミリ波を用いたプラズマの加熱と計測に関わる装置の開発研究、それを用いた高性能プラズマの振る舞いを調べることに關する種々のテーマを取り上げている。

【キーワード】

マイクロ波、ミリ波、大電力ミリ波発振器、大電力ミリ波伝送、準光学ビーム伝送、大電力ミリ波アンテナ、波動加熱物理、電子サイクロトロン波、電子バーンシュタイン波、電子サイクロトロン放射、大型ヘリカル装置、高電子温度プラズマ、エネルギー輸送、電子輸送障壁、光渦、重イオンビームプローブ、電子密度揺動、プラズマ乱流

【主な研究と内容】

(A) 電子サイクロトロン加熱システム

電子サイクロトロン加熱システムの要素として、大電力ミリ波発振器(ジャイロトロン)、ジャイロトロンと大電力伝送系との整合器、大電力伝送システム(低損失導波管、導波管ベンド、伝送電力モニター、偏波モニター、電力切替器、アークセンサー、真空窓)、入射アンテナシステ

ム(冷却機構付き準光学リレーミラー、入射角度モニター・制御システム)があり、それらの高効率・高性能化の研究に取り組んでいる。

(B) 電子サイクロトロン加熱されたプラズマの研究

上記、電子サイクロトロン加熱システムを用いて、大型ヘリカル装置(LHD)のプラズマの電子が加熱される。ジャイロトロンの電力を時間的に制御し、入射アンテナシステムにより空間的に局所的な加熱が可能である特性を生かして、プラズマの閉じ込め性能の向上や、局所的な加熱の時間応答を調べることで、閉じ込めに関わる物理現象の解明をテーマとした研究も行っている。

(C) ミリ波を用いたプラズマ計測

ジャイロトロンはその出力が大電力であるばかりではなく、コヒーレントなミリ波発振器としての特性が大きな特徴である。これを生かした、計測への応用としてイオン協同トムソン散乱計測がある。イオン協同トムソン散乱とは、イオンの熱運動に伴って追従する電子群が引き起こす散乱で、イオンの速度分布関数を計測する手段として優れているが、大電力でコヒーレントなミリ波領域の発振源と空間的に局所的なビームが必要となる。(A)で述べた電子サイクロトロン加熱システムはこの要件を満たしており、このシステムに加えて、微弱な散乱波を計測する高感度受信器を加えることでイオン協同トムソン散乱計測が可能となる、この計測に関わる受信システムの開発、ジャイロトロン運転の最適化、バックグラウンドとなる電子サイクロトロン放射を含む計測データの解析が研究のテーマである。

(D) 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。

2020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も開始した。

【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巡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、新たに巡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計算コードを整備するとともに、実際にこの目的に合わせた実験装置を製作し、これを検証するために新たな位相構造計測器の開発もおこなっている。

【高性能電子サイクロトロン放射計測法の開発】

電子サイクロトロン放射計測は、視線方向の磁場強度に応じた電子サイクロトロン周波数とその高調波の周波数で放射され、それぞれの周波数領域で光学的に厚ければ、放射スペクトルが電子温度分布に比例することを利用するものである。この観測視線を1次元的に配置すれば、視線方向と合わせて2次元的な、また2次元的に配置すれば、3次元的な電子温度分布の観測が可能となる。大型ヘリカル装置などの複雑な構造を持った核融合プラズマ実験装置においては、このような2次元、3次元的な電子温度とその揺らぎの構造が閉じ込め性能に大きく寄与すると考えられており、これを実験的に観測することが重要である。この目的のために、多チャンネルの電子サイクロトロン放射受信器を完成させ、プラズマ中のMHD不安定性にともなう電子温度の2次元構造の解析を行なった。

【電子サイクロトロン加熱変調されたプラズマの輸送解析】

電子サイクロトロン加熱は電子を空間的、時間的に制御して加熱できる効果的な手段である。これによって引き起こされる電子温度の時空間的な応答を調べることで、電子に関するプラズマの輸送の詳細な計測が可能となる。電子サイクロトロン放射計測はこのための強力なツールである。大型ヘリカル装置を円柱で近似し、軸対称性を仮定することで簡略化した電子温度の空間一次元時間発展輸送方程式を高速で解析するコードを作成した。これを用いて実験を再現できる輸送モデルと変調電力分布の組み合わせを求めることができるようにさらにコードの整備をおこなっており、いくつかの理論的、実験的に提唱されている輸送モデルの検証をおこなっている。

【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	0	0	5
学生	3	0	0	0

(※毎年3月末に、その年度の教員及び大学院生の研究業績について、工学研究科事務からとりまとめの依頼がある。その内容を使用することで、この表を容易に作成することが可能。予稿と学術論文については、共著が多いと思われるが、ダブルカウントしないこととする。)

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】

- ・ LHD における Q-band ECEI 計測器の開発 (一ノ瀬薫)

【卒業論文】

- ・ 電子サイクロトロン加熱のための準光学ビーム追跡コードの開発 (浅井史也)

その他・特記事項

准教授・田中が 2020 年度から新たにグループに加わった。専門分野は核融合中性子工学、核融合炉用機能材料、放射線照射効果、ブランケット工学 (炉心プラズマの周辺に配置される厚み約 50cm の金属壁)。中性子が大量に発生する核融合炉内におけるセラミックや金属センサー材料等の機能材料の特性変化、及び、その評価手法に興味を持って研究を行っている。卒論・修論・博論の研究テーマとしても今後の展開を予定している。