

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

核融合プラズマ理工学グループ

藤田隆明(教授)、岡本 敦(准教授)
博士後期課程 1名、博士前期課程 5名、学部 3名 (2020年度の実績)

研究分野と研究方針

【概要】

核融合エネルギーを実現するためのプラズマ・核融合研究を推進している。環状プラズマ実験装置 TOKASTAR-2、直線磁化プラズマ実験装置 NUMBER を用いた実験研究と、プラズマ統合輸送コード TOTAL、核融合炉システム設計コード PEC を用いた数値計算研究を行っている。

【キーワード】

磁場閉じ込め、トカマク、ヘリカル、電磁流体力学、プラズマ位置安定性、原子分子過程、体積再結合プラズマ、電子エネルギー分布、高エネルギーイオン、電子サイクロロン加熱、磁場計測、渦電流、プラズマ計測(静電プローブ計測、可視分光計測、粒子計測)、磁気面計測、衝突・輻射モデル、統合輸送コード、システム設計コード、不純物輸送、輸送障壁、中性粒子ビーム電流駆動、原型炉プラズマ性能評価、原型炉設計、核融合中性子源

【主な研究と内容】

(A) トカマク・ヘリカル混成磁場によるプラズマ閉じ込め実験(TOKASTAR-2)

TOKASTAR-2は、トカマク配位とヘリカル配位及びその両者の混成配位を形成可能なコイル群を有する小型の環状プラズマ実験装置である。プラズマ大半径は約 0.12m、トロイダル磁場強度は約 0.1T である。ヘリカル磁場生成用のコイルは核融合炉への適用が可能な簡単な形状(平行四辺形、扇形及び三角形)の局所コイルである。主目的は、トカマクプラズマへのヘリカル磁場(非軸対称磁場)の印加によるプラズマ位置の安定化に関する研究である。2020年度までに水平位置(径方向位置)および垂直位置の安定化を実証している。

上記の位置安定化のためにはそれに適した構造を有するヘリカル磁場を印加する必要がある。磁場計算により評価した磁気面の妥当性について、電子銃を用いた磁気面計測や静電プローブを用いたプラズマ計測により調べている。また、プラズマの位置安定性や位置形状解析に影響を及ぼす真空容器の渦電流の解析を進めている。

(B) 直線磁化プラズマを用いた基礎実験(NUMBER)

NUMBERは全長約 2 m の直線型磁化プラズマ実験装置であり、核融合プラズマ研究のための多様な基礎実験に用いられる。主たるミッションは(1)核融合炉ダイバータプラズマ中の原子分子過程の理解の

高度化、(2) アルファ粒子を模擬する高エネルギーイオンに関する基礎実験および新奇高エネルギーイオン生成法の開発、(3) 原型炉開発を見据えたプラズマ診断法の開発である。これらの研究には比較的強磁場(> 0.1 T)環境下の高密度(> 10^{18} m^{-3})プラズマが必要となるため、磁場強度が最適化された高密度プラズマ生成領域と強磁場環境の試験領域を磁力線により接続するという着想の下、本装置は建設された。

上記を踏まえ、具体的なテーマとしては、電子エネルギー分布の計測と制御、中性ガス圧力分布の制御による体積再結合プラズマ生成、静電的および分光学的手法を用いたプラズマ計測などに現在取り組んでいる。

(C) プラズマ診断法の開発

プラズマの発光強度に基づくプラズマ診断法を開発している。ヘリウム原子からの輝線強度を測定し、衝突輻射モデルを用いて電子温度と電子密度を推定する手法を TOKASTAR-2 トカマクプラズマに適用しプラズマ電流の変化に伴う電子温度と電子密度の時間変化を明らかにした。同手法を発展させ空間分布が得られるよう NUMBER 実験との比較に取り組んでいる。衝突輻射過程にイオン衝突が及ぼす影響についてモデルを構築するとともに様々な装置での実験データ解析を行っている。高波長分解能の分光器を開発し、ヘリウムイオンのスペクトルのドップラー拡がりから高時間分解能で TOKASTAR-2 トカマクプラズマのイオン温度を計測している。

(D) 原型炉プラズマ性能評価(TOTAL コード)

統合輸送コードは、様々な物理現象をモデル化して統合することによりプラズマの力学的平衡と径方向の熱・粒子の輸送を自己無撞着に解いて予測・解析を行うコードである。我々の研究室ではその一つとして TOTAL コードを開発している。同コードを用いて、核融合原型炉プラズマの性能評価を行い、それに基づいて設計の妥当性を検証するとともにプラズマ制御手法を検討する。そのため、不純物輸送モデルの開発・検証、中性粒子ビーム入射電流駆動(NBCD)の計算を行なうモジュールの開発、SOL・ダイバータプラズマ2点モデルの改良を行っている。

(E) 核融合炉のシステム設計・経済性評価(PEC コード)

核融合炉の設計においては、技術的な制約の範囲内で、所定の核融合出力および送電端電気出力を得るために必要な炉心プラズマや各機器のパラメータを評価し相互の配置を決定しなければならない。プラズマや機器等を簡単にモデル化して高速にこれを行い、設計パラメータに基づいて建設コスト、発電コストを評価するコードがシステムコードであり、我々の研究室ではその一つとして PEC コードを開発し、トカマク型中性子源やトカマク型原型炉の設計検討を行っている。また、より高度なモデルを用いた解析コードとの比較などによりプラズマや機器のモデルの改良を行っている。

2020 年度の研究・教育の概要

【トカマクプラズマに対するヘリカル磁場印加の効果】

従来の局所ヘリカルコイル(HF コイル、AHF コイル)では十分な安定化効果が見られなかったため、ヘリカル磁場の実効ポロイダル成分の評価に基づいてトーラスの上下に設置する新しいコイル(ULT コイル)を設計し 2020 年度に取り付けた。プラズマの上下に設置した形状制御コイル(SC コイル)を用いて生成した縦長断面プラズマに ULT コイル磁場を印加する実験を行い、垂直位置安定化効果を実証した。位置

安定化の条件について、不安定化効果を有する軸対称コイルの水平磁場と安定化効果を有する ULT コイルの実効的な水平磁場を用いて整理できることを示した。さらに、VDE が発生する放電においてプラズマの移動速度が ULT コイルの実効的な水平磁場により減少することを示した。トラス上下のみの局所コイルによる垂直位置安定化の実証は世界初の成果である。

【磁気面計測による誤差磁場評価】

多チャンネルの電子収集プローブアレイで計測した電子軌道断面が計算の結果とは異なる問題について、2019 年度にはトロイダル磁場コイルの誤差磁場の径方向成分を評価した。2020 年度には、ULT コイルを用いて、従来より大きな回転変換を有する閉磁気面が形成される条件での計測を実施した。データ解析の方法の変更により、従来より明瞭な電子軌道断面が得られるようになった。上下の ULT コイル電流の比に対する軌道の垂直位置の依存性について計算と同様の傾向が観測された。一方、径方向位置の時間変化など計算とは異なる結果も見られた。トロイダル磁場コイル電流のピーク付近で信号が検出されなくなる問題と合わせて検討を進めている。

【コイル磁場の校正と渦電流解析】

TOKASTAR-2 の真空容器には大きな渦電流が誘起され、プラズマの力学平衡の解析の誤差要因となっている。磁気プローブで計測される真空磁場はコイル磁場と渦電流磁場の和であり、渦電流磁場の解析のためにはコイル磁場の計測値を精度よく評価する必要がある。2020 年度に真空容器の側面部と上部を取り外し渦電流が小さい状態での通電試験を行い、コイル磁場による磁気プローブ計測値を得た。同じく 2020 年度に設置したトロイダル方向 8 箇所の磁気プローブで渦電流磁場のトロイダル方向分布 (3 次元性) を取得した。一方、核融合科学研究所共同研究により ANSYS による 3 次元渦電流磁場の計算を開始するとともに、EDDYCAL による 3 次元渦電流磁場の計算の準備を進めた。今後、実験結果と ANSYS や EDDYCAL の計算結果を比較する。

【高時間分解イオン温度計測】

イオン温度のドップラー広がりを検出できる波長分解能を有しながら $< 1 \text{ ms}$ のパルス放電プラズマの計測に適用できる分光器を製作した。波長分解能について定常放電プラズマを用いて調整を行い、ヘリウムイオン輝線 (468.6 nm) において TOKASTAR-2 トカマクプラズマ計測に十分な分解能を得ることが出来た。得られたイオン温度についてエネルギー閉じ込め時間の観点から物理的解釈を進めている。

【受動分光による空間分布計測手法の開発】

ヘリウム原子の線スペクトル放射を計測することで電子温度と電子密度を推定する手法を、空間分布が得られるように拡張した。目的関数の最小化により空間分布を推定する過程において、輝線強度比ごとの重みとして感度係数を考慮することで良好な推定が可能なことを明らかにした。空間分布形状の相違が線スペクトル強度に及ぼす影響を系統的に観測するため、同心円状の終端板を用いた能動的な分布制御実験を開始した。

【直線磁化プラズマの電子エネルギー分布計測】

電子エネルギー分布関数の静電的計測に取り組み、数値微分手法の改良により、一般的な実験条件では温度をパラメータとして記述できる熱平衡状態であることを明らかにした。非平衡状態が発現する実

験条件の絞り込みを行うとともに、レーザートムソン散乱計測による非平衡・非等方な電子エネルギー分布関数の計測について検討を開始した。

【体積再結合プラズマ生成のための基礎研究】

核融合炉ダイバータにおける熱負荷低減に必須となる体積再結合過程を NUMBER のプラズマに誘起するため、プラズマ加熱パワーと供給中性ガス量の実験条件を探索した。中間流領域における中性ガス圧力分布の計算手法を考案し、計算コードに実装し実験による検証を開始した。中性ガス圧力分布の制御のためのオリフィスを設計し、設置した。

【不純物輸送解析】

不純物イオンの案内中心軌道の追跡計算により不純物イオンの径方向移動速度(ピンチ速度)を計算する。クーロン衝突の効果を取り入れた計算によりピンチ速度を評価するため、2019年度には、軌道追跡コードによるクーロン衝突の効果を導入した。2020年度には、同コードを用いて径電場によるピンチ(E_r ピンチ)を評価し理論式と同じオーダーの値を得たが、径電場に対する依存性などに異なる傾向も見られ、検討を進めている。

【Hモード境界輸送モデルの開発】

TOTALコードの境界輸送障壁モデルを改良し、セパトリクス通過パワーとLH遷移閾値、HL遷移閾値の比較によりLH遷移、HL遷移のシミュレーションを可能とするとともに、実験データベースから得られたペデスタル圧力の比例則に計算値を合わせるように境界輸送障壁の拡散係数を調整する機能を開発した。これにより、核融合出力の立ち上げ・立ち下げ、不純物入射を含む原型炉の運転シナリオをより正確にシミュレーションすることが可能となった。後者については3種類のモデルを開発したが、モデルによって同じ密度を得るのに必要な粒子供給量が異なる結果となり、その要因について検討を進めている。

【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	5	0	0	3
学生	9	3	3	6

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】

- ・ TOKASTAR-2 の磁気計測におけるコイル磁場の校正によるプラズマ位置形状計算の改善
- ・ 直線型プラズマ実験装置 NUMBER における静電プローブによる電子エネルギー分布計測
- ・ 電子サイクロトロン共鳴プラズマにおける再結合プラズマ生成のための基礎研究

【修士論文】

- ・ 境界輸送障壁モデルの開発と原型炉の H モード運転シナリオの検討

- ・ドップラー分光計測による TOKASTAR-2 トカマクプラズマのイオン温度計測と閉じ込め特性評価
- ・視線積分されたヘリウム原子線強度比を用いた電子密度・温度分布推定手法に関する研究

【博士論文】

- ・局所ヘリカル磁場コイルによるトカマクプラズマの位置安定化に関する研究

その他・特記事項

- ・プラズマ・核融合学会 若手学会発表賞 学生部門 D3 安田 幸平 「TOKASTAR-2 における上下三角形コイルによる非軸対称磁場の垂直位置安定性への効果」、2020 年 12 月 4 日
- ・日本原子力学会フェロー賞 B4 矢ヶ崎 誇楠 2021 年 3 月 17 日
- ・BS フジ ガリレオ X 「太陽を地球で再現!? 究極のエネルギー核融合研究最前線」(2020 年 10 月 25 日放送、同年 11 月 1 日再放送) に教員が出演し、TOKASTAR-2 及び NUMBER での実験風景が紹介された。