

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 4 名 (2021 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、電子サイクロトロン加熱、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、電子銃を用いた電子軌道マッピング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、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、外部機関との共同研究により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広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。イオン温度、電子温度、電子密度の実測値からエネルギー閉じ込め時間を評価し、加熱パワーや種々の損失パワーについて考察を加えながら、大型装置で使用するスケールリング則との比較を行っている。

(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などを行っている。

(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。

2021 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】

2020 年度に、トーラスの上下に設置した ULT コイルを用いて、縦長断面プラズマの垂直位置安定化効果を実証した。東京工業大学との共同研究により、3次元電磁流体力学安定性解析コード(TERPSICHORE コード)を用いた解析を行い、ULT コイル磁場が安定化効果を有することを確認した。ま

た、従来より低いプラズマ電流での垂直位置安定化効果を調べるための、OH コイル電圧を下げた条件でのトカマクプラズマの放電調整を進めた。

【電子軌道マッピング及び静電プローブによるヘリカル閉磁気面の評価】

2020 年度に得た電子軌道マッピング実験データの解析から、ULT コイルを用いて、従来より大きな断面を有する閉磁気面が形成されることを確認した。また、トリプル静電プローブを用いて電子サイクロトロン共鳴加熱で生成したプラズマの密度・温度の計測を行い、計算上の閉磁気面の内側だけでなく外側でもヘリカル磁場の有無による違いが見られること、電子サイクロトロン共鳴加熱を停止した直後のプラズマ圧力の減衰の時定数がヘリカル磁場によって最大 5 倍程度長くなることを明らかにした。トロイダル磁場コイル電流のピーク付近で電子の信号が検出されなくなる問題のため、電子軌道マッピング計測と静電プローブ計測の直接的な比較はできておらず、電子銃の改良を検討中である。

【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。渦電流磁場の計算値と実測値の違いの原因の一つとして、計算において真空容器のポートなどの 3 次元性を無視した軸対称 2 次元モデルを用いていることが考えられる。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を取得し、磁場に 3 次元性があることを確認した。2021 年度には、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進めたが、軸対称 2 次元モデル計算よりむしろ実測値との違いが大きくなる傾向が見られた。その原因としてコイル磁場(軸対称 2 次元)の計算方法などに着目して、その改善方法を検討している。

【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。単一視線から多視線へ拡張することによる推定精度の向上を検証する実験を開始した。

【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、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した。入射光学系・散乱光集光光学系それぞれについて設計製作を行った。

【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実験により検証した。プラズマ加熱パワー増強のためのマイクロ波入射モード変換機構の検討と、実装に必須となる自動充放電システムの開発を行った。

【マッハプローブを用いたイオン流計測】

空間分布の単一ショット計測が可能な多チャンネルマッハプローブの開発に着手した。開発期における測定対象となる NUMBER のプラズマについて、径方向電位分布を調整ノブとした周方向イオン流れの制御に成功し、試作の単一チャンネルプローブを用いた較正係数決定手法を確立した。軸方向流れの径方向分布も明らかにした。

【直線磁化プラズマの間欠的な浮遊電位変動に伴う温度変化の計測】

電子エネルギー分布関数に現れる非平衡性の原因の一つとして、間欠的な電位変動現象に伴う温度の変化を調査した。高帯域の浮遊電位計測回路を開発し、条件付き抽出法と組み合わせることで、電位変動が生じている短時間(< 0.1 ms)のプラズマについて電子温度・密度の計測に成功し、電子温度が上昇していることを明らかにした。

【不純物輸送解析】

案内中心の無衝突軌道の計算により評価した不純物イオンの径方向移動速度(ピンチ速度)を用いて JT-60U におけるタングステン輸送計算を実施し、プラズマ中心でのタングステンイオン密度のトロイダル回転依存性について実験と同様の結果を得ている。2021 年度には、プラズマからの放射パワーや軟 X 線強度の径方向分布について計算値と実験との比較を開始した。計算によるタングステンイオンからの線スペクトル放射強度が実測の軟 X 線強度分布よりもピーキングしていることを見出した。今後、制動放射強度も含めた比較を行う。

【原型炉プラズマにおける不純物輸送シミュレーション】

NBCD 解析モジュールを実装した TOTAL を用いて、原型炉の定常運転を想定したプラズマにおけるアルゴン輸送解析を実施した。規格化ベータ値 $\beta_N = 3.9$ 、H ファクター $H_{98y2} = 1.48$ 、グリーンワルド密度の 1.24 倍の線平均密度で所定の核融合出力 1.5 GW を完全非誘導電流駆動状態で達成した。電子密度に対する割合は体積平均で $\langle n_{Ar} \rangle / \langle n_e \rangle = 0.200\%$ に留まり、表面での割合 0.5 %より低く、設計値(0.23%)と同程度であった。ただし、セパトリクス通過パワー P_{sep} は 335 MW 程度となりダイバータシミュレーションで想定された値(約 240 MW)をかなり上回っている。シンクロトロン放射など放射パワーの評価について検討を進める。

【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	3	5	5	3
学生	6	2	2	2

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】

- ・ マッハプローブを用いたプラズマ流れに関する実験研究
- ・ 実験データを用いた径方向分布の比較による不純物輸送モデルの妥当性の検討

- ・ 条件付き抽出法を用いた電子サイクロトロン共鳴プラズマにおける非熱平衡電子エネルギー分布の解析
- ・ TOKASTAR-2 装置におけるトカマクプラズマの垂直位置安定化に関する基礎研究

【修士論文】

- ・ 電子ビームマッピングによるヘリカル磁気面計測および静電プローブによるプラズマ閉じ込め特性の評価

【博士論文】

なし

その他・特記事項

なし