

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 8名、学部 4名 (2022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。2022年度にはプラズマ内部コイルを用いた新規環状プラズマ実験装置の設計・製作を開始した。

#### 【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、ダイバータ配位、境界層プラズマ、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2m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(>  $10^{18} \text{ m}^{-3}$ )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拡がりから高時間分解能でイオン温度を計測している。静電プローブの電流-電圧特性を用いて電子温度と電子密度を計測するときのデータ解析に機械学習の手法を適用し、解析速度と信頼性の両立に取り組んでいる。

#### (D) 新規環状プラズマ実験装置の設計・製作

2022年度に、プラズマ内部コイルを用いた新規環状プラズマ実験装置の設計・製作を開始した。ダイバータ配位の環状プラズマを生成し、その境界層におけるプラズマ流や不純物イオンの流速を計測し、その結果をダイバータプラズマシミュレーションコードの結果と比較する。プラズマ流に対するイオンドリフトの効果を明らかにするとともに実験的な裏付けのある不純物輸送モデルを提案することを目的とする。

#### (E) 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・検証などを行っている。

#### (F) 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。

## 2022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】

縦長断面化のための四重極磁場を生成する目的で使用されていたSCコイルを上下で逆向きに接続することでほぼ一様な水平磁場を生成できるようにし、それによる垂直方向変位へのULTコイル磁場の効果を調べ、一様な水平磁場に対してULTコイル磁場が安定化効果を持っていることが確認できた。今後、実験データを蓄積し一様水平磁場と実効水平磁場を用いて安定化の条件を整理する。

### 【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】

ヘリカル磁場の実効トロイダル成分を実験的に明らかにするため、15チャンネル電子収集プローブを用いた真空中での電子軌道計測を行なっている。2022年度はトロイダル磁場とULTコイル磁場のみを使用した条件での計測を行った。トロイダル磁場単独通電での電子軌道の計測と計算が合う様な水平磁場を求め、それを加えることで、ほぼULTコイル磁場印加時の電子軌道を再現する計算結果を得ることができた。また、トロイダル磁場が大きいときに電子が検出されなくなる問題があるため、電子銃フィラメントの改良案を作成し、部品を製作した。

### 【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。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開始した。2022年度には、Z方向磁場の詳細なトロイダル方向分布を計測する磁気プローブ(OMP)を製作し、TOKASTAR-2真空容器近傍の大気側に設置した。ANSYSを用いて、計算ポートの有無が渦電流磁場に及ぼす影響を調べ、プラズマ位置形状計算に用いている磁気プローブ(PMP)の位置で渦電流磁場のトロイダル方向の変動の振幅は最大0.1mT程度(1%程度)であり比較的小さいこと、PMPが計測する磁場は渦電流磁場のトロイダル方向の平均値に近いこと、渦電流磁場のトロイダル方向の平均値はポートがない場合より最大0.4mT程度(4%程度)小さいこと、が分かった。

### 【機械学習を用いた静電プローブのデータ解析】

静電プローブの電流-電圧特性から電子温度と電子密度を関数フィッティングにより決定するデータ解析のためニューラルネットワーク構築した。過去数年間に蓄積された熟練者によるフィッティング結果を学習させ、ノイズが大きくルールベースの自動解析が困難な実験データでも適切な温度・密度の推定を可能にした。

### 【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磁場に対する非等方性を直接計測するためのレーザートムソン散乱計測システムを開発した。入射光学系・散乱光集光光学系それぞれの調整手法を確立し、散乱スペクトルの初期結果を得た。迷光除去フィルターを考案し設計製作を行った。

### 【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ことに成功した。マイクロ波入射モード制御によりプラズマ加熱パワーを増強し、また、中性ガスの

供給量と供給位置の増強を行った。マイクロ波入射モード制御のためモード変換機構を、実装に必須となる自動充放電システムとともに開発し、設置した。これらにより、体積再結合過程に特徴的な可視スペクトルの取得に成功した。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、まとめた。

#### 【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を開発している。先端部の取り付けや真空シール部取り合いの設計を行い、製作を開始した。測定回路の設計と部品調達を行った。

#### 【直線磁化プラズマの間欠的な浮遊電位変動と温度変化の計測】

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。間欠的な電位変動を多点同時計測し、相互相関係数を求めた。この現象が磁力線垂直方向にプラズマ直径より小さい有限な広がりを持つ、磁力線方向に伸長した空間構造であることを、収束磁場配位のプラズマにおいて初めて明らかにした。核融合研の HYPER-I 装置を用いた共同研究を実施し、高波長分解かつ高時間分解の分光器を用いた電位変動に伴うイオン温度の計測に着手した。

#### 【イオン価数分布計測手法の開発】

電子温度と電子密度から線スペクトル発光強度の相対強度が得られる衝突輻射モデルを複数のイオン価数に対して適用できるように拡張し、複数の価数の線スペクトル強度からイオン価数分布を得る計測手法の開発に着手した。ヘリウム原子と1価イオンの発光強度に基づく価数別密度比と本手法で得られた価数別密度比を比較した。電子エネルギー分布の非平衡性が本手法に影響を及ぼし得ることを明らかにした。

#### 【新規環状プラズマ実験装置の設計・製作】

プラズマ内部コイルを用いた新規環状プラズマ実験装置の設計・製作を開始した。2022年度には、主要機器である分割可能なトロイダル磁場コイルの設計・製作を進めた。鍵となる導体接続部の構造を考案し、小型の5ターンコイルを試作して同構造の妥当性や問題点を確認した。その結果に基づいて実機コイル(56ターン)の導体の仕様を決定し、接続部を含む大部分の導体の製作を終了した。円柱状導体を樹脂含浸によりステンレス管内に固定するコイル中心部の構造を検討した。プラズマ内部コイルの概念設計を行い、それに基づいて使用する直流電源を選定し購入した。

#### 【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の輸送計算を実施し、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。2022年度には、プラズマからの軟 X 線強度の径方向分布について計算値と実験値を比較し、制動放射からの寄与と線放射からの寄与の両方を考慮し線放射の検出効率を 0.1 と仮定した場合に実験値に近い分布が得られた。また、クーロン衝突による軌道変化をモンテカルロ法で模擬するコードを開発し、径電場がピンチ速度と拡散係数に与える影響を評価した。

#### 【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。境界層およびダイバータプラズマでの放射のために想定されている量のア

ルゴン Ar を入射した場合、Ar の蓄積は問題とはならなかったが、主プラズマからの放射パワーが少なく、セパトリクス通過パワー  $P_{sep}$  は 307 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 240-280 MW)を上回った。主プラズマ放射パワーを増大し  $P_{sep}$  を低減させるため、ベースの Ar に加えてキセノン Xe を入射した場合のシミュレーションを行った場合、 $P_{sep}$  を 50 MW 低減させるためには H ファクターの 0.09 程度の向上が必要との評価を得た。

#### 【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	6	2	2	0
学生	11	3	3	3

## 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】

- ・ 内部コイル型プラズマ実験装置のトロイダル磁場コイルの設計と試作の開発
- ・ 電子軌道計測に基づく局所ヘリカルコイルの誤差磁場の考察
- ・ 衝突輻射モデルを用いた直線 ECR プラズマ装置 NUMBER における He イオン価数分布計測手法の開発
- ・ 電子サイクロトロン共鳴プラズマにおける高時間分解イオン温度計測に関する基礎研究

#### 【修士論文】

- ・ モンテカルロ軌道計算に基づく不純物イオンのピンチ速度と拡散係数の評価に関する研究
- ・ TOKASTAR-2 のプラズマ位置形状計算における渦電流磁場の三次元性の効果に関する研究
- ・ 直線型実験装置 NUMBER における非等方電子エネルギー分布計測のためのレーザートムソン散乱計測の開発
- ・ 直線型プラズマ装置 NUMBER における再結合プラズマ生成に関する研究

#### 【博士論文】

なし

## その他・特記事項

#### 【受賞】

- ・ プラズマ・核融合学会 第 39 回年会 若手学会発表賞(学生部門)  
D2 杉本みなみ 「ニューラルネットワークを用いたノイズの多い静電プローブ特性の解析」
- ・ 日本物理学会 2023 年春季大会 学生優秀発表賞 領域 2  
M2 矢ヶ崎 誇楠 「NUMBER の再結合プラズマ生成実験における高励起準位からの発光の観測」