

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 2名、博士前期課程 7名、学部 3名 (2018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、高エネルギーイオン、電子サイクロトロン加熱、磁場計測、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簡単な形状(平行四辺形および扇形)の局所コイルであり、トカマク型核融合炉への適用の可能な形式である。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。これまでに水平位置(径方向位置)の安定化を実証し、現在は垂直位置の安定化を試みている。

上記の垂直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り、磁場計算により評価しているが、ヘリカル磁場のみで閉じ込められたプラズマの計測と計算結果とは必ずしも対応していない。そこで、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実際に生成されている磁気面を推定する研究を行っている。

##### (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)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、(2)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、(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、具体的なテーマとしては、プラズマ浸漬式高エネルギーイオン生成法の開発、イオンエネルギー分析手法の確立、静電的および分光学的手法を用いたプラズマ計測、試験領域における高密度プラズマ維持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。

スペクトル形状に基づくプラズマ診断のため高波長分解能の分光器を開発した。TOKASTAR-2 トカマクプラズマや定常放電プラズマを分光計測し、ヘリウムイオンのスペクトルのドップラー広がりから長時間分解能でイオン温度を計測する手法を開発している。

#### (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無に解いて予測・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。特に、完全非誘導電流駆動の維持とダイバータ熱負荷限界を制約条件としてプラズマ性能を評価することを主眼とする。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、プラズマ物理、工学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 コードを開発している。PEC コードにより、銅コイルを用いた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。

## 2018 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】

プラズマの上下に設置した形状制御コイル(SCコイル)用のコンデンサバンク電源の整備が2018年度に終了し、SCコイルを用いた縦長断面プラズマの生成と縦長断面プラズマにおいて発生する垂直位置不安定性に対するヘリカル磁場印加効果の調査を行った。非円形度(楕円度)  $\kappa$  が上昇し、 $\kappa=1.1$  程度になっ

たときに垂直位置が不安定となりプラズマが上または下に移動した。移動量が約 6 cm に達した時にプラズマ電流の急減 ( $I_p$  クエンチ) が発生しトカマク放電は終了した。ヘリカル磁場を印加してもこれらの振る舞いあまり変化は見られなかった。今後は、下記のヘリカル磁気面計測の結果も踏まえ、ヘリカル磁場生成用各種コイルの電流値を調整して垂直位置安定化効果の大きい条件で実験を行う予定である。

#### 【磁気面計測】

2017 年度に作成した小型電子銃に加え、2018 年度には高空間分解能 (5 mm)、多チャンネルの電子収集プローブアレイを製作し、磁気面計測を行った。同プローブアレイは 15 チャンネルの検出板 (ステンレス製) が水平方向に並んでおり、ショット間に上下に移動させることでポロイダル断面での電子電流の 2 次元分布を取得できる。計測の結果、磁気面の存在を示すと思われるパターンが得られたがその形状は電子軌道計算の結果とは異なっていた。この要因としてはコイル形状の誤差やフィーダー線の影響が考えられる。磁気面計測をベースに垂直位置安定化に適したコイル電流値を探索する予定である。

#### 【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 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。TOKASTAR-2 を用いた実験により信号雑音比を得て、時間分解能の検討を行った。その結果、光学のおよび電磁的な多様なノイズが重畳されることが明らかとなった。高時間分解計測のために各ノイズ要因ごとの対策を現在行っている。

#### 【直線磁化プラズマの高密度放電モード】

これまでの NUMBER 実験において観測された高密度放電モードの形成機構について、運動エネルギーと磁気モーメントの二つの断熱不変量に基づくモデル化を行った。高密度放電モードの発現に必要な磁場強度について実験結果を説明できるモデルが構築できた。磁場強度以外のパラメータ依存性も説明できるようにモデル拡張に現在取り組んでいる。

#### 【プラズマ浸漬式高エネルギーイオン生成装置の開発】

高エネルギー水素イオンの発生源となる電極先端部について、コンディショニング時の温度制御を行うための埋め込みヒーターを設計製作し、昇温試験を実施した。裏面埋め込みの熱電対温度と表面温度の関係を今後明らかにする必要があるものの、600 K までの昇温と定温制御に成功した。またプラズマ中の高エネルギーイオンの検出に不可欠なエネルギー分析器を開発した。コレクター電極前面のグリッドに適切な電圧を印可することで、電子とエネルギーの低いバルクイオンのコレクター電極への流入を阻止し微量の高エネルギーイオンのみを検出することが出来る。NUMBER において到達可能な最高密度のプラズマにおいても電子とバルクイオンの排除が可能であることを実証した。

#### 【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を行い、軌道の磁気面からのずれや軌道の変形 (大半半径方向の伸縮) に基づいて不純物イオンの径方向移動速度 (ピンチ速度) を計算する。2018 年度には、軌道追跡計算コードを改良し、従来計算できなかった磁気軸近傍での軌道計算が可能となり、ピンチ速度を正

しく評価できるようになった。今後は、クーロン衝突の効果をモンテカルロ法で取り入れた軌道追跡コードによりピンチ速度を評価してモデル式と比較する予定である。

#### 【中性粒子ビーム入射電流駆動】

中性粒子ビームのプラズマ中での電離・荷電交換反応を計算し、高速イオンの発生分布を求めるモジュールをTOTALコードに導入した。既存のコード(ACCOMMEコード)とのベンチマークを実施し、良好な一致を確認した。また、高速イオンの分布関数の時間発展を計算するコードをトロイダル効果を考慮した計算を行えるように改良した。

#### 【Hモードモデルの高度化】

主プラズマ周辺部(ペDESTAL部)で熱拡散係数、粒子拡散係数が小さくなるHモードはITERおよび原型炉の標準的な運転モードと想定されている。TOTALコードにおいては、これまではHモードに必要な条件を考慮せず常にHモードとなっていると仮定していた。また、ペDESTAL圧力と比例則による予測値と整合しない場合があった。2018年度には、プラズマ表面を通過するパワーをHモード遷移閾値やLモード逆遷移閾値(Hモード遷移閾値の半分と仮定)と比較してHモード遷移・Lモード逆遷移をシミュレーションできるようにした。また、ペDESTAL圧力が比例則の予測値と一致するように調整する機能を加えた。これらの改良により、核融合出力の立ち上げ時や不純物入射時などパワーの時間変化がある場合についてより現実に近いHモードプラズマの模擬が可能となった。

#### 【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	4	1	1	6
学生	15	5	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】

- ・ 統合プラズマ輸送コードTOTALにおける遷移を伴う境界輸送障壁モデルの開発
- ・ TOKASTAR-2トカマクプラズマのイオン温度計測のための分光器開発
- ・ 視線積分計測値を用いた線スペクトル強度比法による円柱プラズマの径方向分布推定に関する基礎研究

#### 【修士論文】

- ・ プラズマ浸漬式高エネルギーイオン生成装置における水素吸蔵電極の温度制御機構の開発
- ・ 軌道追跡計算によるトロイダル回転に伴う不純物イオン輸送の解析
- ・ TOKASTAR-2における磁気面計測法の開発

## その他・特記事項

- ・特になし。