

# 1 筑波大学プラズマ研究センター

## (GAMMA 10)

### (1) 概要

筑波大学が掲げる教育・研究に関する第2期中期目標・中期計画に謳われた「双方向型共同研究等の新しい取組みを積極的に支援する。」という大学の方針と支援に応えるべく、本学プラズマ研究センターでは全国の大学や大学共同利用機関法人核融合科学研究所等と、緊密な連携のもとに第1期に引き続き共同研究を着実に推進していきます。

特に、我が国のプラズマ核融合研究の推進とそれを支える人材育成・教育、また社会に対するプラズマ核融合研究への理解や支援の土壌を醸成するためにも、大学個々の研究・教育の層を厚くすることが益々重要です。その面からも各大学の学生や多くの研究者、並びに当センターの約40名の学生を含めた形で、全国に展開した共同研究・相互交流を深めて行きたいと考えています。

前文にある双方向型共同研究の理念に沿って、筑波大学の特長を活かした要素還元型研究の課題推進を目指しています。研究テーマの柱は、特長である開放端磁場配位を活かした第1期中期目標・計画の中心テーマ「電位/電場によるプラズマ閉じ込め向上の物理研究」を発展・拡張し、「電位/電場等による境界プラズマを含むプラズマ輸送制御の研究」とし、従来のテーマに加え、現在、ITERや核融合炉にとって最も大きな物理課題であるダイバータ板の熱負荷を大きく低減するための境界プラズマ物理、さらには、壁との相互作用(PWI)に大きく踏み込んで行く計画です。プラズマ電子サイクロトロン加熱などを用いた高速電子制御による開放端部へ局所的な加速・放出やエンドプレート等を活用した、電位分布・径方向電場分布制御というミラー装置の独自性を活用し、従来の境界プラズマ制御ツールに、電位/電場等の効果を加え、境界プラズマを含むプラズマ輸送物理、制御に関する共同研究を実施します。さらに、プラズマ基盤・基礎研究の進展に資する課題に関しても共同研究を実施する計画です。

境界プラズマ、特に、トーラス系のスクレープオフ層のプラズマはミラープラズマに類似の開放端プラズマであり、内部輸送障壁(ITB/ETB)、さらには、軸方向/径方向輸送には、電位・電場等の形成が重要な役割を果たしており、軸方向、径方向熱・粒子輸送の解明制御や輸送障壁の物理機構究明にも繋がりますという点からも、重要な研究課題です。また、ダイバータコイルの導入によるセパトトリックス周辺のプラズマ物理の研究は、トーラス系のダイバータ磁場周辺のペDESTAL等の物理の解明にも貢献できると考えています。これらの方針から、次期中期計画に於ける新テーマの柱として、I. 開放端磁場配位を活用したダイバータプラズマ模擬により、ダイバータ板への熱負荷の軽減手法の研究、II. 片方の極小磁場配位に換えてダイバータ磁場配位の導入を計画し、新しい「境界プラズマ研究装置部」を開発と境界プラズマを含んだ磁力線に沿った方向と磁場に垂直方向の輸送研究を推進し、これらの境界プラズマ研究により、将来のITERや核融合炉において重要で急務な課題であるダイバータ実現に向けた研究に貢献したいと考えています。

本共同研究の推進と透明性の更なる向上のために、「はじめに」の3.の採択プロセスの説明で述べられたように核融合科学研究所内の双方向型共同研究委員会とセンター固有の内容について審査を行うセンター双方向型共同研究審査委員会とが有機的に連携して申請課題の審査を実施しています。センターの双方向型共同研究審査委員会は、学外の委員長の下に、半数以上を学外の委員で構成、より公開性と公平性をもたせています。また、双方向型共同研究に関するセンターへの外部からの要望を、より反映し易くすることも、この委員会の役目の一つです。

### (2) 最新の成果と現状

ガンマ10ではこれまでに電位生成理論・比例則を構築し、これに則した電位生成用ジャイロトロンの高出力設計・製作を行い、2006年までに、高温イオンモードに於いて実際にこの比例則に沿い、イオン閉じ込め電位を増大し、この10年来の最高値に比べ2～3倍に増大させることに成功しました。この高電位生成に伴い、半径方向電場及びその構造変化が形成され、これらの変化に伴い異常径方向損失の原因であるドリフト型の揺動が抑制されるなど、Hモードの物理に類似する現象が見出され、ミラーの特長を生かした電位の外部制御の端緒の実験に成功しました。また、双方向ならではの直接発電の実証や電位制御に直結したプラズマの回転計測などの研究も大きく進展しています。ジ

ジャイロトロン開発に於いても、NIFS との共同研究等で 28GHz と 77GHz で 1MW を超える発振に成功しています。

ガンマ10では、電子サイクロトロン加熱 (ECH) により形成された電位と共に、密度揺動や電位揺動が抑制されていることが観測されています。こうした電場構造については、トーラス装置のITB/ETB形成機構との関連の重要性が指摘されています。電場構造をより精度よく計測するための2点準同時計測法を取り入れ、データが出始めました。更にはミラー史上初めての大電力ECHをセントラル部に入射し、入射位置や偏波を最適化することにより、電子温度の大幅な増大を得ています。これにより高温イオンの電子ドラッグが急減して、セントラル部磁場閉じ込めイオン温度の上昇も得ています。また、ECHによる電子加熱効果の正確な評価に向けトムソン散乱装置の導入進行中です。このように、ガンマ10ではプラズマ・パラメータ改善に伴う「無衝突ミラープラズマ」を外部制御できるようになり、無衝突プラズマでの電場等の効果の究明、HモードやITB/ETB等の装置形式を超えた普遍性の高い研究、さらに、開放端を利用した境界プラズマへ輸送研究への新展開を行っており、今後の双方向型共同研究による「装置形式を超えた学術普遍性の究明とその活用」を追求する目的のもと、1つ1つ着実に取り組んでいるところです。

### (3) 今後の研究について

当センターでは、上記のような主要な方針に沿って研究を推進しており、「電位/電場等の効果」の物理機構解明等の開放端プラズマを活かした研究により、トカマク・ヘリカルプラズマ等に対する電位/電場の効果や境界プラズマ輸送物理を深化・拡張・学術普遍化することは、従来のプラズマ閉じ込め改善の物理に加え、今後の核融合研究の最重要課題であり、境界プラズマの輸送制御研究に対する必要不可欠な緊要な研究課題として取り組む計画です。

すなわち、現在の核融合研究における最も重要かつ緊急の課題の一つとして「高性能プラズマ閉じ込めとダイバータ板負荷の両立」が挙げられ、例えば、高Z材のタングステンが将来のダイバータ板の有力候補と言われながら、高熱/粒子負荷による高Z材不純物のプラズマコアへの逆流による閉じ込めの劣化をどのように防ぐかは、大きな課題となっています。このような必須課題を解決し、「高閉じ込めとダイバータ板の両立」を実現するには、① ELM 様パルス及び定常時の高熱粒子束制御、② 放射冷却プラズマの定常維持、③ コアプラズマへの逆流防止の不純物輸送制御 といった境界プラズマの輸送物理が重要であり、この物理を支配する大きな機構として電位・電場構造があります。

これまでに当センターで得られた電位によるプラズマ閉じ込めの改善に共通する物理が鍵となることから、上記の課題を解決することを目指して、今後数年間の期間を目途に、セパトロックスの磁場配位を持ち、ダイバータ磁場構造を可能にする新磁場コイル系へ向けた改造、並びに磁力線方向の高熱・粒子束の実験が可能となる新測定システム部と合わせて、ダイバータプラズマ等を詳しく研究できる境界プラズマ研究装置部を設置することを、計画しています。また、加熱装置等についても、入射位置や入射方法の見直しを行うことによって、より柔軟に新たな研究に対応できるように改造を施すことも視野に入れた計画を立てています。

一方、従来から推し進めているテーマにつきましても、④ 電位生成・電位効果の理論を統合すること を目指し、さらなる展開に向けた無衝突ミラープラズマを確立すべく、1 MW 級のジャイロトロンを開発して、共同研究を進めてゆくことを計画しています。これは特に、⑤ 径方向電場  $E_r$  のシアー分布制御による径方向輸送制御 を究明するという、H モード発生メカニズムに繋がりうる研究テーマであり、実際に既に、電場の対称性の良い場合、電位閉じ込めによるパラメータ改善が起こること。加えて、上記のように電場形成時において、径方向輸送の原因となるドリフト波や乱流様揺動が強く抑制される現象が観測され、著しい閉じ込め改善が達成されるという、実験結果が得られ始めています。このような物理現象の解明には、詳細な電位・電場の空間構造の計測が不可欠であり、現在センターの主幹計測器のひとつである金の中性粒子ビームを用いた電位計測器の高精度化を目指した改良が進められています。これまでに空間2点の準同時計測法が確立されており、近い将来、完全同時2点計測を目指した改造を計画しています。また、今年度から電位形成に深く関わるプラズマパラメータである電子温度の計測法としてレーザートムソン散乱システムを導入し、セントラル部プラズマの電子温度計測が開始されようとしています。今後、共同研究を通して、種々の条件で詳細に物理究明を行い、延いてはトーラス系に対する普遍化も念頭に置き、研究を推進してゆきます。また、新テーマIIと関連して、⑥ 新しい磁気ダイバータ配位による悪い磁場曲率部安定化 について、クルチャトフ研究所のパスツコフ博士と共に提唱し、普遍化を目指してきました。このダイバータ配位についても引き続き、MHD

安定化の新技术としての機能とともに、境界プラズマ研究への応用としての新たな展開の検討を進めたいと考えています。

#### (4) 具体的研究課題

今後センターとして達成すべき研究課題を以下に掲げるとともに、これらの実現に向け、また更なる研究の拡がりを得るべく、共同研究を推進したいと計画しています。

- ① 核融合実用化実現に必要な不可欠で未解決な研究課題であるダイバータ実現に向け、開放端磁場を活かしたダイバータ模擬実験などにより、以下の課題を解決するための準備研究。
  - ・開放端磁場配位を活かした定常及びパルス状高熱流粒子束の生成・制御に関する研究。
  - ・高熱流プラズマ粒子束と材料表面の相互作用に関する研究。タングステン材料など現在 ITER に向けたダイバータ板として挙げられている材料の特性の、より現実のダイバータに近い環境下で検証する為の研究。
  - ・ITER におけるプラズマ運転シナリオの鍵を握る非接触プラズマの定常維持制御に向けた研究。不純物輸送等ダイバータプラズマ環境下における原子分子過程等の物理解明。
  - ・ガンマ 10 エンドに設置されている大容量液体ヘリウムクライオポンプ ( $9 \times 10^5 \text{L/sec}$ ) を活用したエンドダイバータ排気の研究。
  - ・核融合炉において将来問題となるトリチウムインベントリを最適化する為の鍵となるダイバータ部におけるダスト形成とその挙動解明。
- ② 電位/電場等の効果によるプラズマ閉じ込め向上/輸送の物理機構の解明の研究。
  - ・軸対称性の良い電場形成時において観測される、ドリフト波や乱流様揺動の強い抑制現象や、閉じ込め改善が達成される実験結果を、種々の条件で詳細に研究・究明。トラス系に対する普遍化をも目指した研究。また、ITB の生成機構等に関連し、渦構造の性質・役割についても、実験・理論両面からの研究の推進。
  - ・高強度波動加熱等に基づく、新パラメータ領域での電位生成・電位閉じ込め研究の展開。特に、ECH 用の 1 MW ジャイロトロンを開発を行っており、MW レベルの ECH を用いた高電位生成プラズマ閉じ込め実験に向けた研究。
  - ・また、コアプラズマの性能を左右する周辺・境界部プラズマの研究について、電位生成・閉じ込め改善と深く関連した重要な課題として、周辺部プラズマ揺動・回転計測等の重点化。
  - ・電位生成・電位閉じ込め研究の基盤となる高時間・空間分解電位計測ならびにミラープラズマ中の電子温度計測に関する研究開発。
- ③ 新たな高効率閉じ込め・ダイバータ配位の研究・展開。
  - ・新しい磁場配位、並びにダイバータ新配位（ダイポール磁場に相似）による、悪い曲率を持つ磁場部の安定化の研究、並びに境界プラズマ研究への応用。
  - ・ダイバータ新配位におけるプラズマ生成・加熱と制御に向けた準備研究。
  - ・ダイバータ新配位においてセパトリックスを挟むプラズマ輸送（磁力線に沿った輸送とセパトリックスを横切る輸送）に関する研究。
- ④ 直接発電・プラズマ応用・プラズマ基礎基盤研究等の実施。
  - ・開放端磁場を用いた直接発電の基盤研究や端損失粒子を熱源、粒子源として応用するための基礎実験・研究を行う。
  - ・種々のプラズマ応用、プラズマ加熱並びにプラズマ計測研究開発や加熱・計測の応用研究を行う。
  - ・壁コンディショニングを効率的に進める手法に関する研究
  - ・プラズマの基盤・基礎実験の進展・萌芽の醸成に努める。

#### (5) GAMMA 10 装置の概要

##### ○ 本体

・中央部 長さ：6 m。プラズマ直径（リミター径）：36 cm。磁場：0.4 T。

- ・東・西 アンカー部 長さ：4.8 m。 中心磁場（極小磁場）：0.6 T、ミラー磁場：2 T。
- ・東・西 プラグ／バリア部 長さ：2.5 m。 ミラー磁場：3 T。  
（バリア部磁場：0.5 T。 プラグ部磁場：1 T。）
- ・準定常磁場持続時間：0.3 s。 但し、必要に応じ延長可能。 各部の磁場は夫々独立に変更可能。

#### ○ 真空排気装置

- ・液体ヘリウムクライオポンプ： 東西アンカー部 ( $3.5 \times 10^5$  L/sec) 各1カ所、東西エンド部 ( $9 \times 10^5$  L/sec) 各1カ所。
- ・クライオソープションポンプ ( $10^4$  L/sec)： セントラル部4カ所、東西プラグバリア部各1カ所、東西エンド部各1カ所。
- ・ターボ分子ポンプ (1500～3000 L/sec)： セントラル部2カ所、東西アンカー部1カ所、東西エンド部1カ所。

#### ○ 加熱装置

プラズマ ガン：1 kV、10 kA、1 ms 2台 (2004年度新規作成)

ECH：プラグ部 28 GHz、500 kW、100 ms 2台 (2006年度増力)

バリア部 28 GHz、200 kW、75 ms 2台

セントラル部 28 GHz、500 kW、100 ms (2007年度長パルス化)

アンカー部 1MW ジャイロトロン用電源増力 (2007年度)

NBI：セントラル部NBI 25 kV、0.75MW、0.1 s 1基 (入射角90度固定、電源は東側ポンピングNBIと切り替えて使用)

アンカー部NBI 45 kV、3.6 MW、0.1 s 東西各1基 (入射角82度固定)

スロッシングNBI 25kV、1.75MW、0.1 s 東西各1基 (入射角41度固定)

ポンピングNBI 25 kV、1.75 MW、0.1 s 東西各1基 (入射角30度固定、東側は電源をセントラルNBIと切り替えて使用)

ICRF：7.5～15 MHz、300 kW、500 ms 2台

4.8～9.6 MHz、300 kW、500 ms 2台 (高出力化を予定)

36～72 MHz、200 kW、500 ms 1台

固体水素ペレット入射器：パイプガン式、銃身数8 ( $\phi 0.39 \times 2$ 、 $\phi 0.58 \times 4$ 、 $\phi 0.79$  と  $\phi 0.9 \times 1$ )

#### ○ 計測機器

HIBP (金の中性粒子を用いたビームプローブ：サーマルバリア部、セントラルソレノイド部、プラグ／バリアの内側ミラースロート部)、レーザートムソン散乱装置 (セントラル部)、マイクロ波診断装置 [4mm干渉計 (中央部は可動ホーン型 及び 6ch分布計測、西プラグ部は位相イメージ法、その他各セル毎に固定型)、反射計 (中央部に超短パルス型、高速周波数掃引型)、フラウンホーファー法 (中央部)]、端損失イオン・エネルギー・スペクトル計測器 (固定型、可動型、5 chアレイ型8台;プラグ電位計測・イオン温度計測用)、ECE (西プラグ部)、CPS装置 (中央部)、端損失イオンの速度分布関数測定器 (ELECA)、VUV分光装置、SX分光装置、紫外・可視分光装置、H $\alpha$ 検出器アレイ (セントラル部12ch $\times$ 12ch、スロート部5ch、バリア部5ch)、反磁性コイル、静電プローブ、磁気プローブ、NPA (電荷ストリッピング型30keV、空間スキャン可)、H $\alpha$ 線検出器 (セントラル部軸方向6点、アンカー部軸方向3点、内2点は5ch分布計測可)、真空度計測 (ヌードゲージ7点)、残留ガス分析 (3点)、表面分析ステーション (セントラル部1点、昇温脱離分析)、X線波高分析器 [Pure Ge計測器、新型Ultra-Low Energy Ge計測器 (2台)、Si (Li)計測器、NaI (Tl)計測器]、X線トモグラフィ-MCP計測器 (50ch) (2台)、半導体X線トモグラフィ計測器アレイ (48ch) (2台)、新型マトリックス型半導体X線計測器 (7 $\times$ 6ch) (2台)、SSB、新型多層型高エ

エネルギーX線分析器、中性子計測器〔 $^3\text{He}$ 計測器（2台）、液体シンチレータ計測器、 $\text{BF}_3$ 計測器〕、TOF計測器、荷電交換粒子計測器、その他。

○ その他

ECR放電洗浄装置（500 kW 定常磁場電源、2.45 GHz マイクロ波発振器 1.5 kW×2）

炭素繊維材を用いた水素排気・リサイクリング制御実験装置

尚、法人化に対する当センターの中期目標・中期計画等は、<http://www.prc.tsukuba.ac.jp/objectives> を併せてご覧下さい。