



流体工学研究室 概要

- ・ 機能的流体と流体制御を用いた高効率エネルギー源の研究に挑戦
- ・ 留学生の数が全体の約半数を占めており、英語や中国語が飛び交うグローバルな環境かつ様々なバックグラウンドをもつ人材が集まる
- ・ 通常の中性流体を扱う研究グループもいるためプラズマに限らず幅広く流体を研究している

Keywords: プラズマ, 計測技術, 電気推進, カーボンニュートラル, 数値シミュレーション

ITER計画及びBA活動への貢献

- ・ 小型装置を活用し工学基盤を担う人材を育成
ハンズオン教育を通して理論と実践を兼ね備えたR&D人材・エンジニアの育成
- ・ 先端計測技術開発
ハイスピードカメラでのステレオ撮影による3次元トモグラフィ計測
- ・ トカマク型装置PHiXでの実験に向けた準備
安定な高橋円度プラズマの生成に向けた先進トカマクの基盤を構築

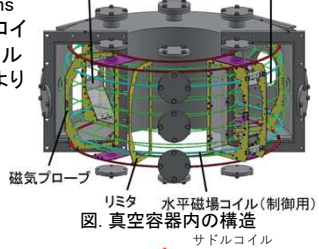
トカマク型装置 PHiX

- “Plasma with Helical Fields Initiative eXperiments”
- ・ サドルコイルによるステラレータ磁場を印加することで、不安定性を制御し安定な高橋円度プラズマ放電の実証を行うための装置。
 - ・ 重水素放電が可能な放射線総合実験棟への移転するため、移動が可能なサイズまで解体中。
 - ・ PHiX装置は大半径33cm、小半径9cm、橋円度 $\kappa=1.8$ の小型トカマクであり、最大トロイダル磁場は0.3T、プラズマ電流は約5kA、放電時間は5ms以下である。トロイダル磁場コイルは16本、ポロイダル磁場コイルは6本、ジュール加熱用OHコイルおよび高速制御用コイル2本を備え、これらにより磁気配位制御が可能である。

表. PHiXの装置パラメータ

大半径 R_0	33 cm
小半径 a	9 cm
橋円度 κ	1.8
プラズマ電流 I_p	< 5 kA
トロイダル磁場 B_t	< 0.3 T
放電時間 t	< 5 ms

ステンレス製保護板 フラックスループ



磁気プローブ リミタ 水平磁場コイル(制御用) サドルコイル
図. 真空容器内の構造

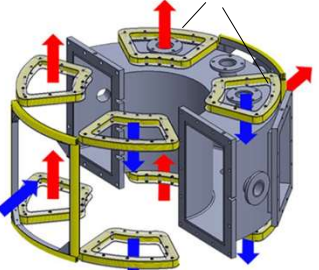


図. サドルコイルと印加磁場の向き

トロイダル磁場コイル ポロイダル磁場コイル

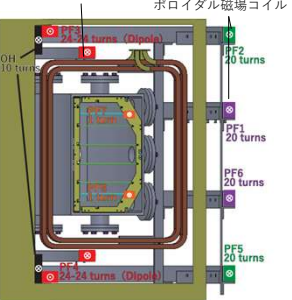


図. OH、PFコイルの位置と巻き数



図. 解体の様子

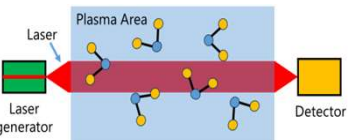
計測装置開発

- ・ 将来の核融合炉を念頭に置いた計測手法の開発に取り組んでいる
- ・ 実際の計器製作に際しては、学内の工作工場を利用
- ・ プローブ・干渉計・分光計といった基盤計測の他、高速カメラや分光イメージングを用いた先進計測技術の開発、および計測した情報から物理量の分布を算出するトモグラフィ解析にも取り組む

吸光分光計測

- イオン温度
- イオン速度 を計測

LAS法 (Laser Absorption Spectroscopy)を応用した3D速度場計測手法の開発により、プラズマの3次元的な挙動を解明する



LAS法
レーザーを照射し、その光路にある原子・分子による光の吸収を測定する。

ステラレータ型装置 HU-Heliac

- ・ 小型装置を活用した工学の人材育成
ハンズオン教育を通して理論と実践を兼ね備えたR&D人材・エンジニアの育成
- ・ 小型装置の柔軟性・長時間放電を活用した核融合プラズマの素過程理解
多種イオンプラズマの輸送(同位体混合と不純物・中性粒子輸送)の理解

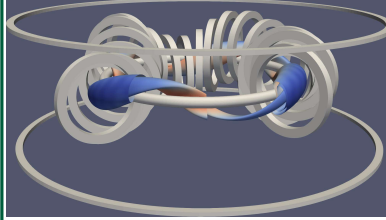


図. 磁気面とコイルシステム

表. HU-Heliacの装置パラメータ

大半径	480 mm
小半径	60 mm
電子温度	< 100 eV
電子密度	< 10^{18} m^{-3}
磁場	0.1 T
加熱方法	定常マグネトロン



図. HU-Heliacの外観

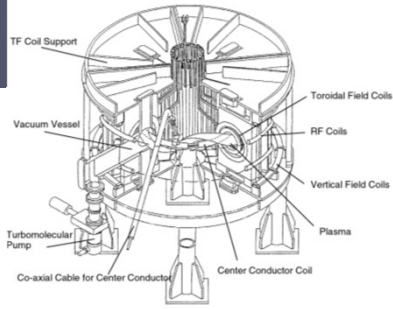


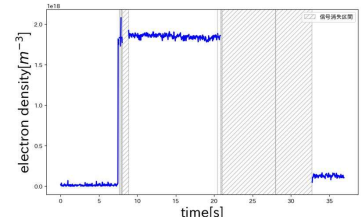
図. HU-Heliacの構造

ファーストプラズマを達成！(中心導体のみに通電し292 Gの磁場を生成Arプラズマの放電に成功)



ポロイダル磁場のみであるため、プラズマはトロイダル方以降へ周回していない

- ・ キャパシタバンクを完成させ、近日中にヘリアック磁場配位閉じ込め実験を実施
- ・ 長時間放電(60sec)を目標



ミリ波干渉計によると $\bar{n}_e \sim 2 \times 10^{18} \text{ [m}^{-3}]$

ハイスピードカメラを用いた計測

- ・ プラズマをハイスピードカメラで複数方向から撮影し、3次元の密度などの分布を推定する。



高速カメラ
測定部2つで被写体をステレオ視することで、3DTモグラフィ法を実現する。

プローブ計測

- 電子温度
- 電子密度
- 浮遊電位
- プラズマ電位 を計測

▶ シングルプローブ

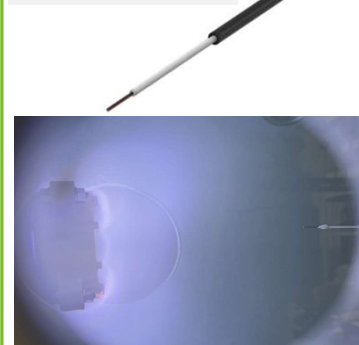


図. 最大挿入時のArプラズマ測定

▶ ダブルプローブ

【条件】 マイクロ波出力：100W
【計測回数】 Ar：4回 CO₂：4回

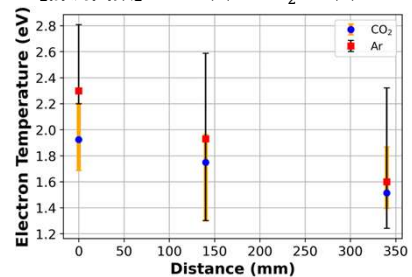


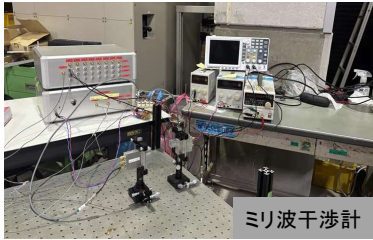
図. 異なる推進剤と異なる測定位置における電子温度の比較



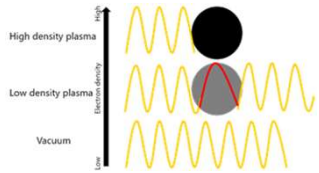
図. プローブと真空保持部

干渉計測

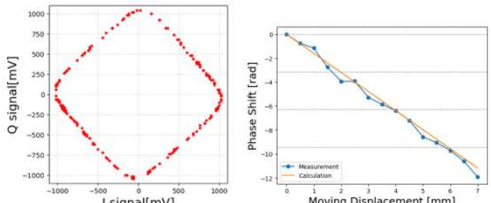
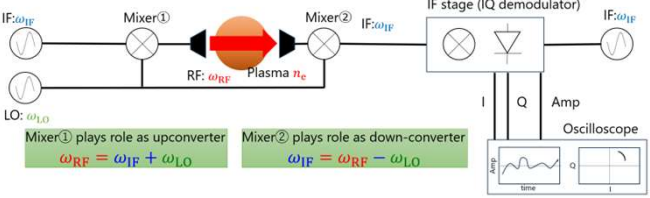
電子密度を計測



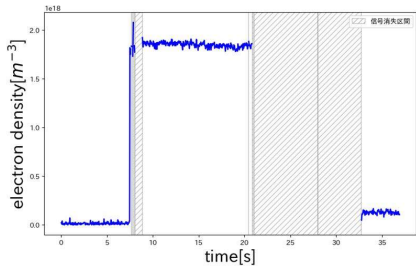
ミリ波干渉計



プラズマにミリ波を照射し、光路長変化を測定することで電子線密度を測定する



(a): アンテナで受信した信号をIFステージで処理したIQ信号
(b): IQ位相信号から算出した位相シフトと理論値との比較



HU-Heliacプラズマを計測した結果: $\bar{n}_e \sim 2 \times 10^{18} \text{ [m}^{-3}]$ 測定対象のHU-Heliacプラズマの様子



可視分光計測

イオン温度
イオン速度を計測

プラズマ乱流による輸送を低減したい→プラズマ乱流速度場と輸送量の関係を明らかにする必要がある。特に、将来の核融合プラズマでは重水素と三重水素、ヘリウムの多種イオンのプラズマとなり、準中性条件の束縛が解かれるために、イオン種毎に評価すべきであるが、イオン種毎の揺動特性の評価はほとんど行われていない。可視分光計測で多種イオンプラズマでイオン種毎に温度、速度を計測する。

・ドップラー広がり

$$\Delta\lambda_{DB} = \frac{\lambda_0}{c} \sqrt{\frac{8kT_g \ln 2}{m_g}}$$

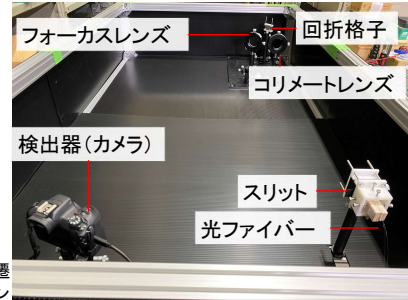
→ イオン温度が測定可能

・ドップラーシフト

$$\Delta\lambda_{DS} = \lambda_0 \frac{v}{c}$$

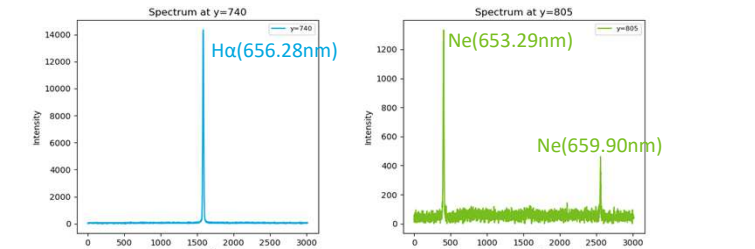
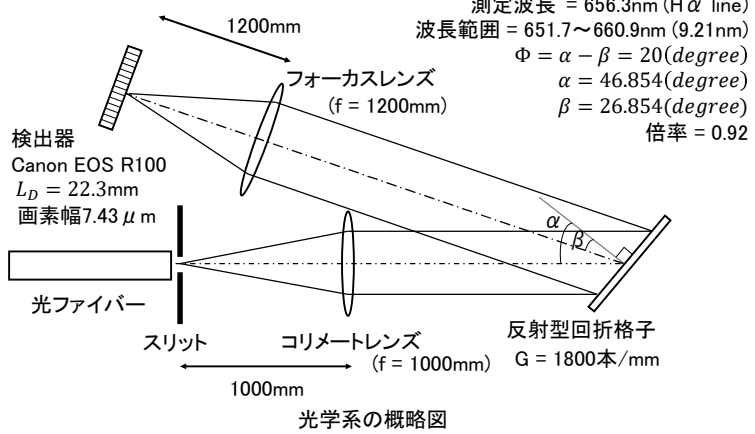
→ イオン速度が測定可能

($\Delta\lambda_{DB}$: ドップラー広がり, $\Delta\lambda_{DS}$: ドップラーシフト, λ_0 : 発光スペクトル中心波長, v : イオン速度, T_g : 遷移種のイオン温度, m_g : イオン質量, k : ボルツマン定数, c : 光速)



開発した可視分光器の写真

・光学設計 ツェルニーターナ型分光器



水素ランプ、ネオンランプから得られたスペクトル

・装置性能

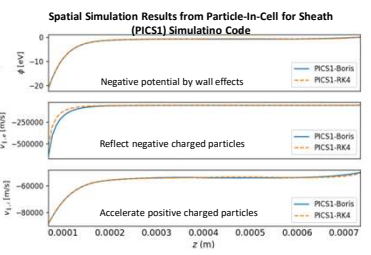
- $d\lambda/dx = 0.411 \text{ nm/mm}$ (逆線分散)
- $d\lambda/\text{pixel} = 0.00305 \text{ nm/pixel}$
- $\Delta\lambda \text{ (FWHM)} = 0.046 \text{ nm}$ (15 pixel) (@スリット幅105 μm = 光ファイバーコア径)
- 測定波長範囲 = 652 nm ~ 661 nm

Hα線においてイオン温度 1 eV以上、イオン速度 3 km/s以上の測定が可能
複数種のイオン H(軽水素)、D(重水素)の分光も可能

数値シミュレーション

多種イオンプラズマに対するPICコードの開発

- 高度なモデリング: Particle-In-Cell (PIC)シミュレーションは、ダイバータ付近の開放型磁場領域を効果的にモデル化するものである。
- 運動学的精度: この手法は、質量と電荷の異なる粒子の複雑な挙動を運動論的に正確に捉えることができる。
- 臨界相互作用: このシミュレーションは、電磁場の影響下でプラズマが壁面に衝突する過程を明らかにすることが可能。

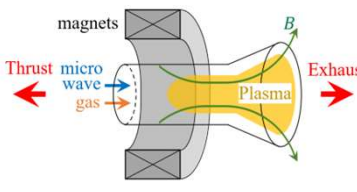
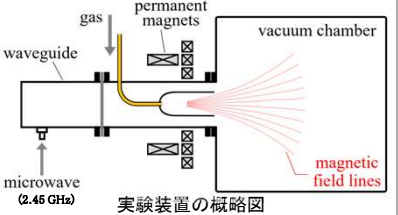
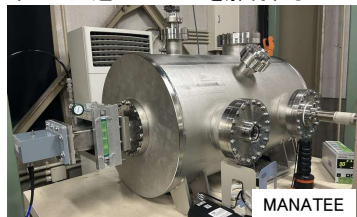


プラズマ技術の応用

宇宙推進

MANATEE (MAGnetic NOzzle ACceleration Thruster with Electrodeless Experiments) 半導体マイクロ波共振器と永久磁石を用いたECRプラズマ装置

電極を持つ従来の電気推進では、電極損耗のために長期ミッションでの使用に課題がある。そこで、永久磁石による磁気ノズルと、半導体ベースマイクロ波共振器による加熱機構を用いた無電極ECRプラズマスラスト実験装置を製作した。磁気ノズルでのプラズマ加速メカニズムを解明することにより、新たな機構での推進機開発に役立つ。

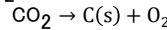


アルゴンプラズマ生成の様子

カーボンニュートラル

・CO₂分解

プラズマ分解
プラズマを用いてCO₂を工業的に価値のあるC(カーボンブラック)とO₂に分解したい。



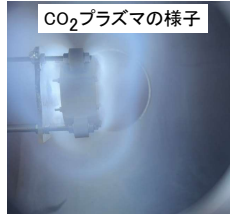
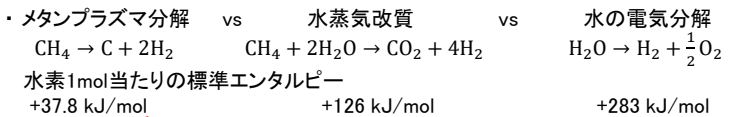
- CO₂分解に必要なコスト削減(生成したCを材料として利用可能)

【目標】

- 分解効率の定量的評価
- 炭素収率向上

・メタン分解

- 水素は液化して運搬のための冷却コスト・手間がかかる → 使用する場所で水素を生産したい
- メタンCH₄(天然ガスの主成分) vs アンモニアCH₃
 - 毒性なし vs 毒性あり 危険
 - 安定的な化合物で分解困難 vs 沸点: -33°C
 - CH₄ → C + 2H₂ (カーボンブラック) vs 2NH₃ → N₂ + 3H₂
 - も生成: ターコイズ水素



CO₂プラズマの様子



メタンプラズマの様子