

2023年度 核融合科学研究所 ユニット成果報告会 2024年5月8日

# 直線装置 (HYPER-I, TPD-II) における研究の展開

核融合研科学研究所 研究部 プラズマ・複相間輸送ユニット

吉村信次

# プラズマ・複相間輸送ユニット における研究の3本柱

- 周辺プラズマ輸送・粒子制御
- プラズマ・壁相互作用, 炉工学
- 弱電離プラズマ・光・物質相互作用

ユニット設立報告会資料より

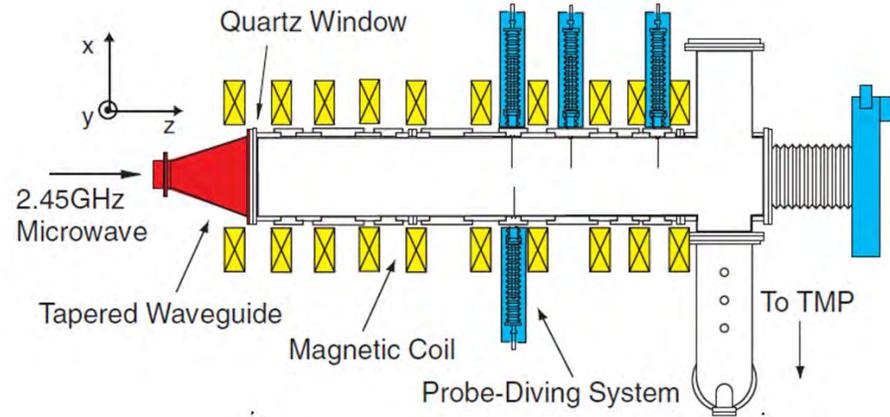
## この目的に対して 直線装置 ができること、その波及効果

- 開いた磁力線領域における粒子輸送
- 弱電離プラズマ、新しい計測法の開発
- ダイバータ模擬、非接触プラズマ
- 固体材料、液体金属とプラズマの相互作用

自発的構造形成、プラズマ推進器  
光物質相互作用、プロセスプラズマ  
熱・粒子輸送と安定性、原子分子過程  
材料開発、液体金属壁

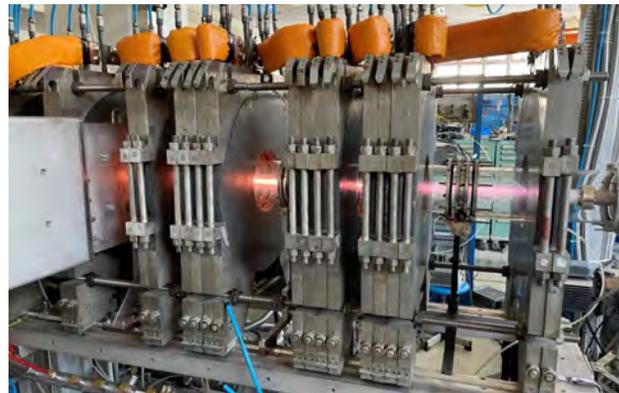
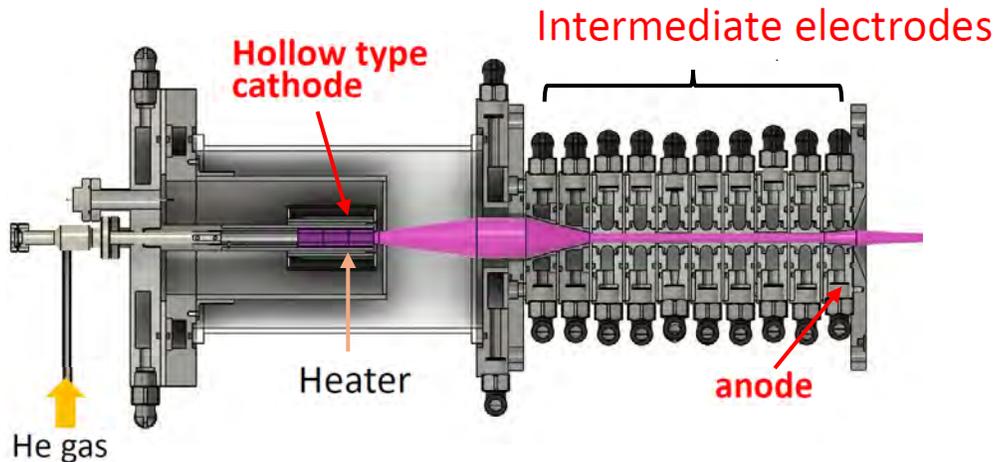
# 核融合科学研究所の直線装置

## HYPER-I (High density Plasma Experiment - I)



2.45 GHz のマイクロ波を用いた ECR 放電

## TPD-II (Test Plasma by Direct current discharge - II)



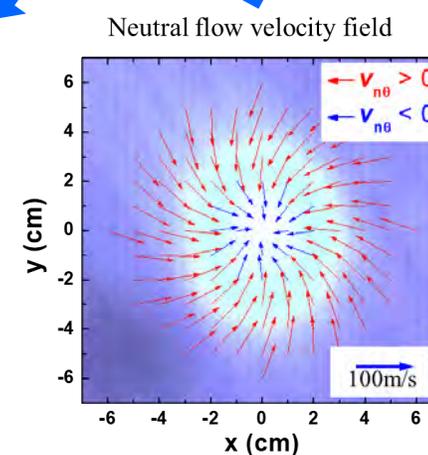
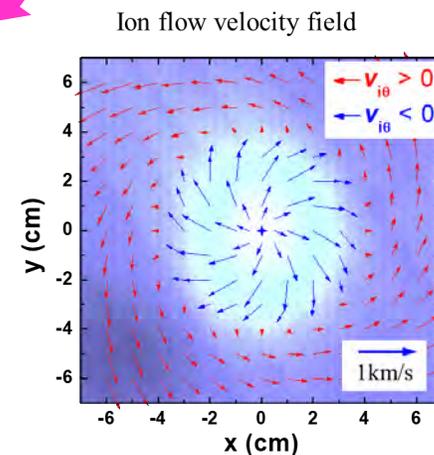
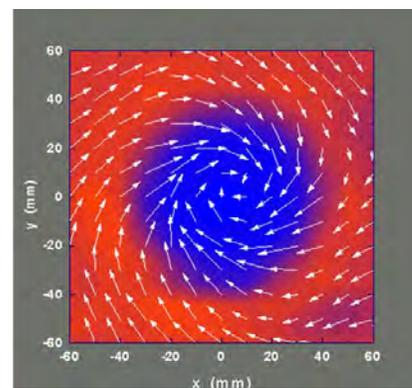
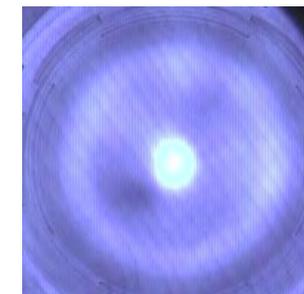
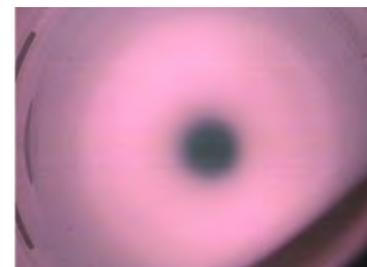
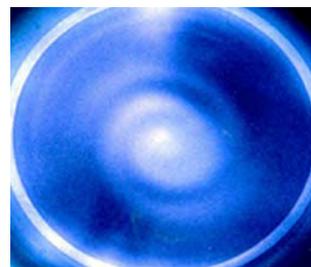
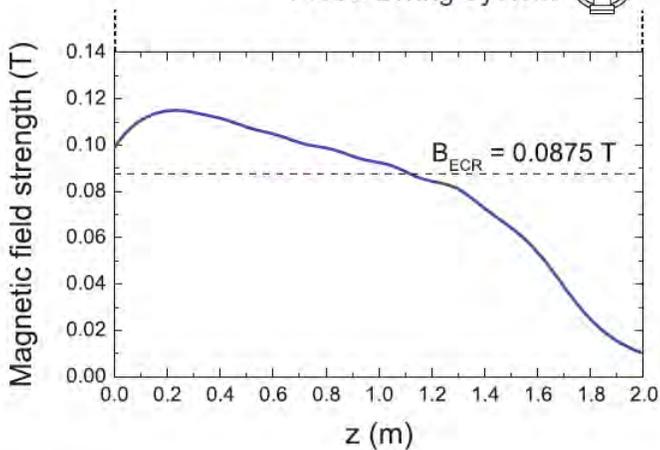
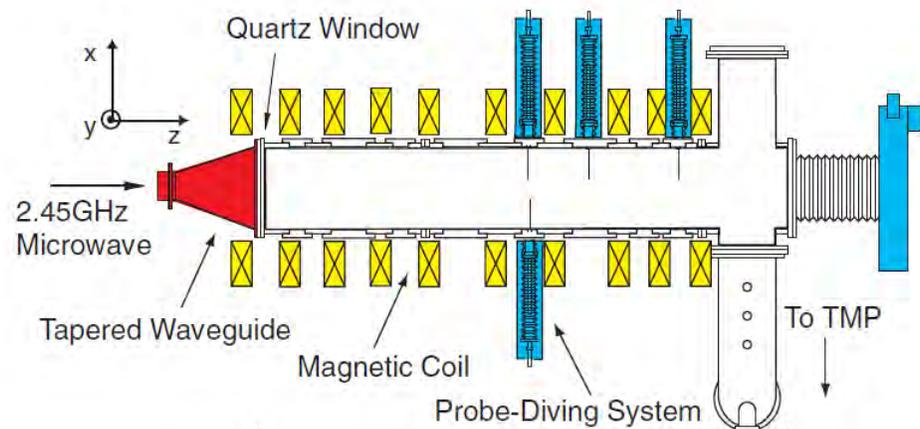
傍熱型ホローカソード陰極を用いた 直流放電

# HYPER-I

右回り円偏波のマイクロ波を強磁場側( $\omega/\omega_{ce} < 1$ )から入射することで電子サイクロトロン波(ECW)を励起、電子サイクロトロン共鳴(ECR)により高密度プラズマを生成.

M. Tanaka et al., J. Phys. Soc. Jpn. **60**, 1600 (1991).

## 自発的構造形成

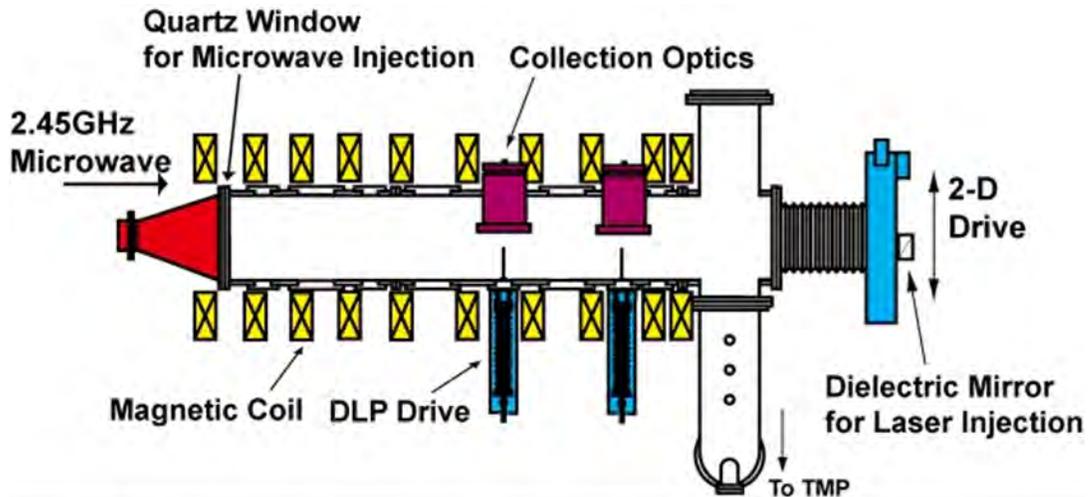


S. Yoshimura et al., J. Plasma Phys. **81**, 345810204 (2015).

流れ（渦）を伴う密度構造

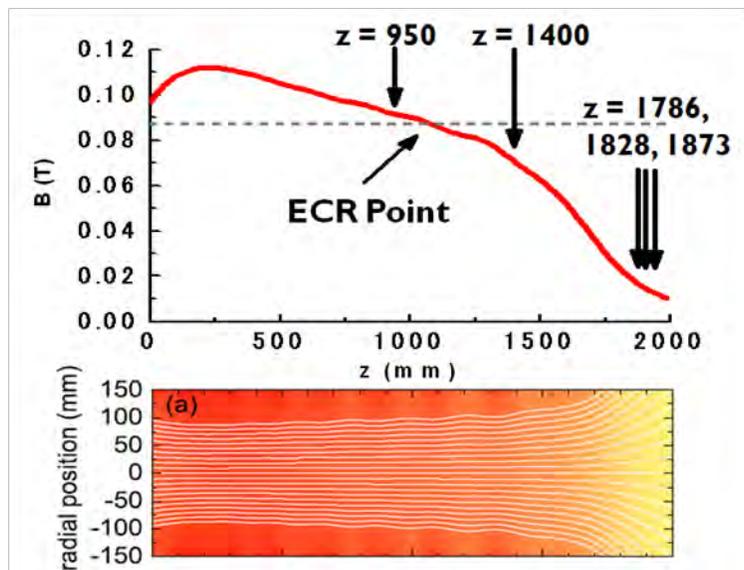
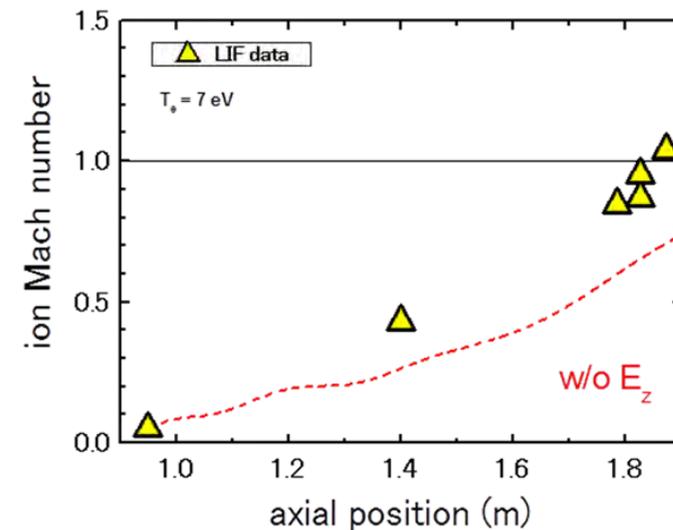
# HYPER-I

## 開いた磁力線における輸送、弱電離プラズマ

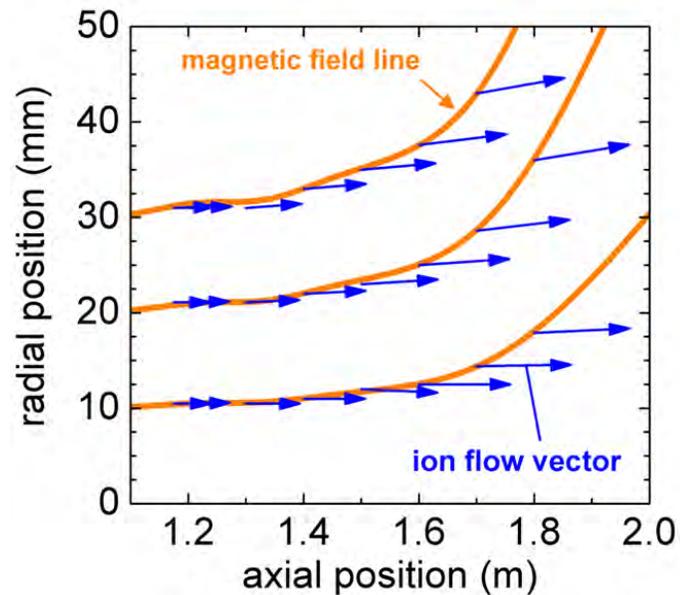


- 方向性プローブ
- レーザー誘起蛍光法

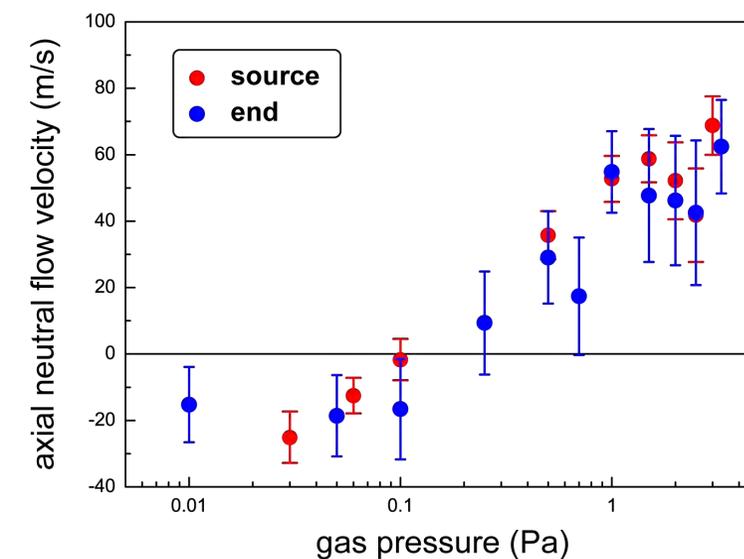
## イオン流速の加速



## 発散磁場領域のイオン流れ



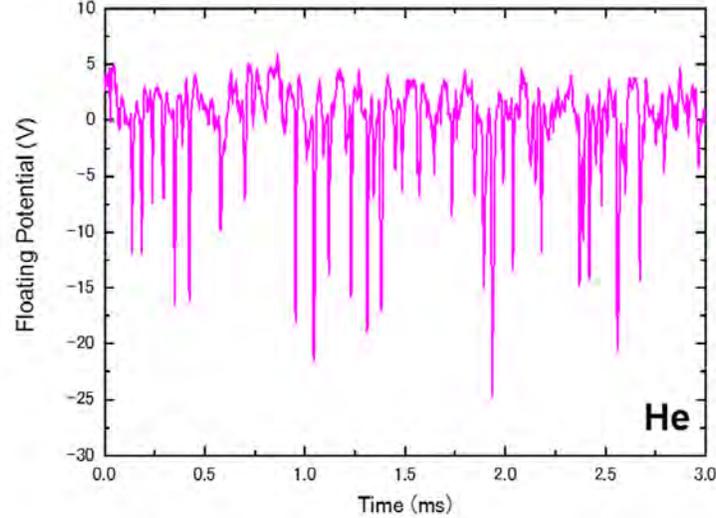
## 中性粒子流れの逆転



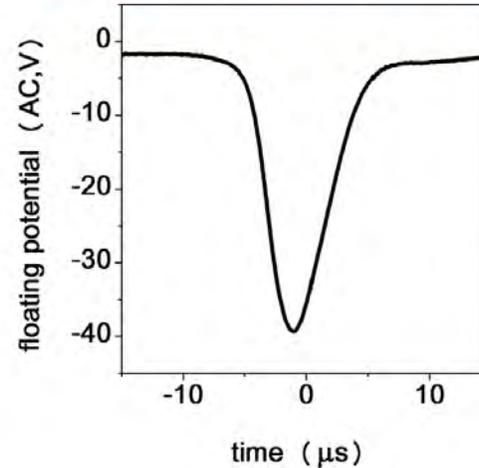
# HYPER-I

## 弱電離プラズマ、突発現象（間欠的高温電子バブル）

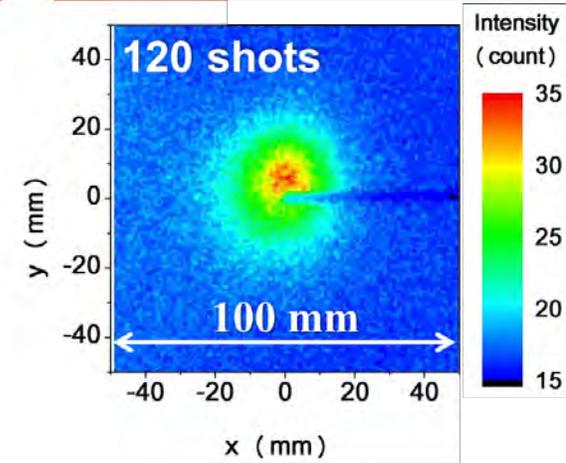
Spontaneous Floating Potential (Vf) Fluctuation



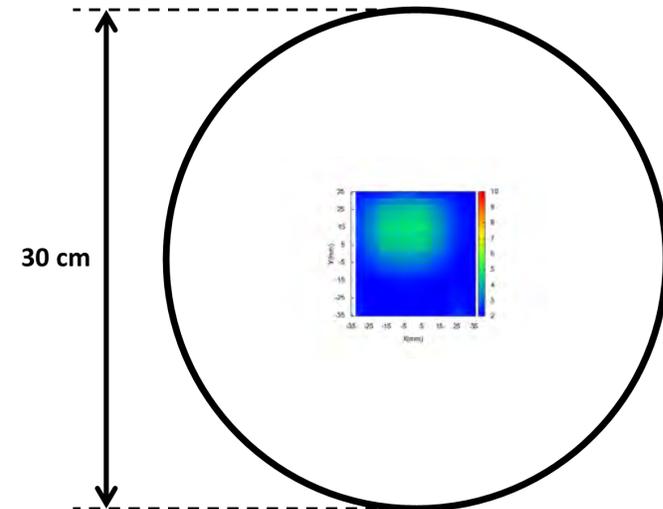
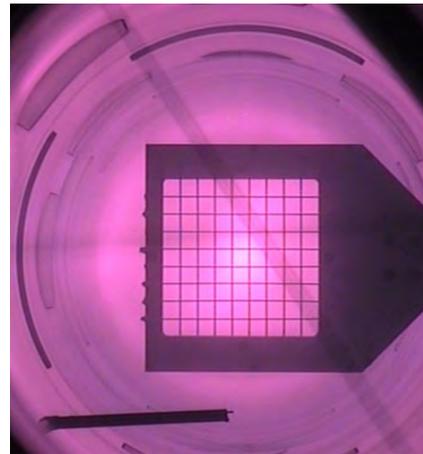
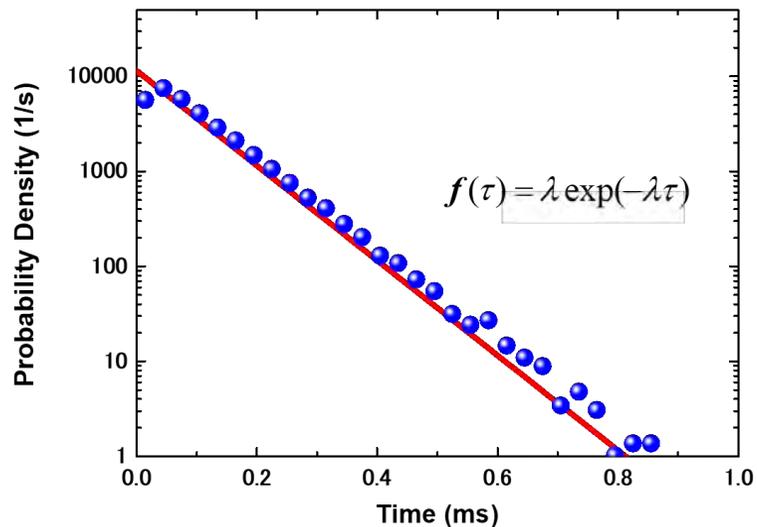
Floating Potential Signal on Ref. Probe



2D Intensity Distribution of He-II (468 nm)



Statistical Property of Waiting Time (Exponential Distribution)



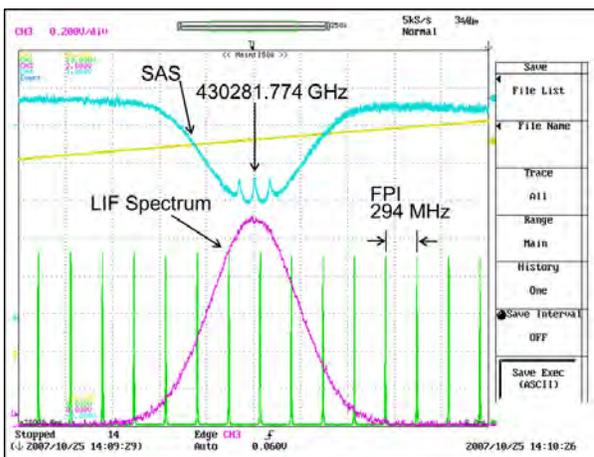
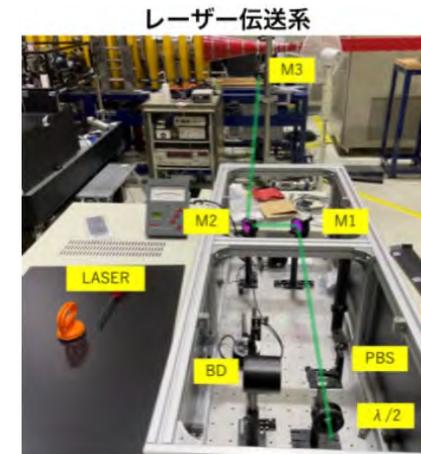
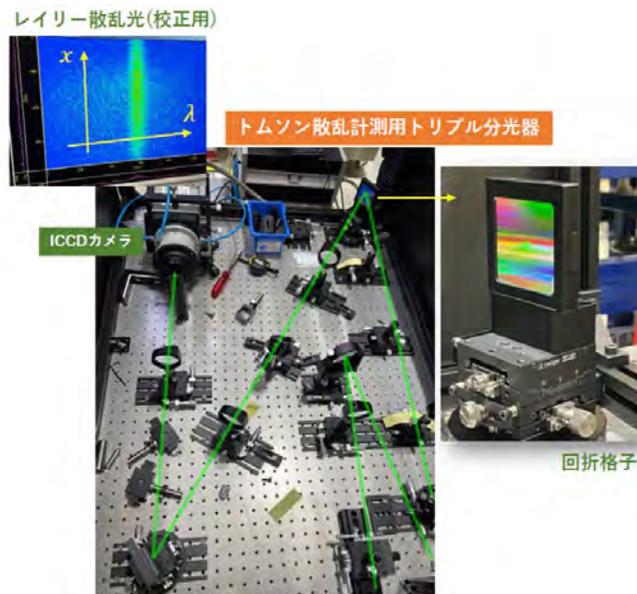
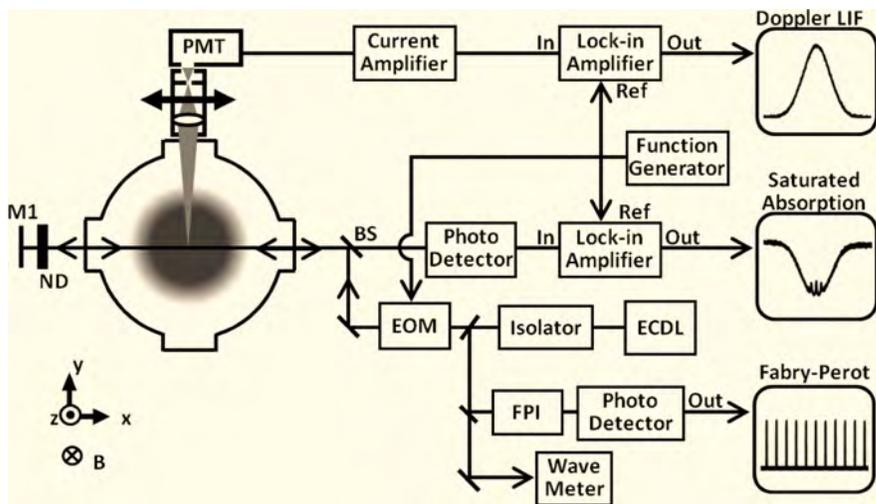
名古屋大学  
NUMBER装置  
との比較研究  
が継続中

# HYPER-I

## レーザー計測

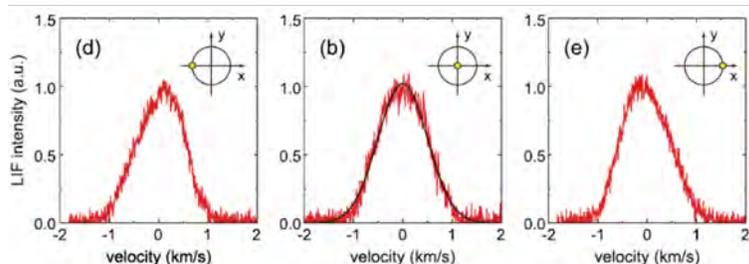
## HYPER-Iにおけるトムソン散乱計測

### LIFと飽和吸収分光を組み合わせた 中性粒子流れ計測



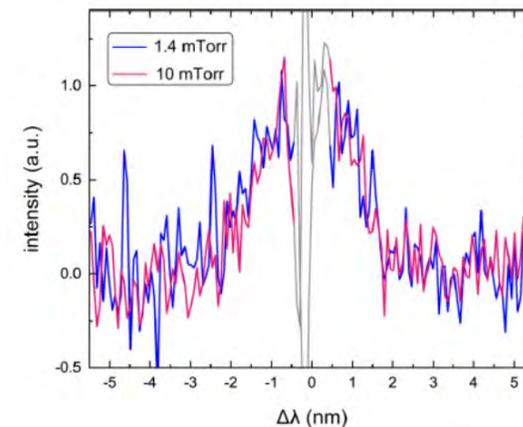
### Asymmetry VDF (neutral depletion)

K. Terasaka et al., PoP 2016



2024年度に  
ICCDカメラを  
更新する計画

2022年1月ファーストデータ

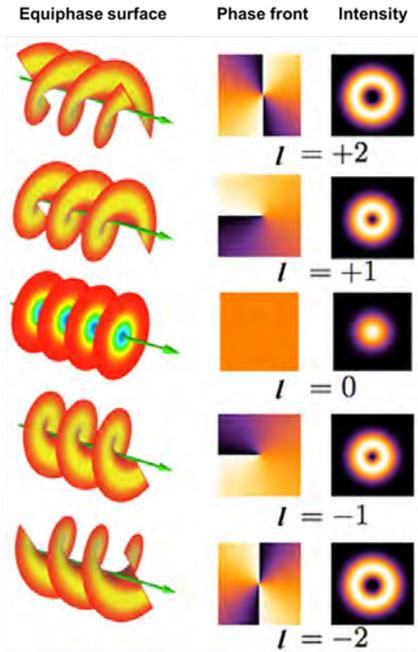


Electron temperature  $T_e$  (eV):

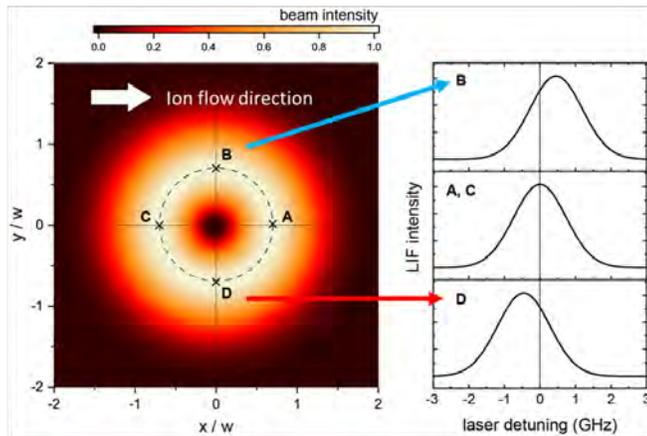
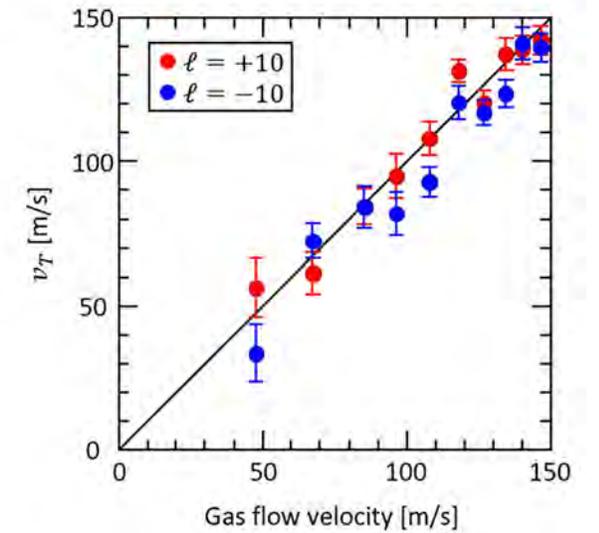
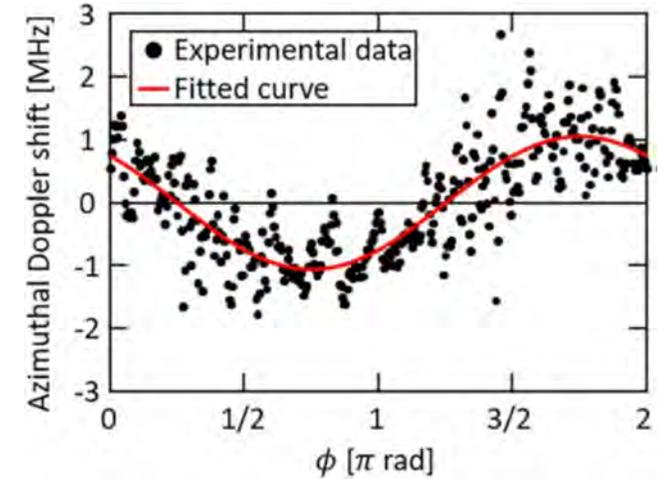
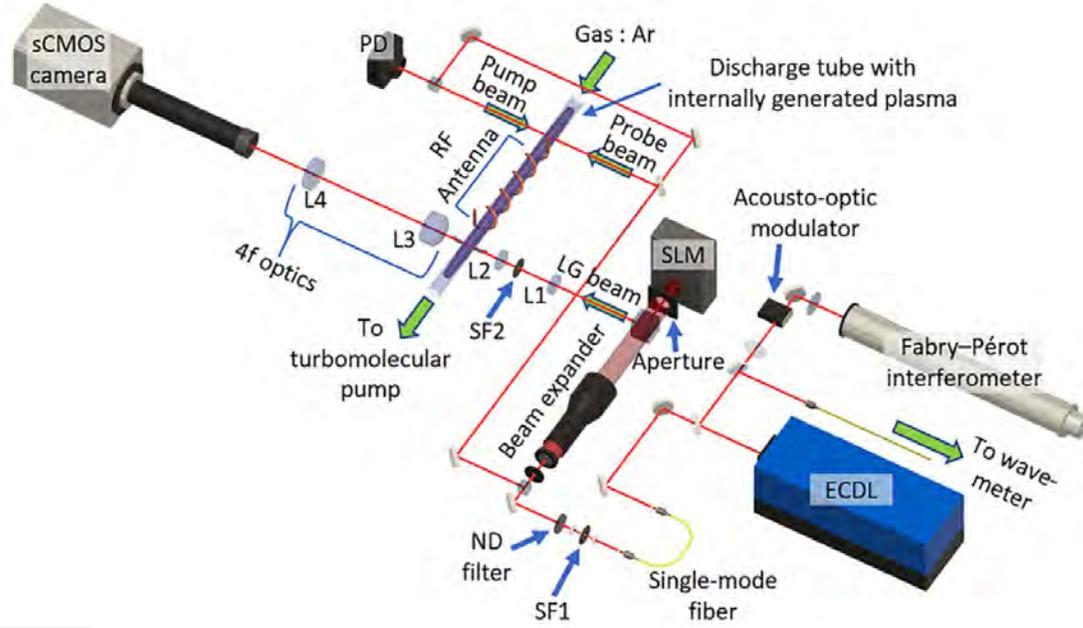
1.4 mTorr...  $1.37 \pm 0.22$

10 mTorr...  $1.01 \pm 0.10$

# 光渦レーザー（ラゲールガウスビーム）を用いた新しい計測法



(From [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Helix\\_oam.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Helix_oam.png))



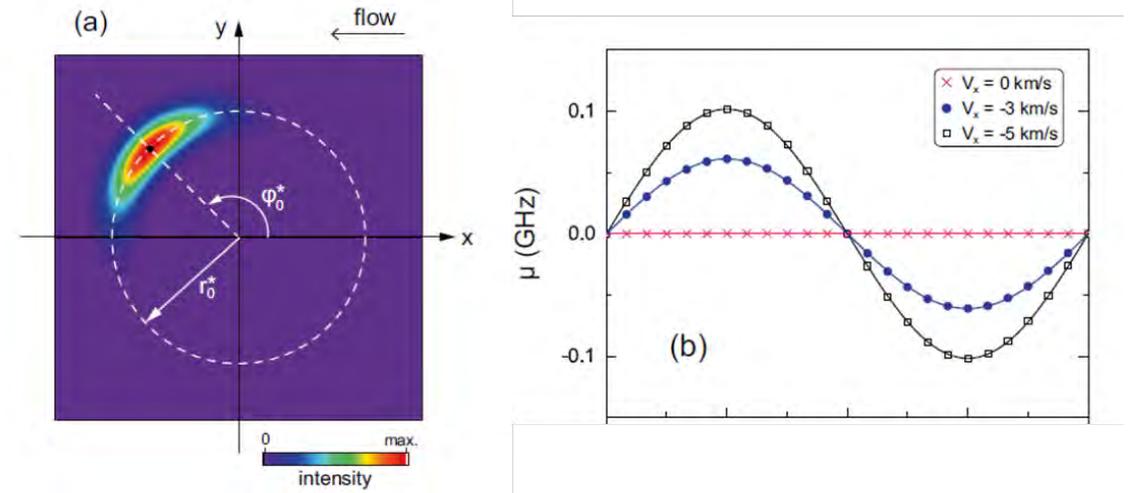
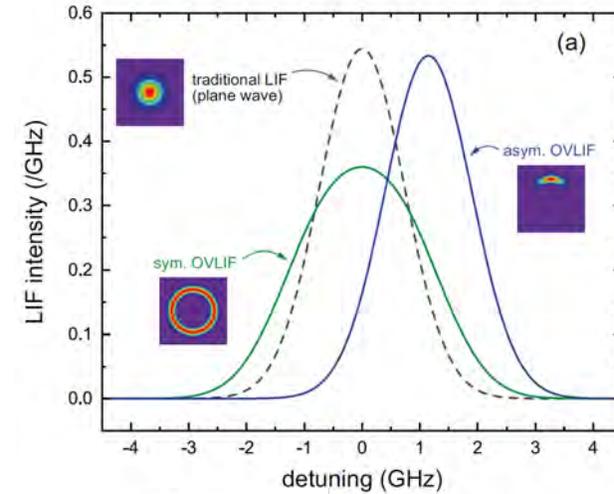
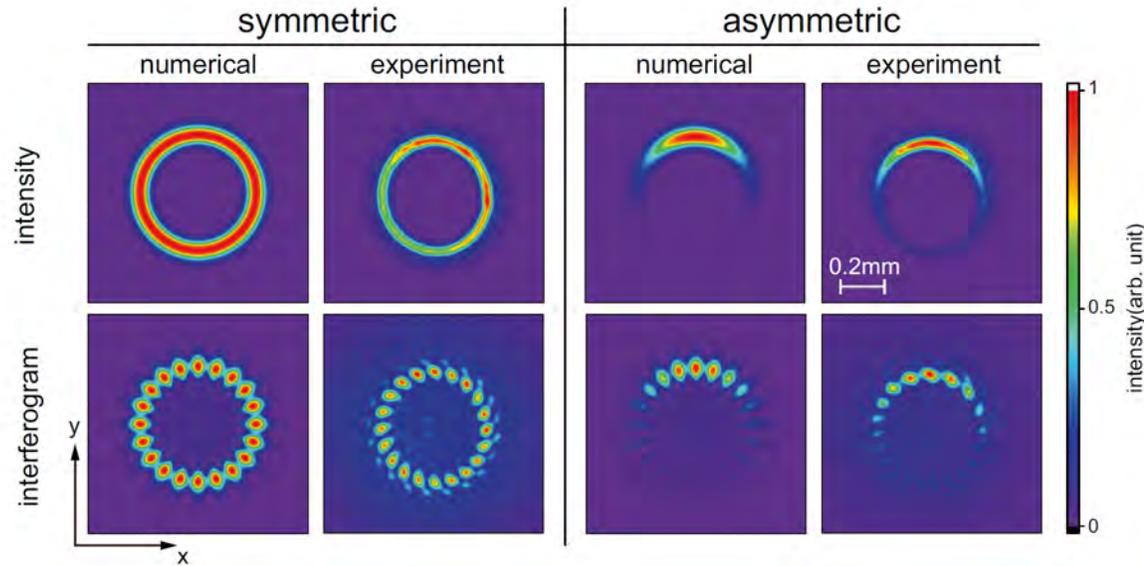
光渦レーザー吸収分光でアルゴン中性粒子の光路を横切る流れを世界で初めて計測

H. Minagawa, S. Yoshimura, K. Terasaka, M. Aramaki, “Enhancement of Doppler spectroscopy to transverse direction by using optical vortex”, *Sci. Rep.* **13**, 15400 (2023).

# 光渦レーザー（ラゲールガウスビーム）を用いた新しい計測法

光渦を非対称化しても、位相勾配は維持される

非対称光渦 LIF スペクトルのシフトで流れ計測



原理実証実験を共同研究として実施する計画  
海外連携研究へも申請中（Iowa大学、West Virginia大学）

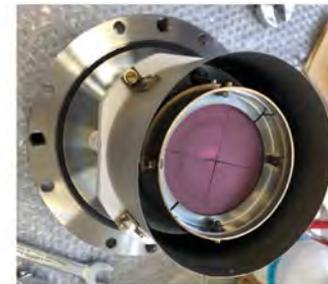
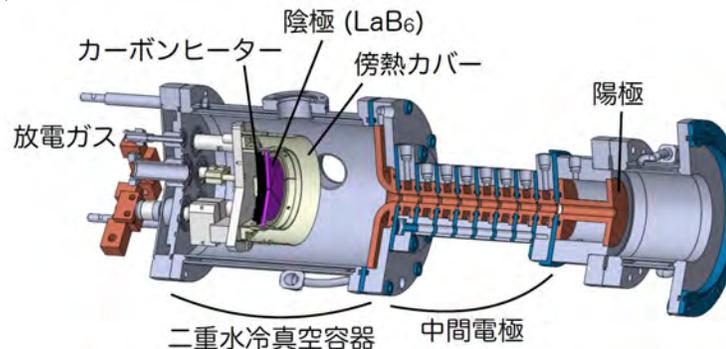
K. Terasaka, S. Yoshimura, H. Minagawa, M. Aramaki, "Three-dimensional flow velocity determination using laser-induced fluorescence method with asymmetric optical vortex beams", Sci. Rep. **14**, 2005 (2024)

# TPD-II

傍熱型LaB<sub>6</sub>陰極を用いたアーク放電で高密度プラズマを生成. 大型装置と相補的にダイバータ模擬実験を遂行して, ダイバータ物理の解明に寄与する.

10年間稼働実績なしだったが, 2018年度より復旧作業を開始.

- 2018年 LHD計画共同研究「原型炉級ダイバータ模擬実験に向けたTPD型定常高密度プラズマ源の開発」代表 江角先生 (筑波大学)
- 2019年 動作確認 (冷却系, 真空排気系, 磁場・放電電源)  
自己加熱型陰極を用いた放電試験
- 2020年 傍熱型プラズマ源と中間電極の設計と開発
- 2021年 傍熱型LaB<sub>6</sub>陰極を用いた放電試験
- 2022年 高速掃引プローブの開発
- 2023年 液体金属流動装置実験の開始, 放電の安定化検討  
パルス実験の準備



アーク放電によるHeプラズマ(放電電流~70A)

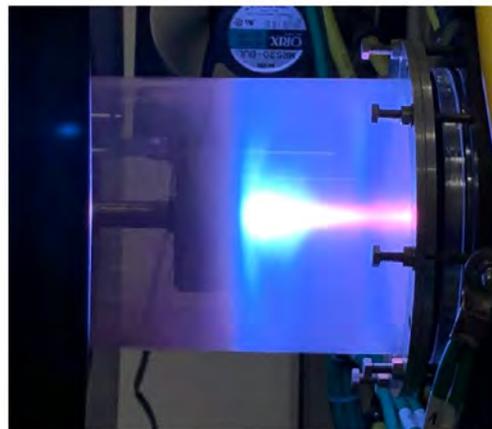
# TPD-II

## 直線型装置

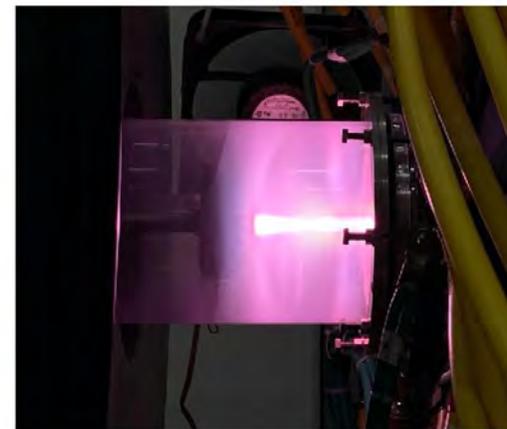
大型装置と相補的にダイバータ実験を遂行

- 定常プラズマの生成
- 計測装置への近接性が良い
- プラズマの制御性・再現性が高い

⇒ ダイバータ物理の解明に寄与



グロー放電



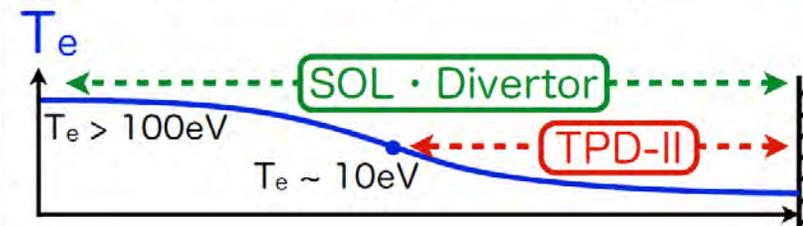
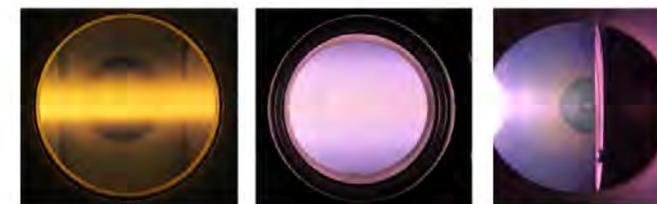
アーク放電



TPD-II

	B [T]	$n_e$ [ $m^{-3}$ ]	$T_e$ [eV]
PISCES-A	0.2	$1 \times 10^{19}$	20
TPD-I	0.5	$6 \times 10^{19}$	10
TPD-II	0.2	$1 \times 10^{20}$	10
NAGDIS-II	0.25	$1 \times 10^{20}$	10
MAP-2	0.02	$5 \times 10^{19}$	10
TPD-Sheet IV	0.07	$1 \times 10^{19}$	15
PSI-2	0.1	$1 \times 10^{19}$	20
MAGNUM-PSI	2.5	$4 \times 10^{21}$	2
GAMMA10/PDX	1.5	$3 \times 10^{18}$	> 100

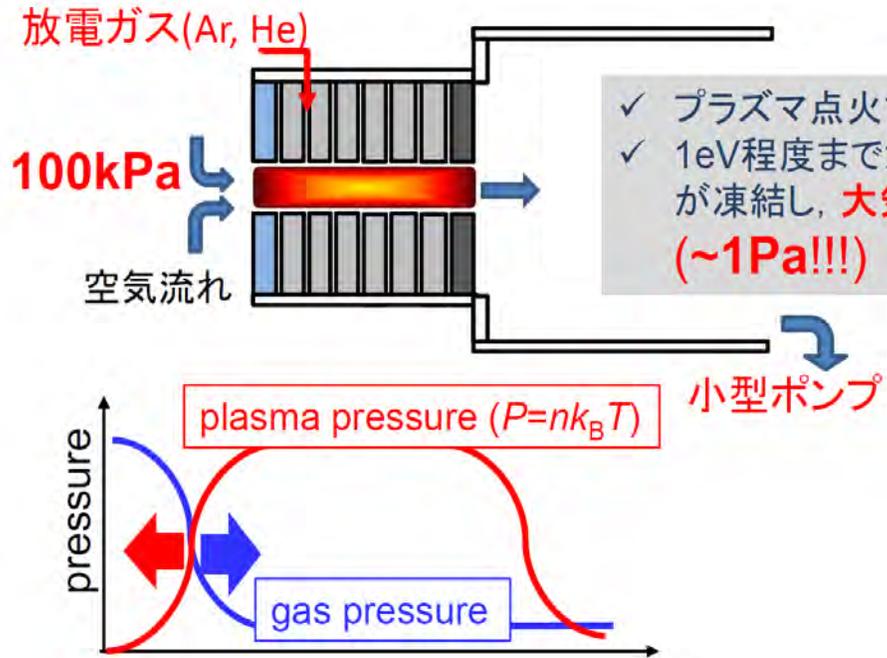
電離進行 → 再結合プラズマ



# TPD-II

## プラズマウィンドウに関する共同研究（広島大学 難波先生）

大気中電子ビーム加工，加速器での差動排気への応用として，プラズマウィンドウの開発を広島大学で行っている。カスケードアーク放電部をTPD-II装置に取り付けることにより高温高密度プラズマを発生させ，実用的なプラズマウィンドウ開発を目指している。



- ✓ プラズマ点火で低温ガスが熱せられ粘性係数が上昇
- ✓ 1eV程度までガスが加熱されると，実効的にガス流れが凍結し，大気とプラズマの圧力が均衡する (~1Pa!!!)

プラズマ径：8 mm (>10 mm が理想)  
10 kPa - 1 Pa と4桁の圧力隔壁

⇒ ヘリウムプラズマ：

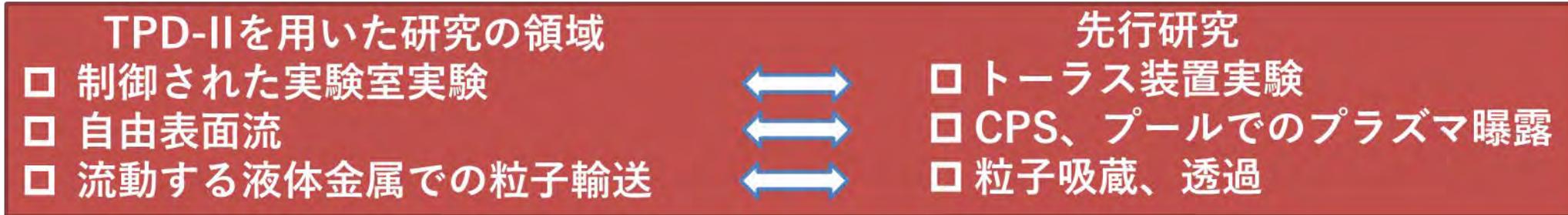
$T_e > 3 \text{ eV}$ ,  $n_e > 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

350 時間 (~2週間)に渡る長時間運転が要求される



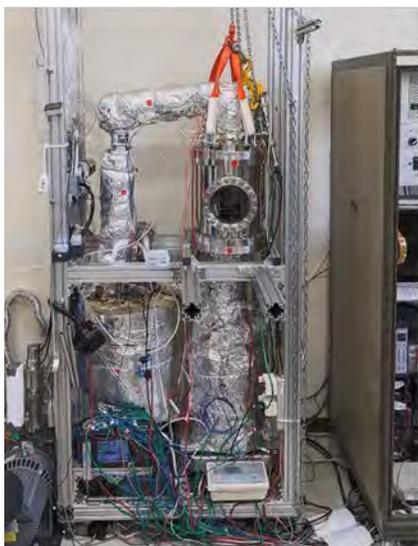
- ✓ 定常100 Aのヘリウム放電に成功
- ✓ 圧力隔壁性能: 放電部: 4.4 kPa, 膨張部: 26 Pa
- ✓ He II 468.6 nm の観測に成功
- ⇒ > 5 eV 以上の電子温度のプラズマ発生を示唆

# TPD-IIを用いた液体金属PSI研究 (浜地 志憲 林 祐貴 増崎 貴)



FY 2022

ガス駆動液体金属流動装置  
GaLF



- ◆ ガス駆動流動実験の実証
- ◆ 液体金属での液膜状の自由表面流の形成手法の開発

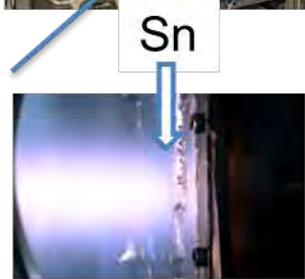
FY 2023

GaLF + TPD-II  
直線型プラズマ装置TPD-II



液体Sn自由表面  
照射部

- ◆ 試験運転を実施



Sn自由表面流のHe  
プラズマへの曝露

## Sn自由表面流試験を実施

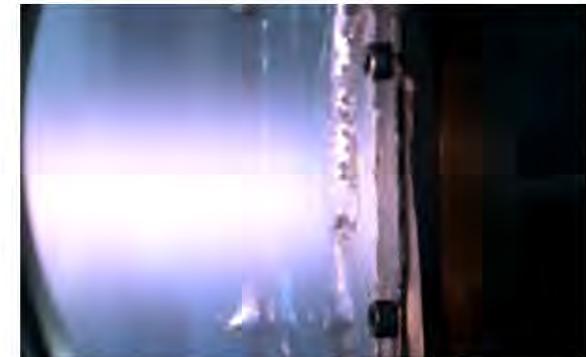
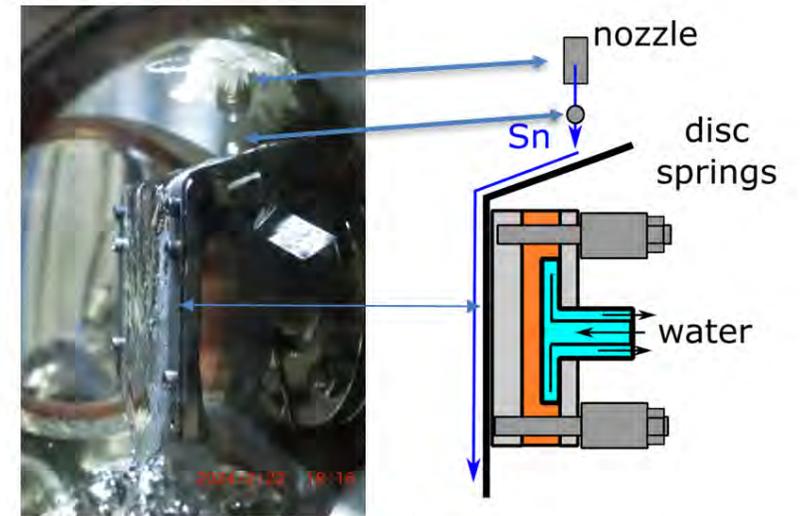
- ◆ 処理済みSPCC試験部 (550°C、Sn 5時間)
- ◆ Sn流量: ~104 ccm

### 曝露条件

- He
- 放電電圧: ~150 V
- 放電電流: 25 A
- 照射時の試験部圧力: ~  $1 \times 1.0^{-2}$  Pa

ラングミュアプローブ未搭載時に実施

- ◆ プラズマ曝露を確認
- ◆ プラズマからの加熱により除熱が劣化、SPCC板の変形と過熱があったため終了
- ◆ 板材の肉厚化と固定方法の変更で除熱性能と強度を向上したものを準備中



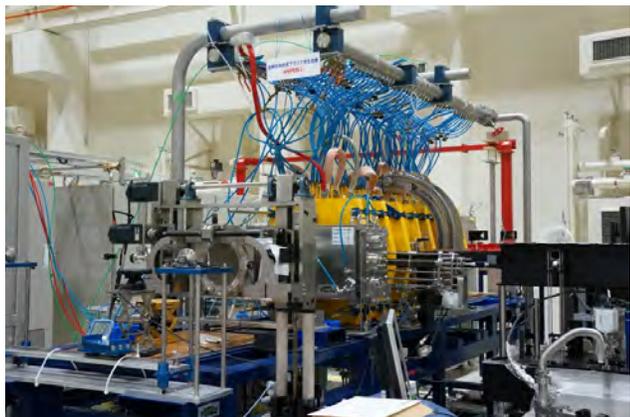
## TPD-IIを用いた液体金属PSI研究 (浜地 志憲 林 祐貴 増崎 貴)

- ◆ 液体金属PFCを想定した、プラズマ - 液体金属相互作用研究に関する研究活動を開始した
- ◆ 液体金属PSI研究のトピックとして、先行研究の乏しい下記のトピックを研究可能なプラットフォームとしてTPD-IIを改造を検討
  - 1, 非トーラス装置 2, 自由表面流形成が可能 3, 粒子輸送研究が可能
- ◆ TPD-IIでの液体Sn流動実験に先立ち、ガス駆動流動システムと液膜流形成をGaLF装置を用いて研究
  - ガス駆動方式での流動機構を確立
  - 表面をFe-Sn金属間化合物層で覆うことによる液膜状の自由表面流形成手法を確立
- ◆ TPD-IIのためのGaLF形式の流動装置を設計・製作し、プラズマ曝露試験を実施
  - 今後ラングミュアプローブ、分光計測、照射後アウトガス計測実験等を計画中

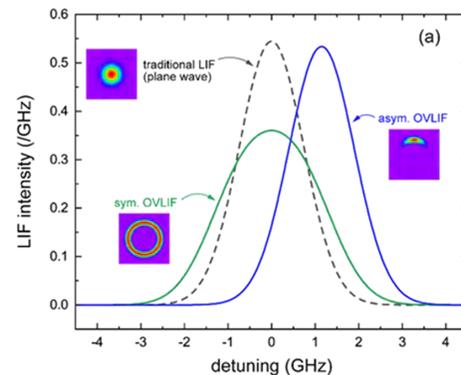
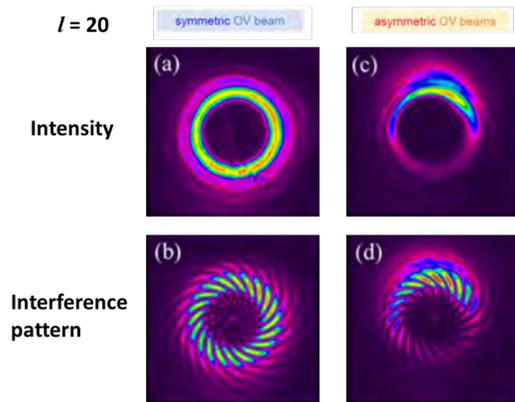
# 今後の展開

概算要求 フュージョンテクノロジー高度化研究基盤設備の整備

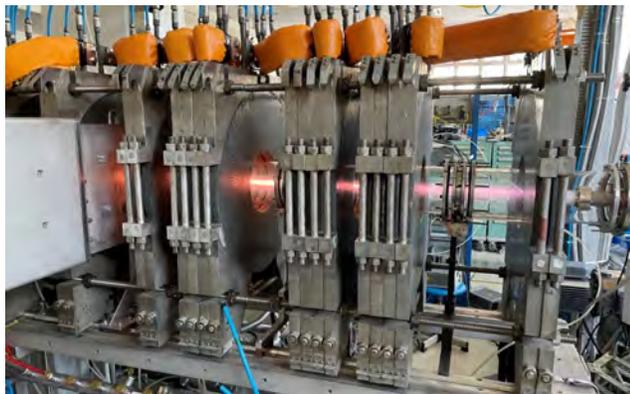
## HYPER-I



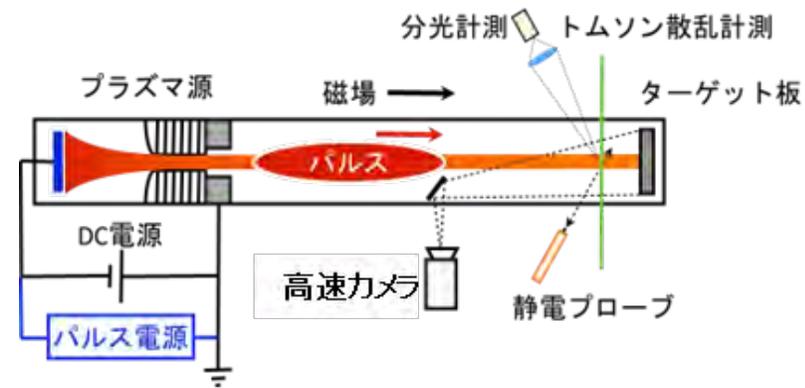
光渦レーザー誘起蛍光計測系（アルゴンイオン・中性粒子）  
トムソン散乱計測（2方向同時計測）



## TPD-II



パルス電源整備によるELM模擬



TPD-II  
直流プラズマ源