


第11回若手科学者によるプラズマ研究会 原研那珂

球状トーラス装置HISTにおけるプラズマフロー計測



西岡勲、菊池祐介、山田諭、吉川達也、橋本尚太郎、福本直之、永田正義

兵庫県立大学大学院工学研究科

研究背景および目的

球状トラス(ST)実験装置

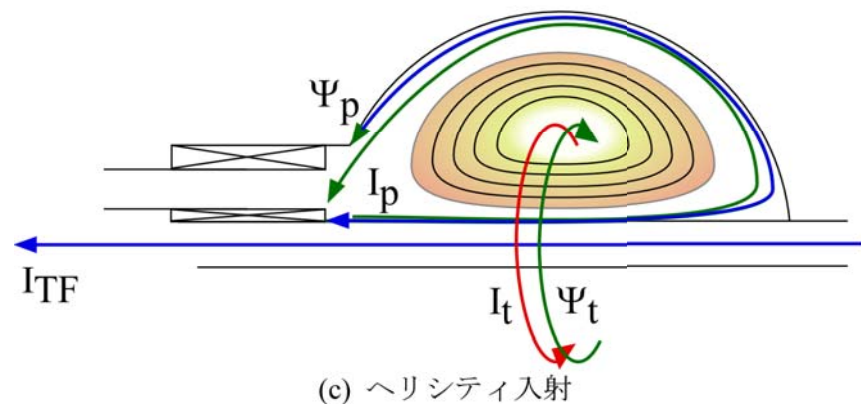
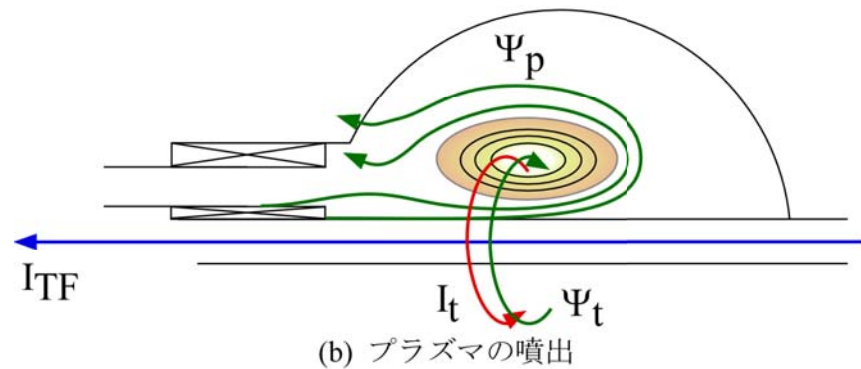
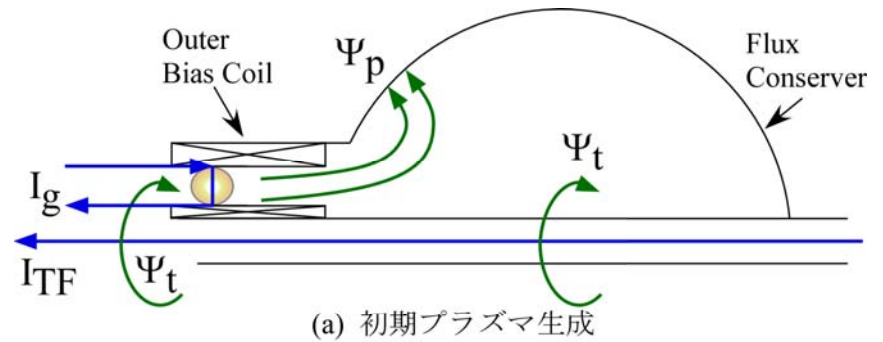
磁化同軸プラズマガン (Magnetized Coaxial Plasma Gun; MCPG) を用いた磁気ヘリシティ入射 (Coaxial Helicity Injection; CHI) 方式によってプラズマを生成



電流駆動機構としてMHD 緩和過程が考えられている

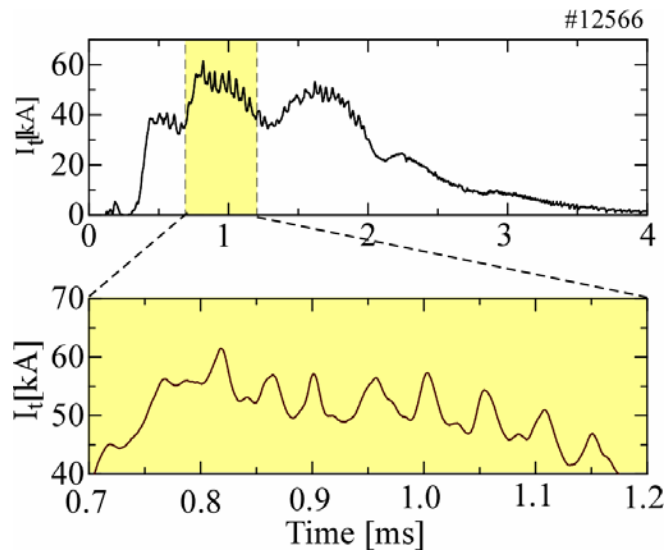
$n = 1$ キンクモードの発生

MHD緩和現象を用いたトロイダル電流駆動

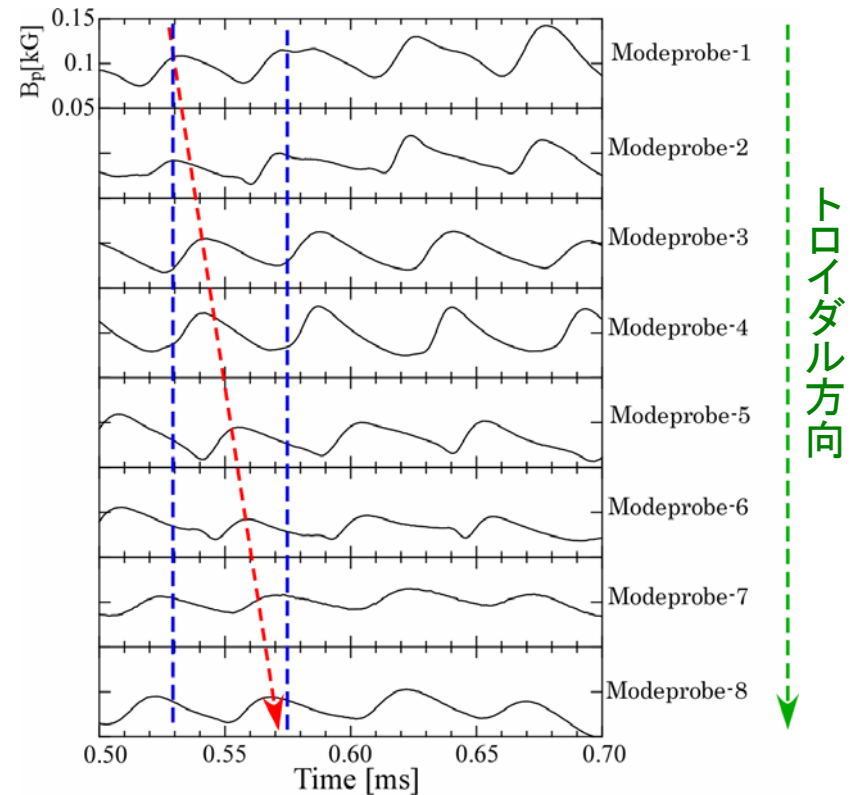


研究背景および目的

n = 1 キンクモード



- ・20 kHz 程度の磁場揺動
- ・プラズマ電流波形にも振動

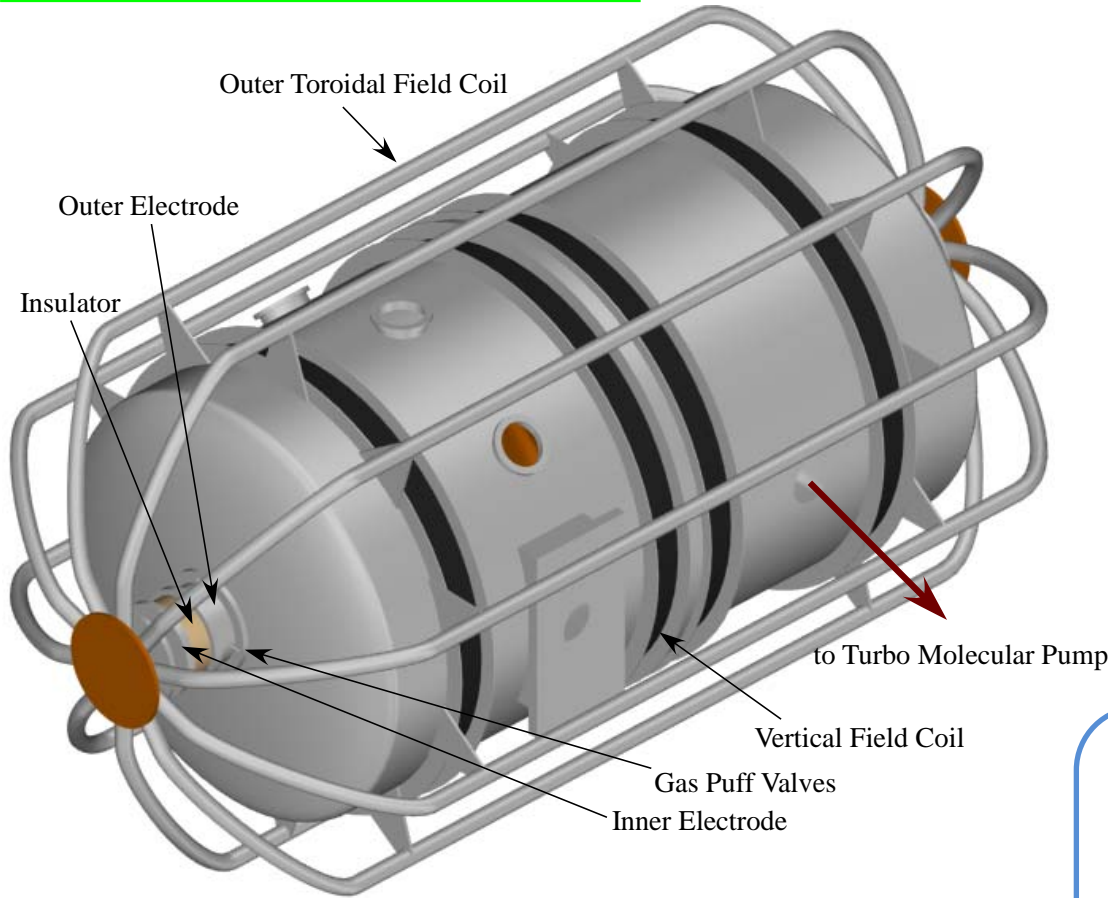


MHD 不安定性におけるプラズマの挙動は現在未解明な点も多い

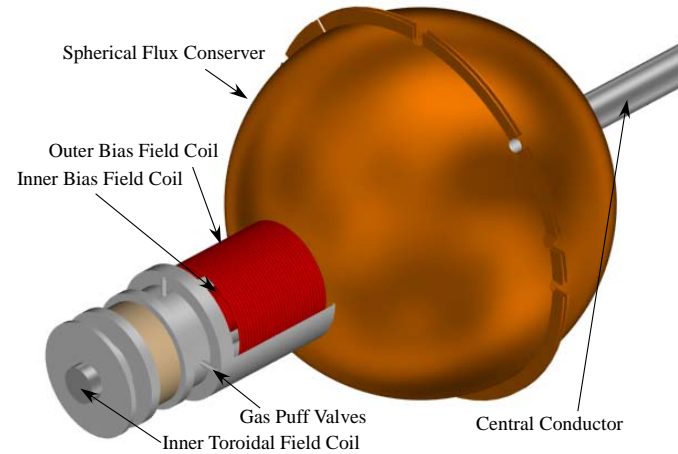
HIST球状トラス装置において従来のプローブ計測や干渉計計測に加え、新たに開発したイオンドップラー分光システムによる不純物のイオン流速測定、マッハプローブによる水素イオン流速測定を行うことでプラズマの挙動を調べることを目的としている。

実験装置

球状トーラス装置 HIST



真空容器



フラックスコンサーバ

プラズマパラメータ

主半径	0.3 m
小半径	0.2 m
トロイダル磁場	< 0.5 T
プラズマ電流	150 kA
電子密度	$1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$

イオンドップラー分光法

回転速度計測

ドップラーシフト $\Delta \lambda$ から算出

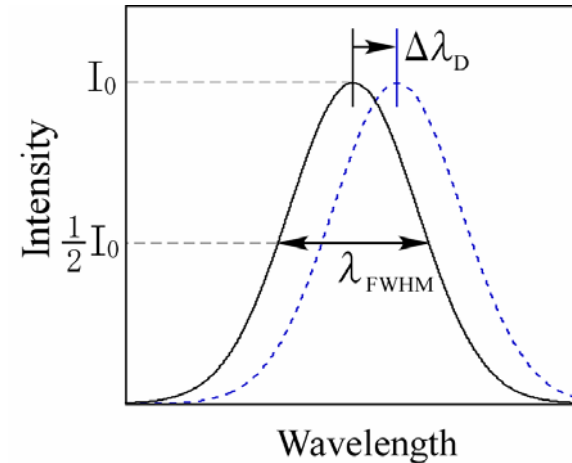
$$v = c \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} \quad (c: \text{光速})$$

イオン温度計測

ドップラー広がり λ_{FWHM} から算出

$$Ti = \frac{\mu \Delta \lambda_{FWHM}^2}{7.7^2 \times 10^{-10} k \lambda^2}$$

(k: ボルツマン定数、 μ : 原子量)



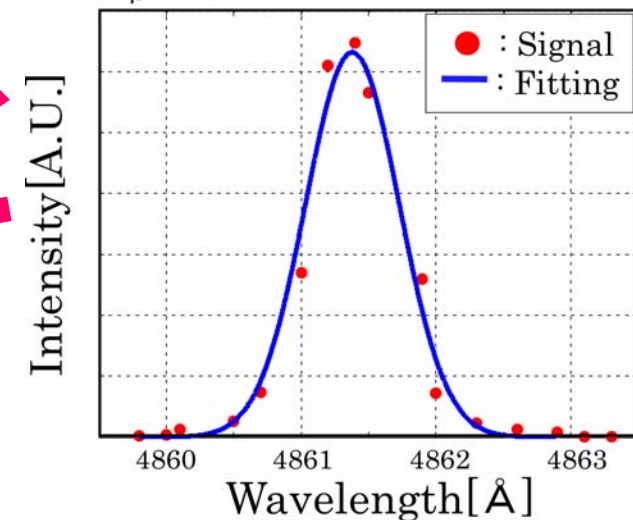
プラズマ中の発光スペクトルを分光器により波長分解し、各波長における信号強度をプロット

ガウスフィッティングを行い、正規分布関数を求める

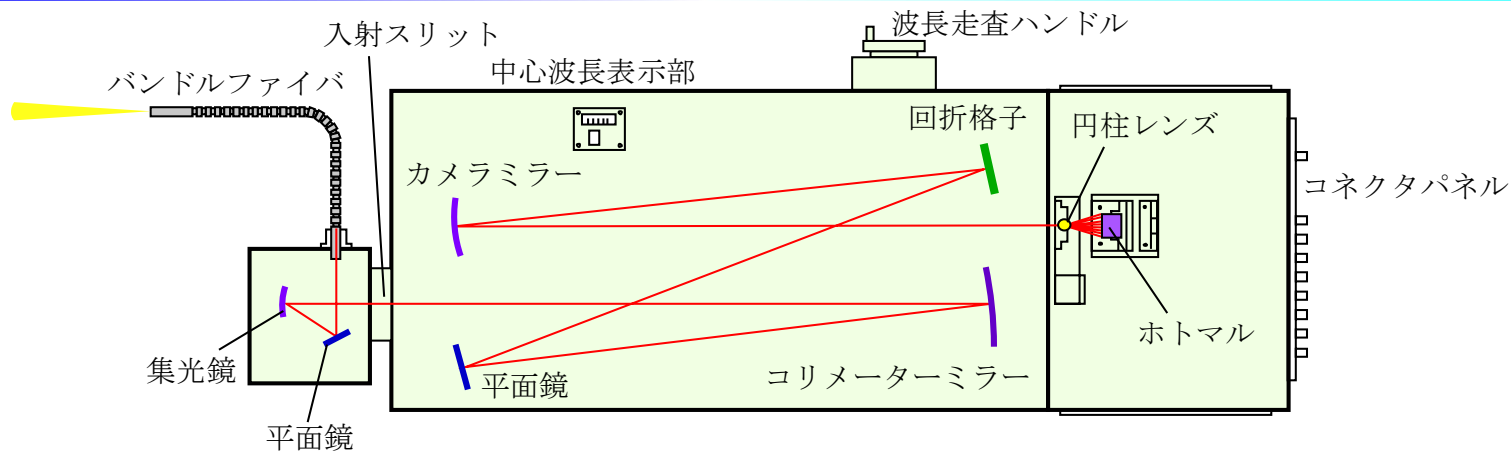
O II スペクトル線 (4414.9 Å) を用いて
イオン温度およびイオン流速算出

#11198

H β : $\lambda_0 = 4861.3 \text{ \AA}$, 8ch, t = 1500 [μs]



分光器仕様



集光系

バンドル光ファイバ

- 三菱電線工業製 STU200D/24
- 開口数 0.2
- コアの材質 石英
- コアの数 24
- コア径 0.2 mm



分光部

回折格子分光器

- リソー応用製 MC-100N
- ツェルニーターナー型
- 回折格子刻線数 1800 L/mm
- 波長精度 ± 0.05 nm
- 分解能 0.0085 nm

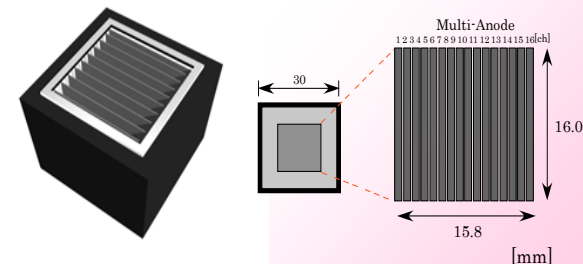
円柱レンズ

- 材質 石英
- $\Phi 4 \times 40$ mm

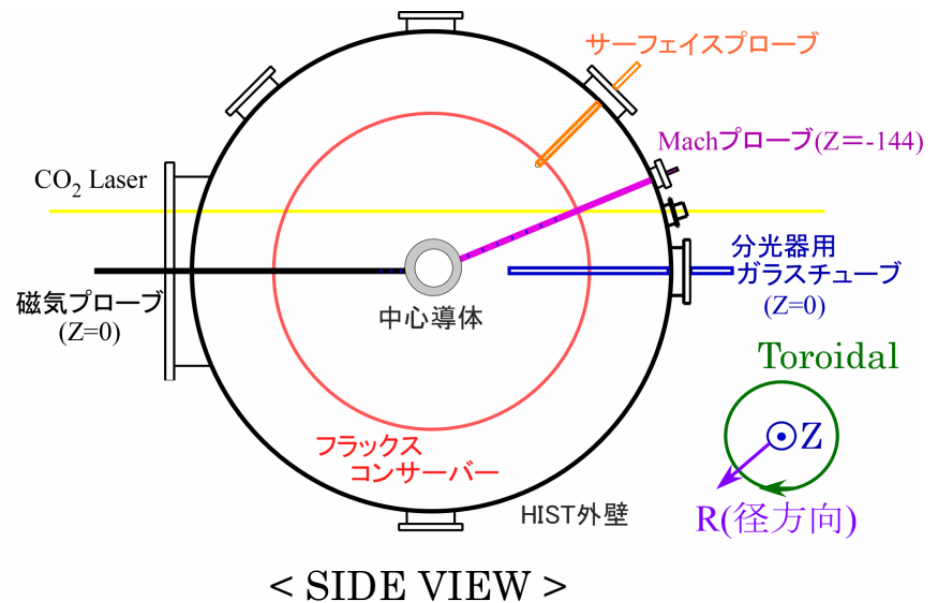
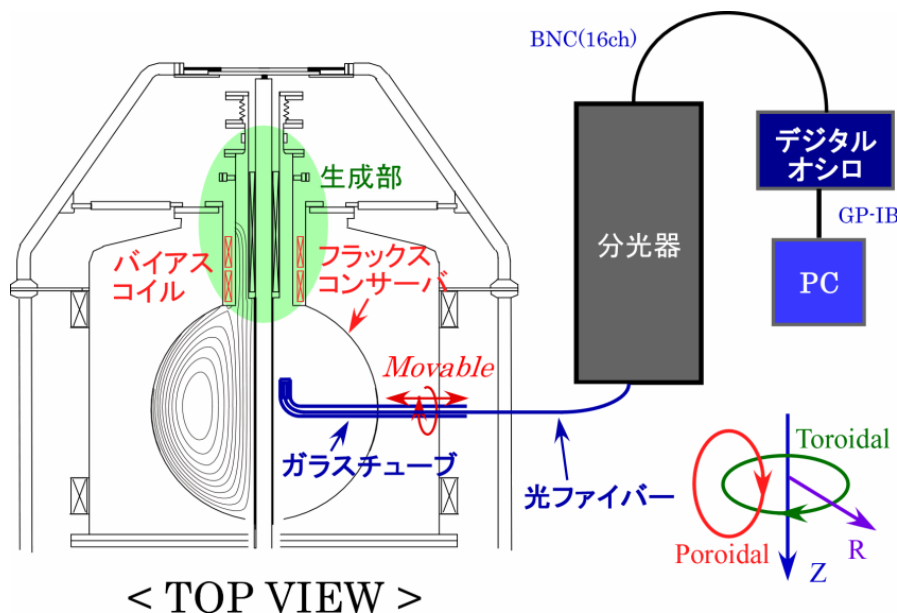
検出系

マルチアノードホトマル

- 浜松ホトニクス製 R5900U-03-L16
- サイズ 30 × 30 × 24 mm
- ピクセルサイズ 0.8 × 16 mm
- 波長領域 185~650 Å
- 立ち上がり時間 0.6 ns



計測システム



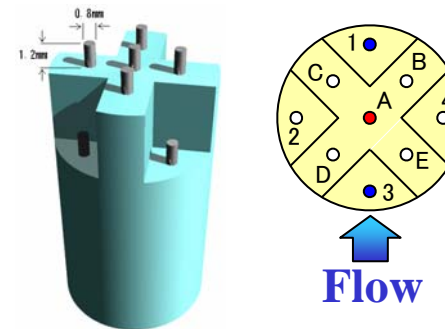
イオンドップラー分光システムおよびマッハプローブの特徴

ガラスチューブは抜き差しと回転が可能



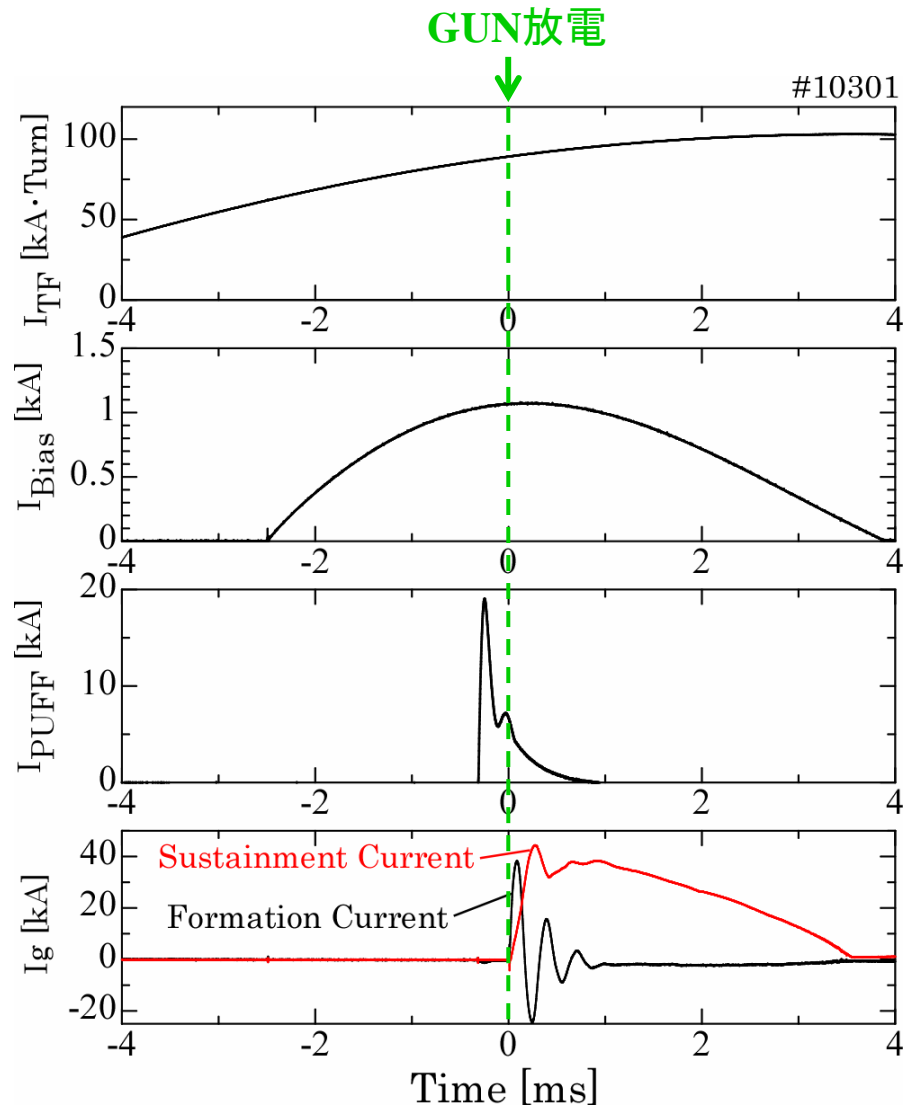
ポロイダル及びトロイダルの径方向分布が計測可能

イオンドップラー分光システム $z = 0$ mm
およびマッハプローブ $z = -144$ mm における
トロイダル回転方向を計測



作製したマッハプローブの先端図

放電タイムシーケンス



STプラズマ生成

$t = -6.0$ ms トロイダル磁場印加



$t = -1.5$ ms バイアスポロイダル磁束形成



$t = -0.32$ ms 水素ガス注入

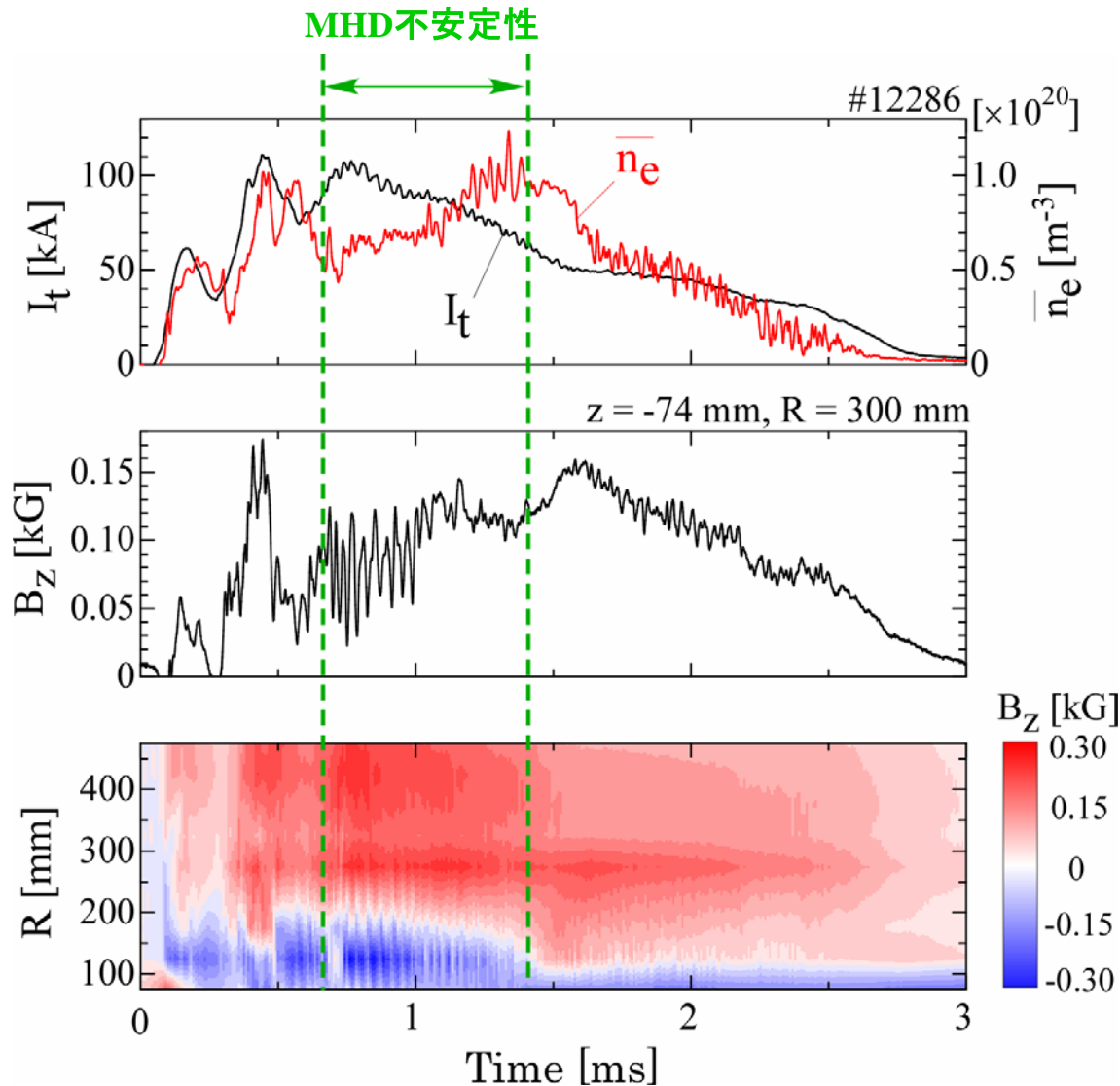


$t = 0$ ms ガン放電 (基準)



$t = 0.010$ ms ヘリシテイ注入用電流

HISTプラズマ



プラズマトロイダル電流 I_t

$\sim 110 \text{ kA}$

線平均電子密度 \bar{n}_e

$0.5 \sim 1.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$

0.5 ~ 1.5 ms

ST磁場配位が形成

0.7 ~ 1.4 ms

MHD不安定性が発生

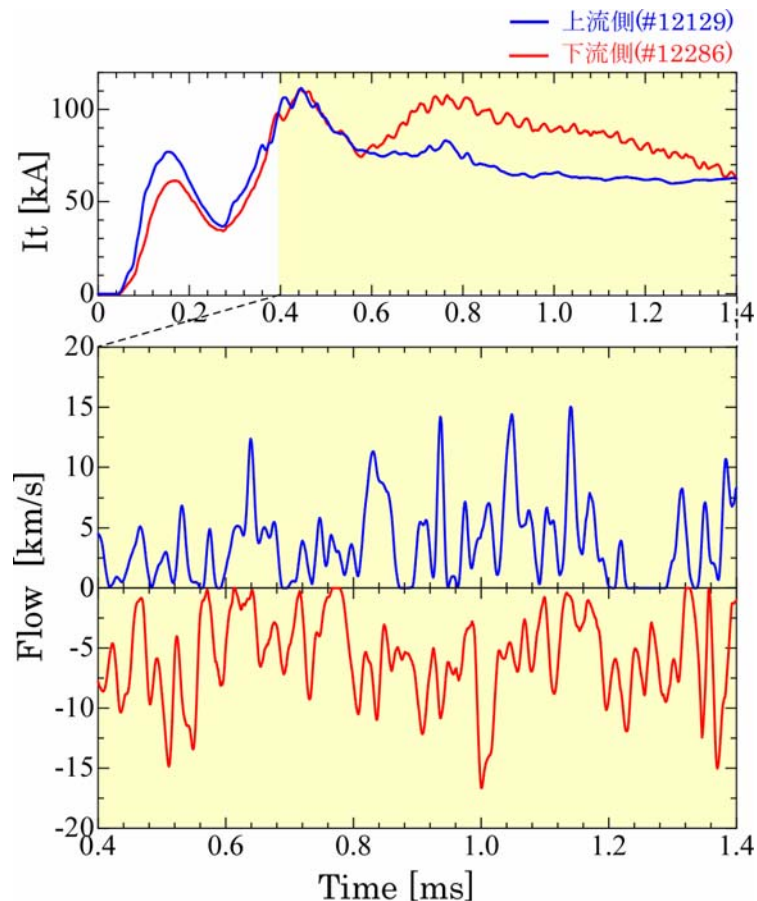
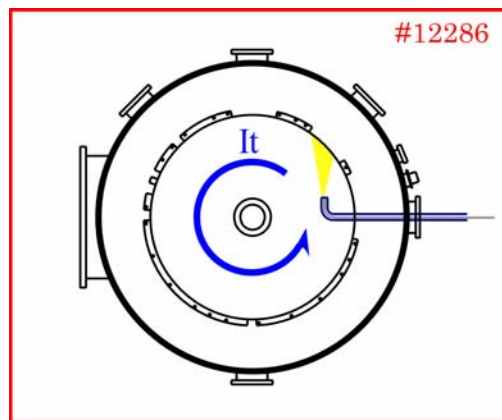
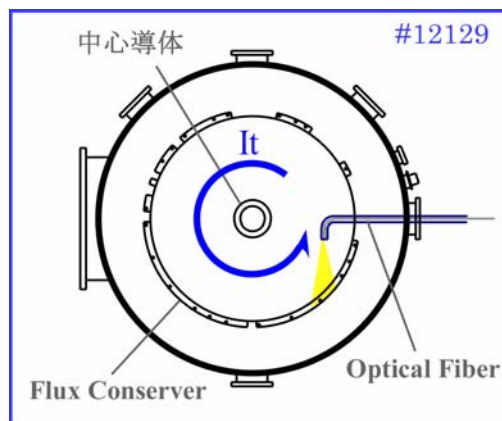


流れの観点から
プラズマの挙動を検証

実験結果

● STプラズマの酸素イオントロイダル流速測定結果

光ファイバの向きを180° 回転させ、トロイダル流速の上流側・下流側の計測を行う



トロイダル流速の計測結果も反転することを確認



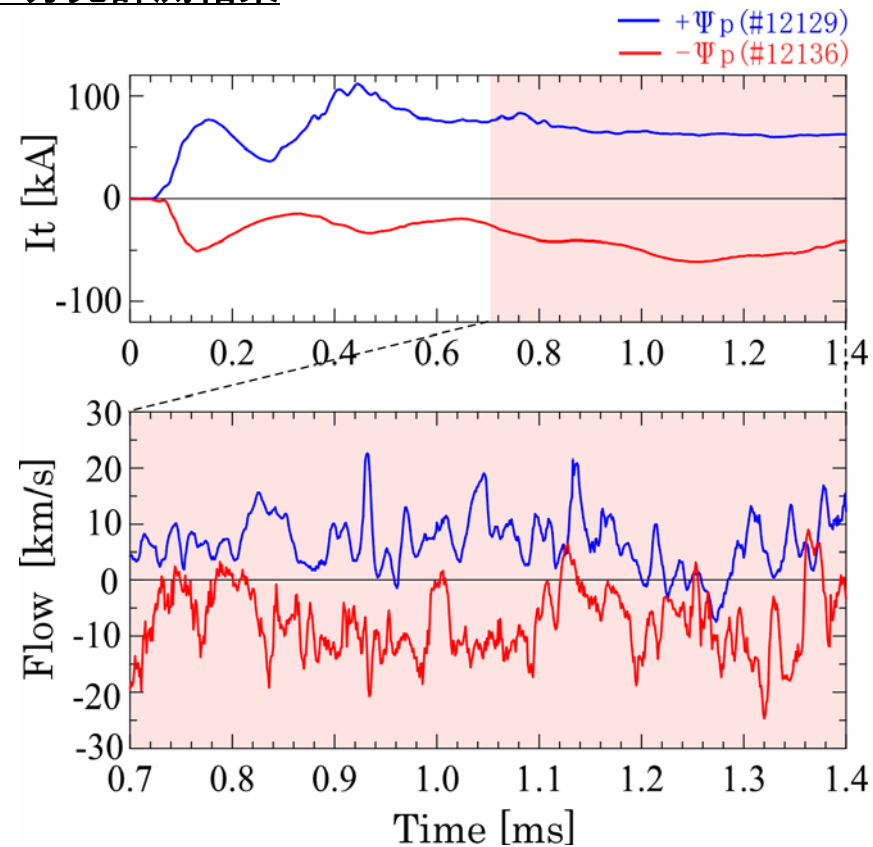
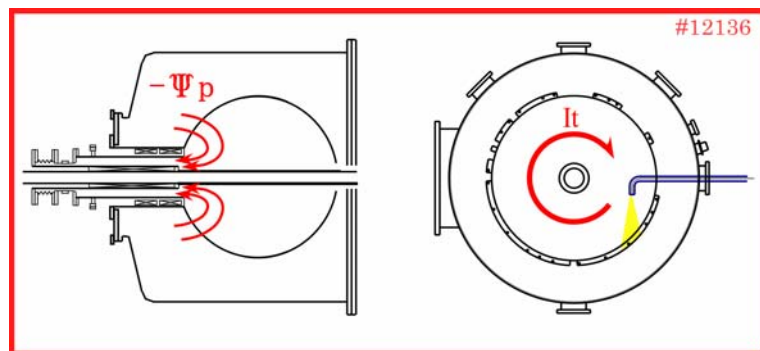
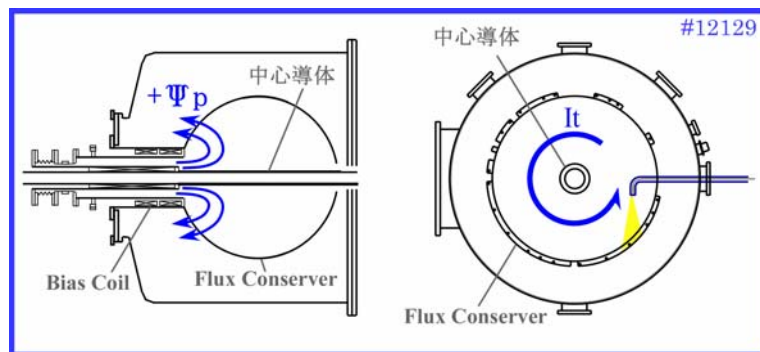
上下流の計測結果から流速 0 km/s となる波長を確認



酸素イオン流速
10~15km/s

実験結果 —バイアスポロイダル磁束反転—

● バイアス磁束反転時におけるイオンドップラー分光計測結果

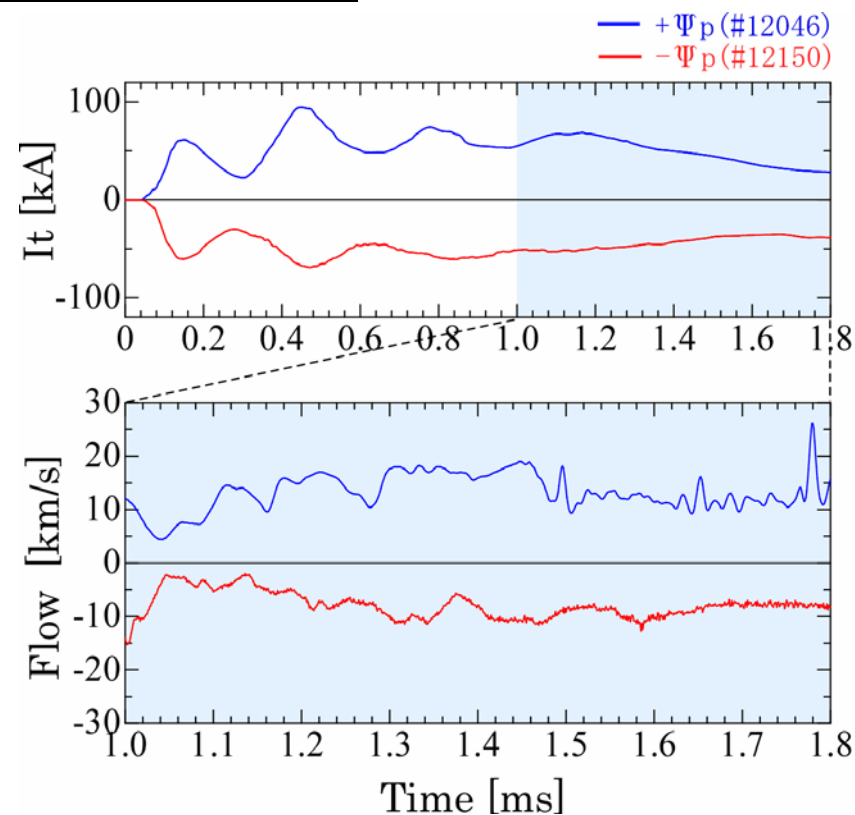
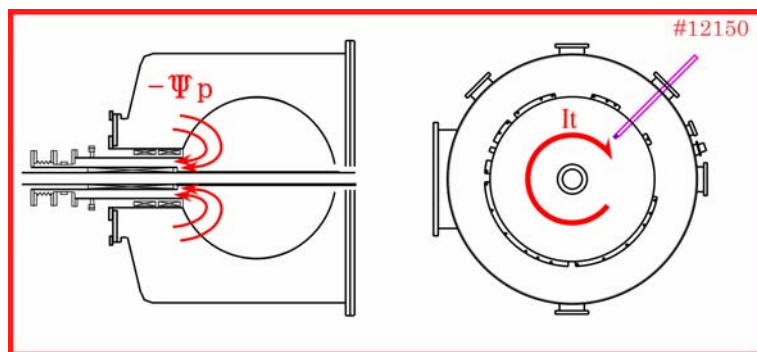
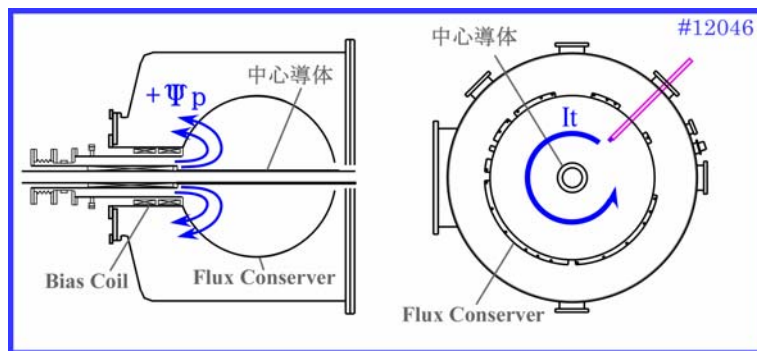


バイアス磁束を逆転 → I_t が反転 → トロイダル流速も反転

E×Bドリフト方向に従うことを確認

実験結果 —バイアスポロイダル磁束反転—

● バイアス磁束反転時におけるマッハプローブによる流速計測結果



- ・バイアス磁束を逆転させると I_t の反転と同時にトロイダル流速も反転していることを確認
- ・水素イオン流速は10~20 km/s

➡ イオンドップラー分光器による流速測定と同様の結果

まとめ

(1)STプラズマにおけるフロー計測

- ・イオンドップラー分光器による計測 → 酸素イオン流速 ~15km/s
- ・マッハプローブによる計測 → 水素イオン流速 ~20km/s

(2)バイアスポロイダル磁束の極性を反転

- ・イオンドップラー分光器による酸素イオン流速
 - ・マッハプローブによる水素イオン流速
- } トロイダル流速がともに反転

バイアスポロイダル磁場 B を反転させることによりプラズマトロイダル電流 I_t を反転させると計測された回転方向も反転することから、プラズマや不純物イオンの回転方向は $E \times B$ ドリフト方向に従っており、バイアス磁場の極性およびプラズマ電流 I_t の向きに依存していることが確認された。

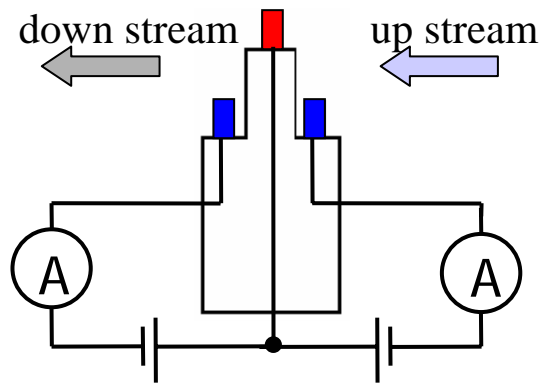
今後の課題

イオンドップラー分光器およびマッハプローブともに流速の空間分布を明らかにする。

Appendix

● マツハプローブ法

原理と計算式



$$M = 0.6 \ln \left(\frac{J_{up}}{J_{down}} \right)$$

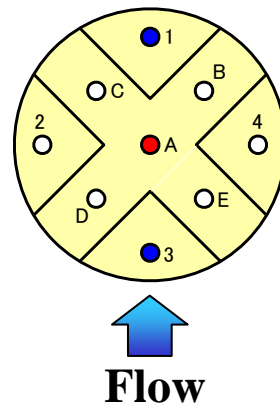
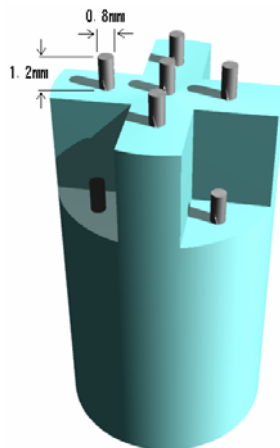
$$v_i = C_s \times M$$

M : マツハ数

V_i : イオン流速

C_s : 音速 (30.1 km/s)

作製したマツハプローブ



・Aピンを基準電極

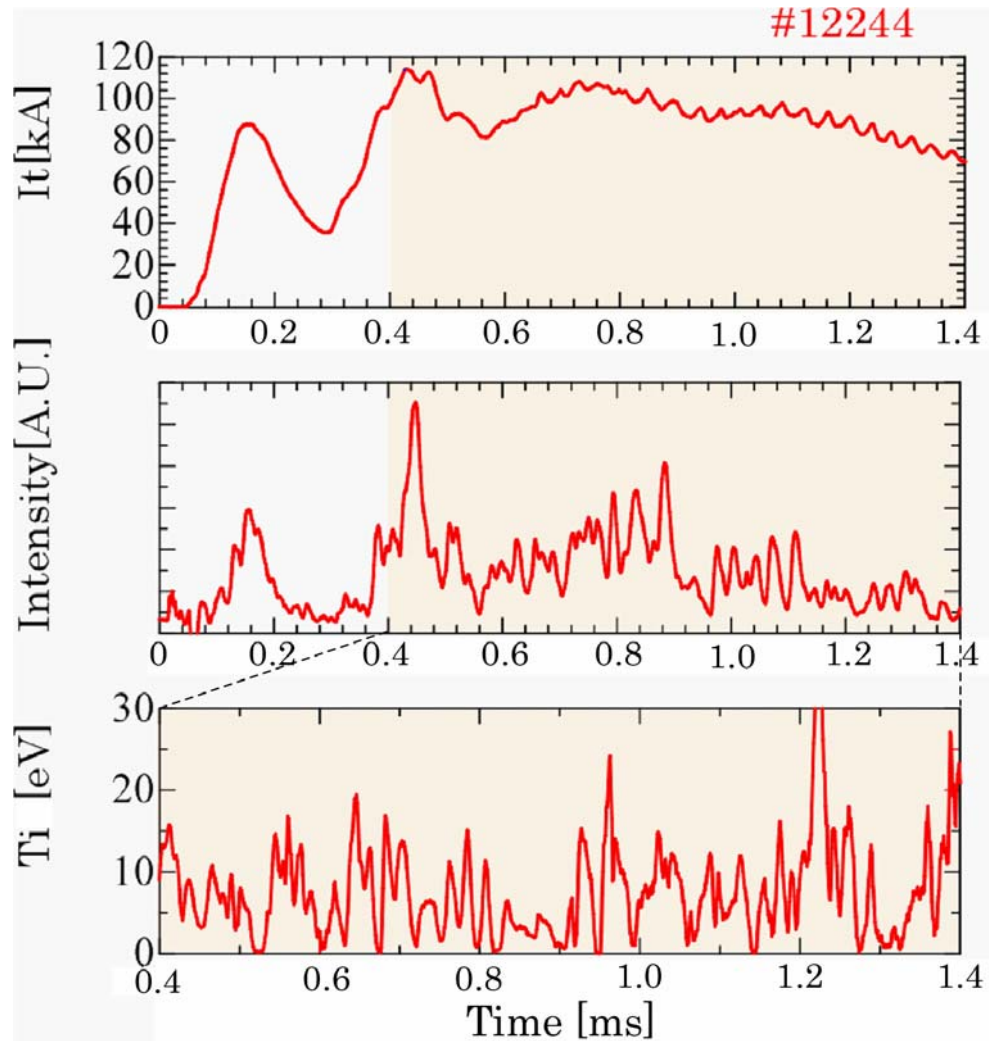
・1-A、3-A間にそれぞれコンデンサにより
電圧10Vを印加



水素イオン流速計測

Appendix

● イオンドップラー温度測定結果



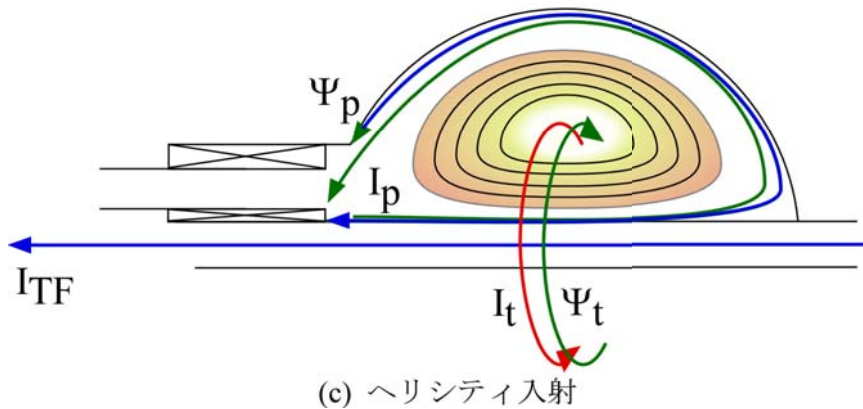
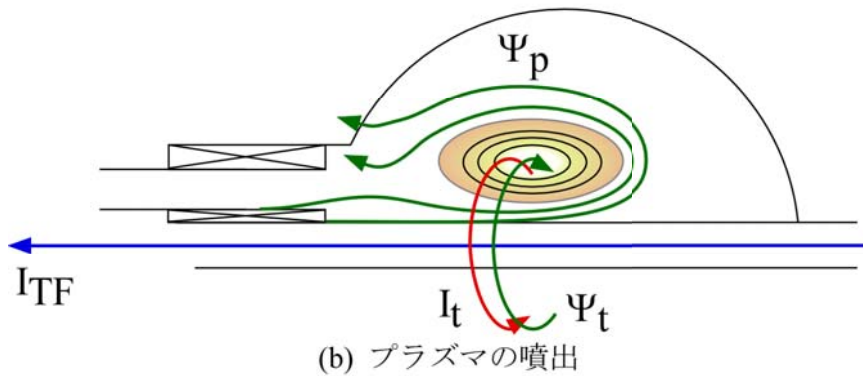
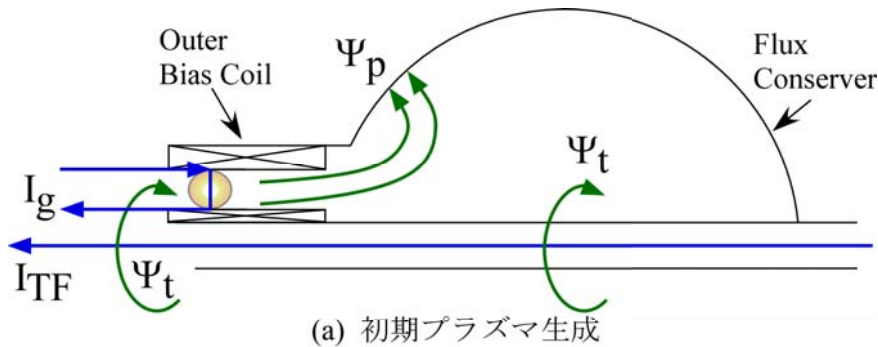
イオン温度の計測結果

酸素イオンのイオンドップラー温度
10~15 eV 程度

電子温度 15 eV 程度
(トリプルプローブ計測)

イオン温度と電子温度が一致

Appendix



MHD緩和現象を用いたトロイダル電流駆動

ガン電流 I_g とトロイダル磁場 B_t の $I_g \times B_t$ ローレンツ力でFC方向へプラズマが移動する。

バイアスコイルによって生成されたポロイダル磁束 Ψ_p を横切るときに $q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ によってトロイダル方向に電流が誘起される。

外部オープン磁束にヘリシティ注入用電流を流すことで、トロイダル磁束を形成し、MHD緩和によってポロイダル磁束に変換されることでトロイダル電流が誘起される。