

# Proto-RTにおける径方向電場引加 によるプラズマ流の駆動実験

東大新領域, 東大高温プラズマ研究セ<sup>A</sup>

齋藤晴彦, 吉田善章, 比村治彦, 森川惇二<sup>A</sup>, 深尾正之<sup>A</sup>, 若林英紀

1. 研究の背景と目的
2. 実験装置と計測器の構成
3. 電位制御と流れの駆動
4. まとめと今後の課題

## 研究の背景と目的

- 内部導体系 プラズマ・トラップ

ポロイダル磁気面 + トロイダル磁場配位による閉じ込め

応用: 二流体プラズマによる平衡状態の実験研究

流れの駆動      プラズマ密度等のパラメータ, 平衡への影響

### 電場・ $E \times B$ ドリフトによる流れ場の構造の理解

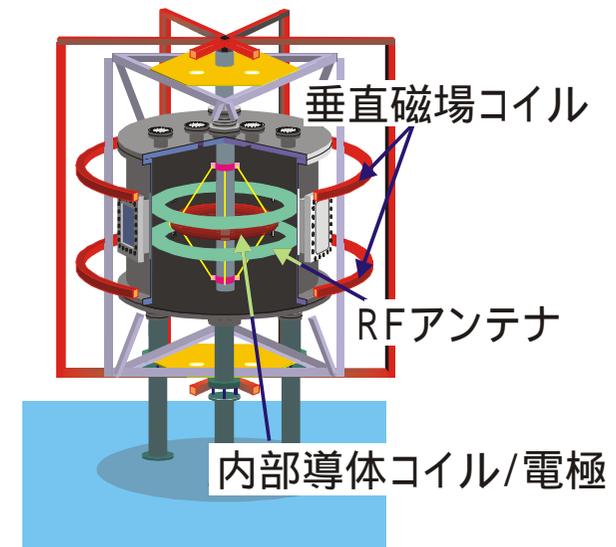
- Proto-RT (P ro to type -R ing T rap)

内部導体系のプラズマ (水素 13.56MHz RF)  
における電場・流れ場の駆動

- D ipole・垂直磁場コイルによる配位

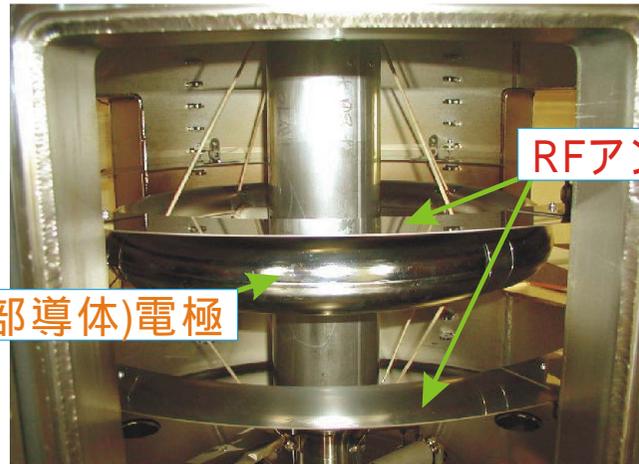
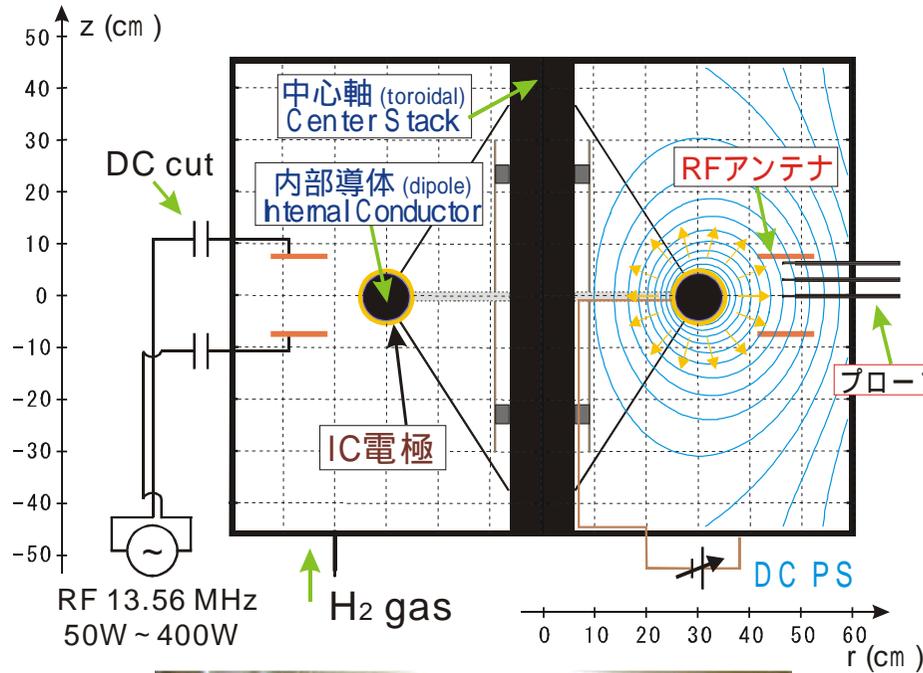
- 内部導体系 (d ipoleコイル) 上に電極

$E \times B$  ドリフトによる流れの駆動



Proto-RT装置

# 内部導体系における流れ駆動



IC(内部導体系)電極

RFアンテナ

Proto-RT r-z断面と、装置内部のRFアンテナ・電極

- Dipole, 垂直磁場コイル  
ポロイダル磁場配位
- プラズマ制御電極  
径方向電場の形成  
トロイダル  $E \times B$  ドリフト

Langmuir プローブ ( $T_e, n_e$ )  
(低周波 RF 用)

Emissive プローブ ( plasma)

Mach プローブ ( $v$ )

probe size < ion ジャイロ半径

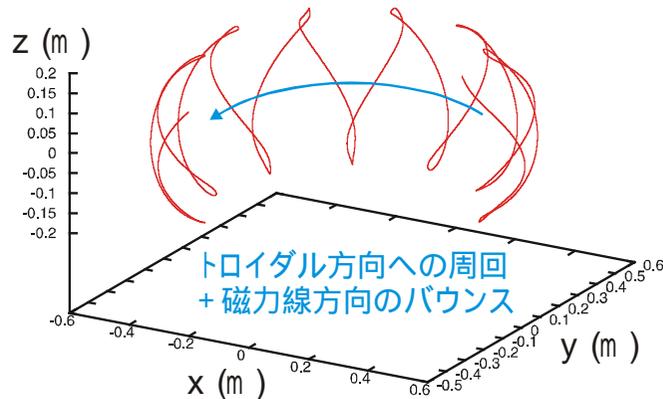
非磁化プラズマ Hudis model

イオン電流比 流速の概算

# 弱電離プラズマ中の電場と流れ

|                  |                     |                                      |
|------------------|---------------------|--------------------------------------|
| $n_e$            | 電子密度                | $1 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$    |
| $T_e$            | 電子温度                | 5 eV                                 |
| $T_i$            | イオン温度               | $\sim 1 \text{ eV}$                  |
| $n_n$            | 中性粒子密度              | $8.8 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  |
| $B$              | 磁場強度                | 0.01 T                               |
| $\omega_{ci}$    | イオンジャイロ周波数          | $1.0 \times 10^6 \text{ rad s}^{-1}$ |
| $\nu_{ni}$       | 中性粒子-イオン衝突周波数       | $3.7 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$     |
| $\nu_{ie}$       | イオン-電子衝突周波数         | $4.7 \text{ s}^{-1}$                 |
| $\nu_{ii}$       | イオン-イオン衝突周波数        | $6.9 \text{ s}^{-1}$                 |
| $v_{E \times B}$ | $E \times B$ ドリフト速度 | $3.0 \times 10^5 \text{ ms}^{-1}$    |
| $c_s$            | イオン音速               | $3.1 \times 10^4 \text{ ms}^{-1}$    |
| $v_a$            | アルフベン速度             | $6.9 \times 10^7 \text{ ms}^{-1}$    |

Proto-RT プラズマのパラメータ



ポロイダル磁場・径方向電場中でのイオンの軌道

$$(\omega_{ci} / \nu_{ni})^2 \sim 10^3 \gg 1$$

$\nu_{ni} \gg \nu_{ie}$  : 中性衝突が支配的

内部導体系でのイオンの運動 :

$$\mathbf{v}_{i\perp} = \frac{q\nu_{ni}}{m_i\omega_{ci}^2} \mathbf{E} + \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$$

磁気面を横切る径方向運動  
(中性衝突による輸送)

径方向の電場  $E_r$  と 電流密度  $j_r$  :

$$j_r = 1.9 \times 10^{-4} E_r$$

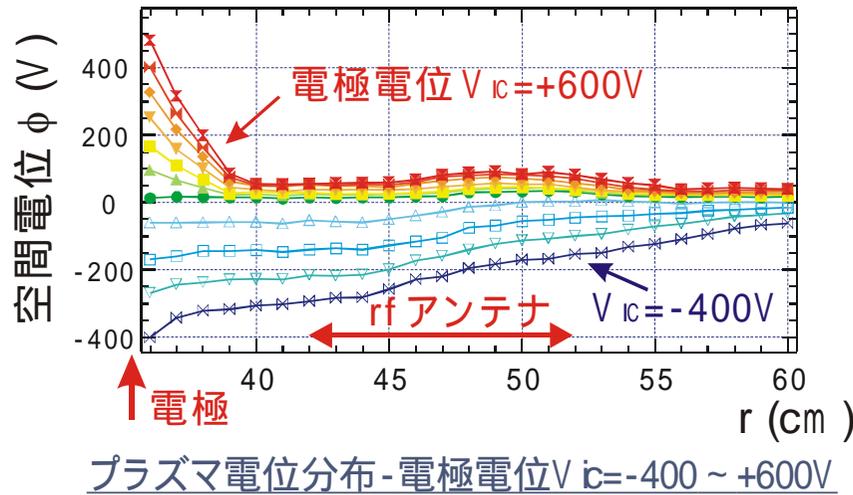
電極電流 1A

$$v_{E \times B} \sim 5 \times 10^5 \text{ ms}^{-1} (> \text{イオン音速})$$

トロイダル方向のドリフト運動

( $\sim E \times B$  ドリフト速度  $v_{E \times B}$ )

# 外部電場 - プラズマの応答



電極に正電位:

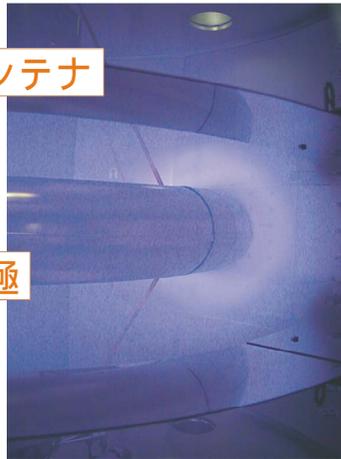
電極付近でプラズマ密度低下  
プラズマ中での電位降下は小さい

電極に負電位:

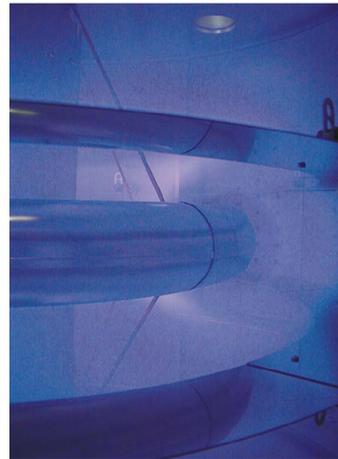
電極付近で電子密度増加  
( $n_e: 10^{13} \rightarrow 10^{14} \text{ m}^{-3}$ )  
プラズマ中に  $\sim \text{kV/m}$  の電場形成

rf アンテナ

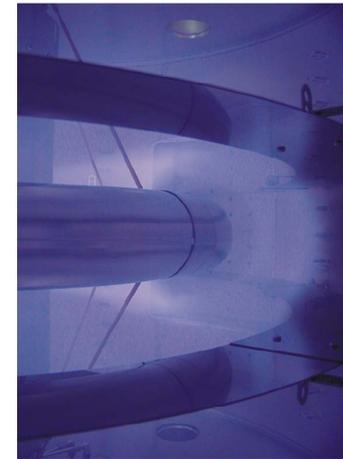
電極



電極負 ( $V_{ic} = -300V$ )  
電極付近で発光増加



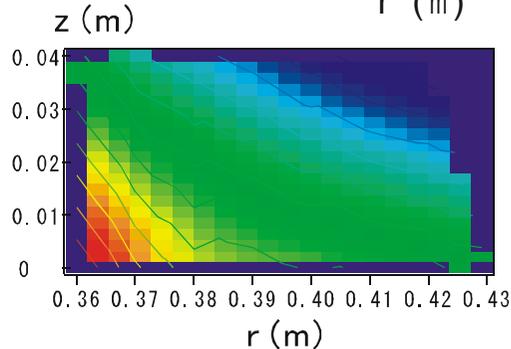
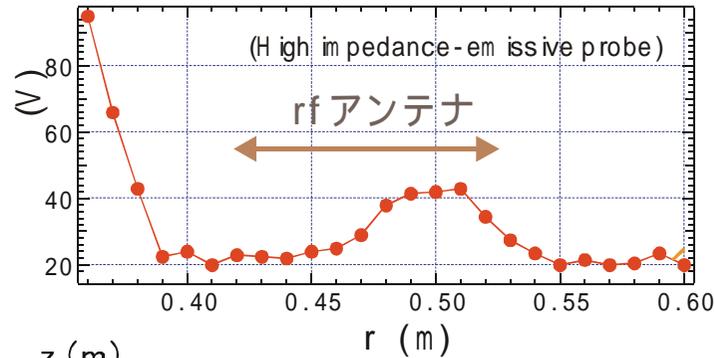
$V_{ic} = 0V$   
(電圧印加無し)



電極正  $V_{ic} = +300V$   
電極付近の暗部が拡大

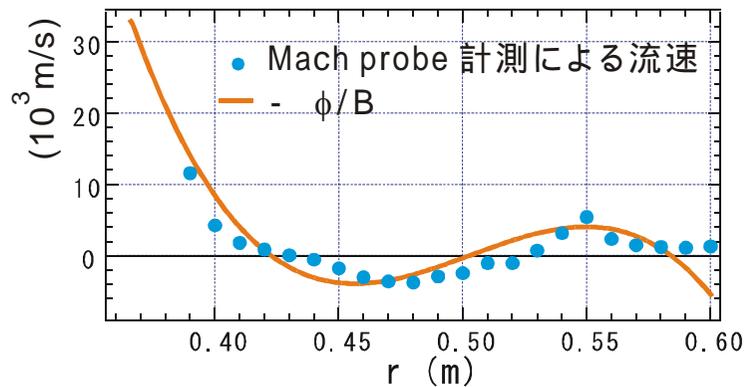
電極への電圧印加による発光分布の変化

# 電場形成とプラズマ流



ポテンシャル分布

z=0での  
径方向分布  
電極付近の  
2次元分布



流速とE×B速度の比較

電極に低電圧 (~ 100V) 印加時

( $E \times B$  ドリフト速度 < イオン音速)

電位分布

(エミッシブプローブによる計測)

電極とプラズマ生成部付近にピーク

$E \times B$  速度: 電位勾配/磁場 (コイル)

• Mach probe 計測による流速分布

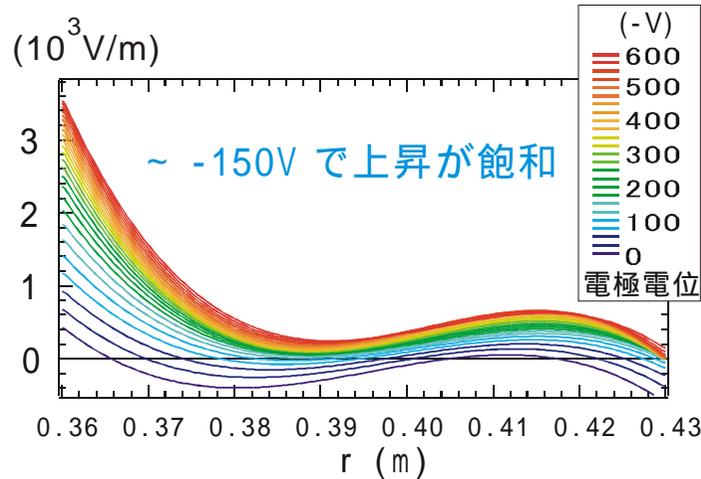
~  $E \times B$  速度場とほぼ同様

中性衝突が支配的な磁化

プラズマ中の粒子運動と一致

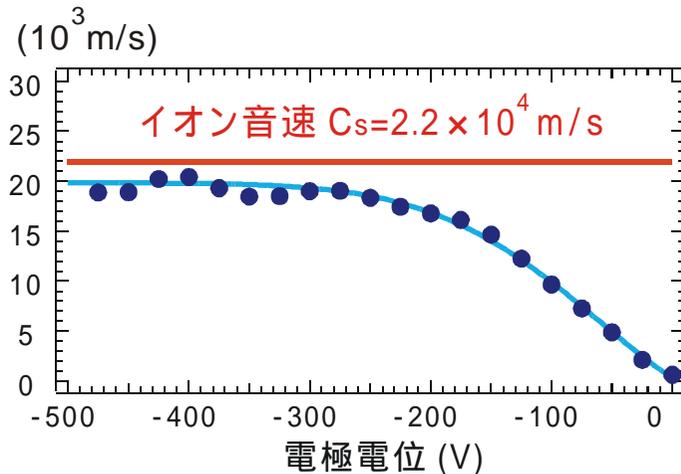
(流速はイオン音速以下)

# 電場とプラズマ流速の飽和



径方向の電場強度分布

(Emissive probe による電位分布からの計算値)



Mach プロブ計測によるプラズマ流速

( $r=36\text{cm}$ , 電極付近でのトロイダル方向の速度)

プラズマ中の電場強度:

電極付近で最大  $\sim 3 \text{ kV/m}$

プラズマ流速の上限付近で上昇が鈍化

トロイダル流速:

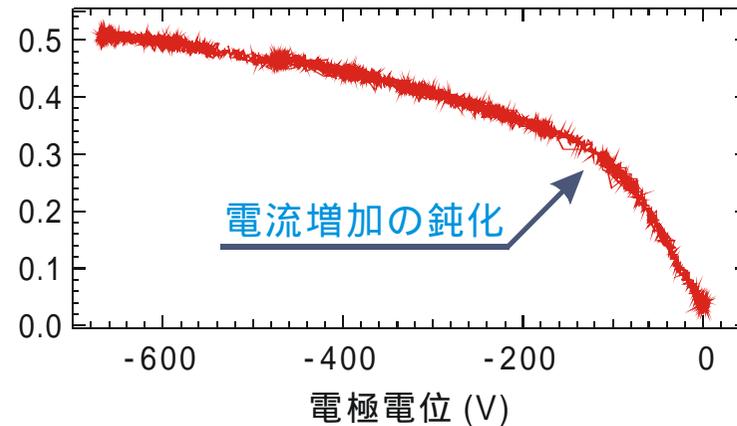
上限値  $\sim$  イオン音速 ( $2 \times 10^4 \text{ m/s}$ )

電場・流速の飽和  $\sim$  電極電流の飽和

$E \times B$  ドリフト速度  $>$  イオン音速

流体的効果による流れ駆動の上限を示唆

current (A)



電極-真空容器間の電流特性

## まとめ

### 結論

- **内部導体系**の弱電離プラズマ ( $n_e \sim 10^{14} \text{ m}^{-3}$ ,  $\sim 10^{-5}$ ) で、  
電極による**径方向電場** ( $\sim 3 \text{ kV/m}$ ) を形成し、  
イオン音速度 ( $\sim 2 \times 10^4 \text{ m/s}$ ) 程度の**トロイダル流**を駆動。
- 電極電位が低電圧 ( $E \times B$  ドリフト速度  $\sim < \text{イオン音速}$ ) 時、  
 $E \times B$  ドリフト速度に近いプラズマ流を駆動。
- 高電位印加時、流速等の上昇が飽和 ( $\sim \text{イオン音速}$ )、  
流体的な効果による流れの上限を示唆。

### 今後の課題

- 流速の向上と計測の高精度化。