

# 内部導体系プラズマ閉じ込め装置における 超高速流プラズマ実験

東大新領域

渡邊 将, 古川 勝

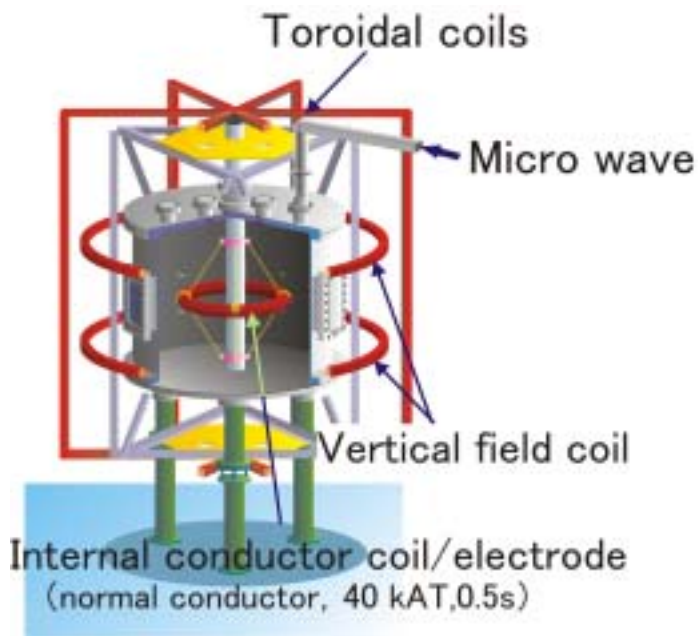
第9回若手科学者によるプラズマ研究会

# 本研究の背景と目的

流れを持つプラズマ\*<sup>1</sup>の超高 平衡状態の実験的検証  
プラズマ中に (Alfven速度程度の) 流れ場を形成

## Proto-RT (Prototype-Ring Trap) 装置

- ・常伝導吊り下げコイルによるダイポール磁場形成
- ・内部導体表面の電極によりプラズマ中の内部電位構造の外部制御が可能



Proto-RT俯瞰図

## Proto-RT実験

### 純電子プラズマ

- ・径方向の電場制御による閉じ込め改善\*<sup>2</sup>  
(古典拡散が上限となる閉じ込め, ~ 0.5sec)

### 中性プラズマ

13.56MHz, 2.45GHz RFにて生成した水素プラズマを用いた流れ駆動実験

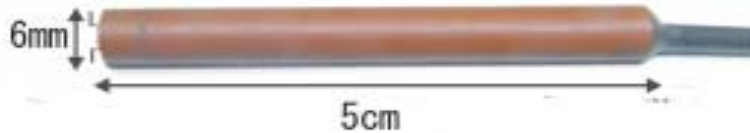
- ・電極を用いた外部電場印加
- ・電子入射によるプラズマの非中性化

### プラズマ中の電場構造の解明

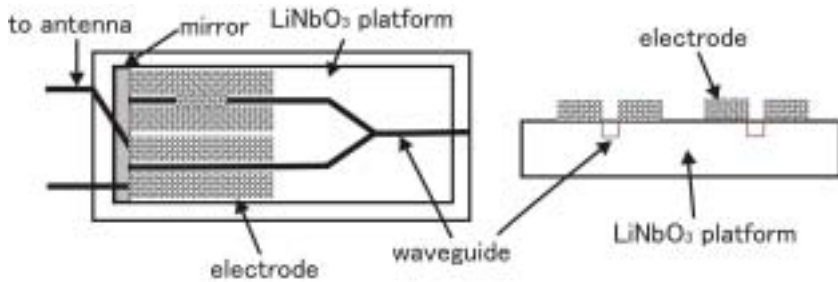
\* 1 Z.Yoshida and S.M.Mahajan, Phys.Rev.Lett, 88, 095001 (2002) \* 2 H.Saitoh et al., Phys.Rev.Lett, 92, 255005 (2004)

# プラズマ中の電場測定方法1

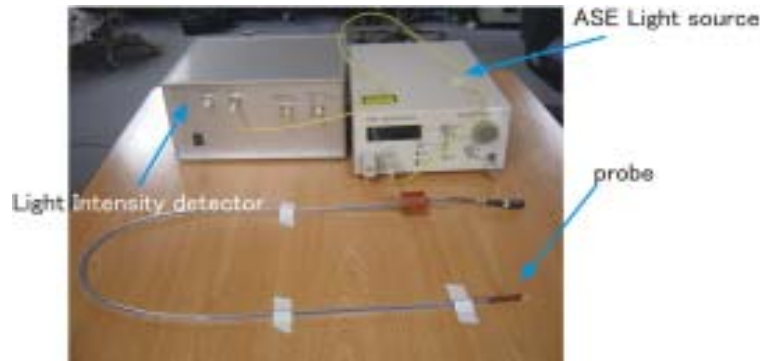
## ポッケルスセンサシステムによる電場計測



ポッケルスセンサプローブ部



プローブ部構造

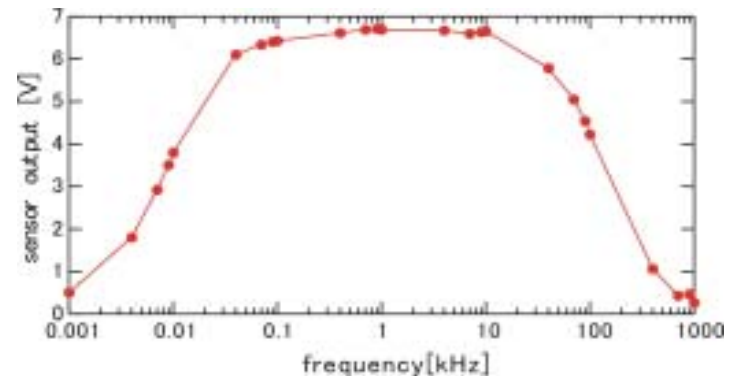


ポッケルスセンサシステム

- ・ポッケルス効果を用いた電場測定法  
(第一原理的電場の計測)
- ・プローブ部にMach-Zehnder干渉計を形成  
光の強度から電界強度を測定
- ・広帯域での電場の計測が可能  
(50Hz ~ 100kHz)

## プローブ部

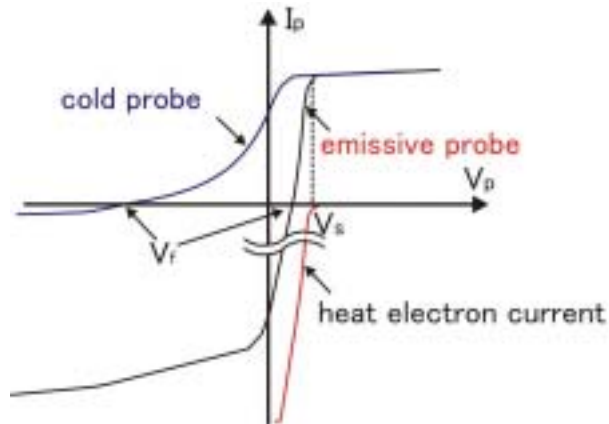
- ・ポッケルス結晶にLiNbO<sub>3</sub>を使用
- ・アンテナより外部のポテンシャルを受け、  
片方の導波路の電極間に電場が印加される



センサの周波数特性

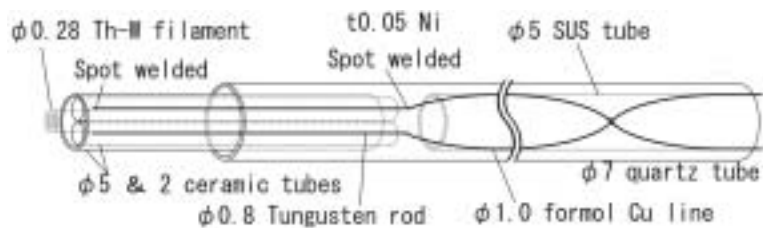
# プラズマ中の電場測定方法2

## Emissive Langmuir probeによる空間電位計測



emissive probe特性

- ・熱電子をプラズマ中に放射  
空間電位にてcold Langmuir probeと特性が変化
- ・熱電子の放出 = イオン電流となるため  
浮遊電位  $V_f$  は空間電位へ近づく  
高圧プローブを用いた浮遊電位の計測



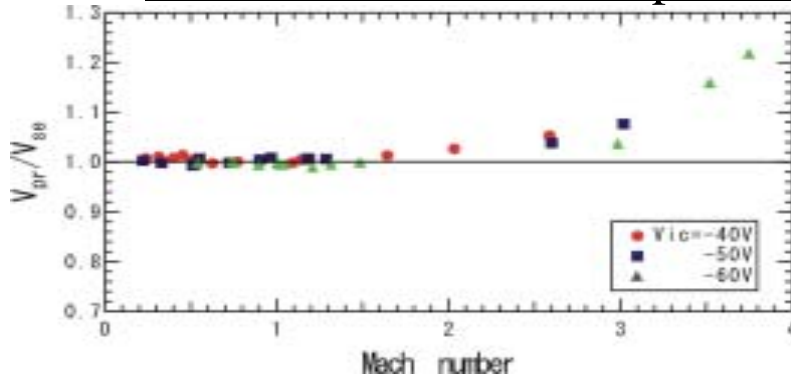
(電流加熱型)emissive probe構造

- ・プローブチップにTh-Wを使用
- ・プローブチップを電流( $\sim 5A$ )にて加熱  
熱電子を放出

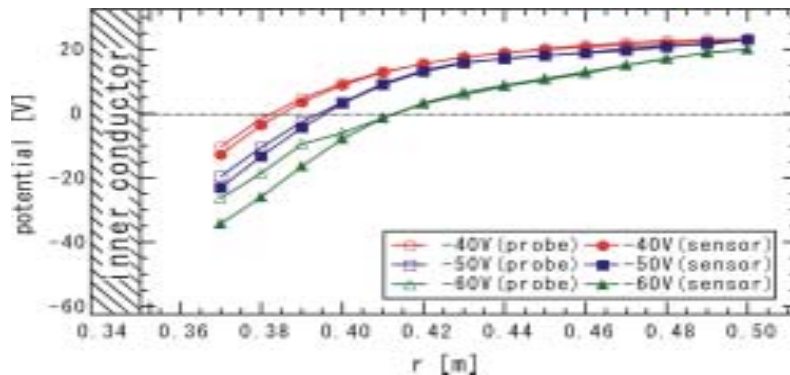
## プローブアレイを用いた空間電位の2次元分布の計測

# プラズマ中の電場測定方法3

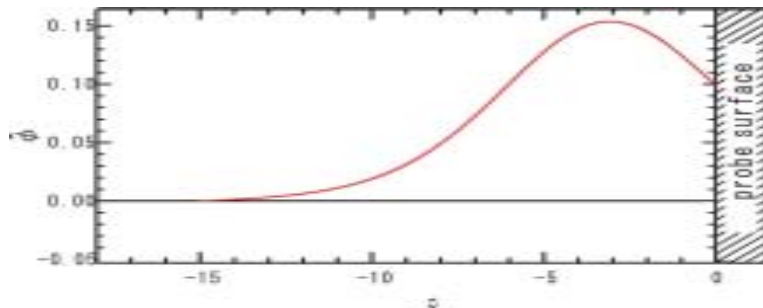
## プラズマ流がEmissive probeに与える影響



径方向のポテンシャル分布



センサとプローブの測定結果の比較

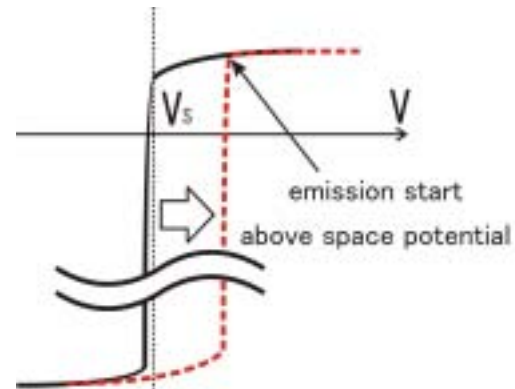


プローブ表面付近のポテンシャル(マッハ数1.5)

- ・ポッケルスセンサとエミッシブプローブでの結果を比較  
イオン音速を超えた付近にて測定結果にずれが生じた
- ・イオンの熱運動を考慮したモデルにてプローブ表面のポテンシャルを計算  
プローブ前方にプラズマの電位よりも大きい電位のポテンシャル構造が発生

## イオン衝撃波による影響

- ・プローブのI-V特性が変化  
イオン音速を超える流れ中ではポッケルスセンサによる測定を行う



I-V特性の変化

# 実験装置Proto-RTの構成

## ・Dipole,垂直磁場コイル

純ポロイダル磁場配位

## ・Dipoleコイル電流

10.5kAT(DC)

44kAT(0.5sec)

## ・内部導体表面電極

径方向電場の形成と

$E \times B$ ドリフトによる

トロイダル流の発生

## ・プラズマ生成

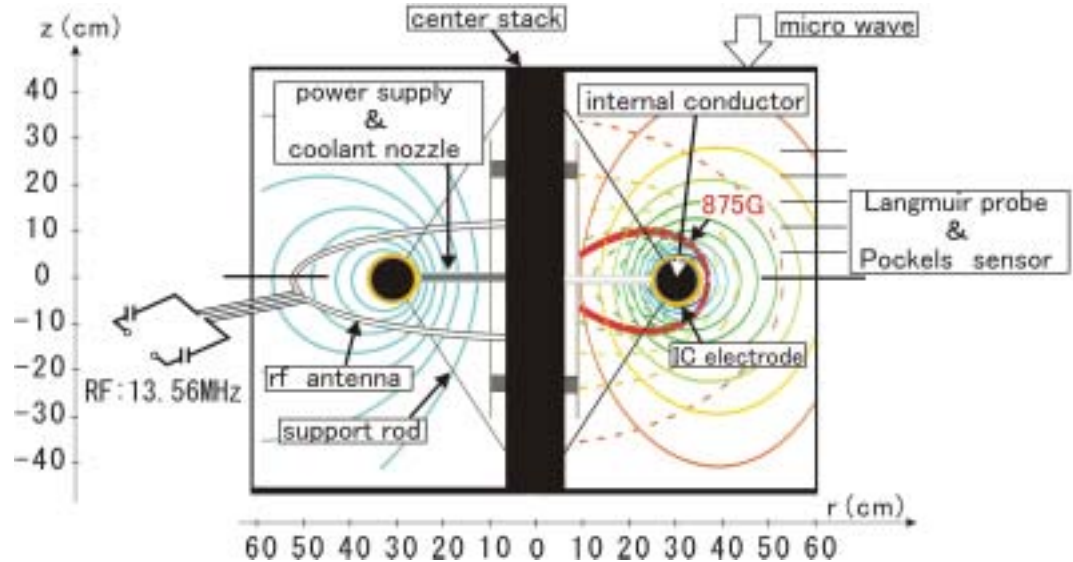
13.56MHz RF, 2.45GHz

マイクロ波による

水素プラズマ

## ・電子温度・密度計測

ダブルプローブ 計測



Proto-RT装置とポロイダル磁場配位

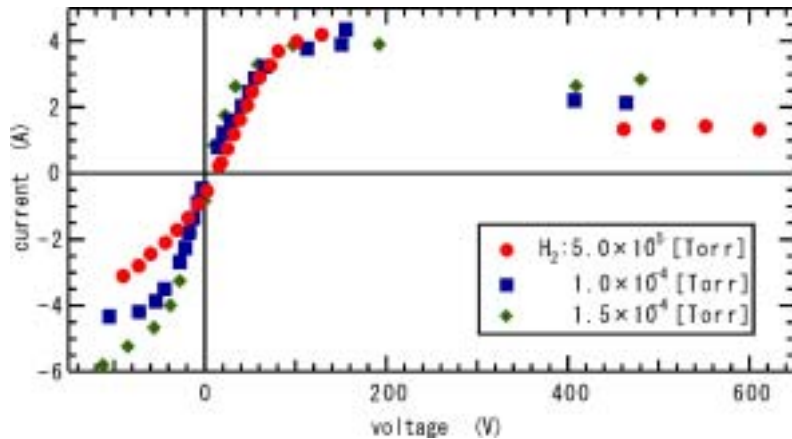
(左:13.56MHz RF,右2.45GHz ECRプラズマ実験)

## Proto-RTでのプラズマパラメータ

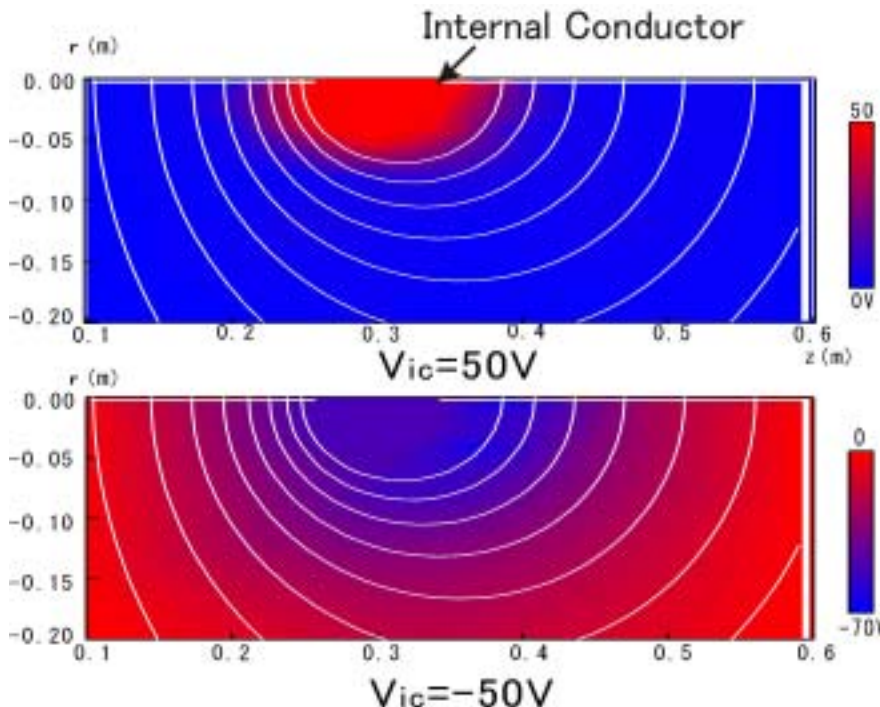
		13.56MHz	2.45GHz
$n_e$	電子密度	$1.0 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$	$1.1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$
$T_e$	電子温度	$\sim 5 \text{ eV}$	$\sim 20 \text{ eV}$
$n_n$	中性粒子密度	$8.8 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$	$1.7 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$
B	磁場強度	0.01 T	0.08 T
$n_i$	中性粒子-イオン衝突周波数	$5.9 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$	$1.1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$
$n_{ii}$	イオン-イオン衝突周波数	$6.9 \text{ s}^{-1}$	$3.4 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$
$C_s$	イオン音速	$2.2 \times 10^4 \text{ m/s}$	$4.3 \times 10^4 \text{ m/s}$
$V_a$	アルフベン速度	$7.0 \times 10^7 \text{ m/s}$	$4.6 \times 10^6 \text{ m/s}$



# 電極バイアス実験結果



電極電位-電極電流の関係(ECRプラズマ実験)



Proto-RTポロイダル面の空間電位分布

## 電極電位-電流の関係

古典的摩擦力と  $j \times B$  によるトルクが  
バランスし、

$$j_r \approx \frac{q^2 n_e v}{m_i \omega_{ci}^2} E_r$$

のスケーリングに一致

- ・13.56MHz RF実験

古典拡散が支配的 (  $\nu = \nu_{ni}$  )

- ・2.45GHz ECRプラズマ実験

イオン-イオン衝突が支配的 (  $\nu = \nu_{ii}$  )  
電離度による影響

## 電位印加時のポテンシャル構造

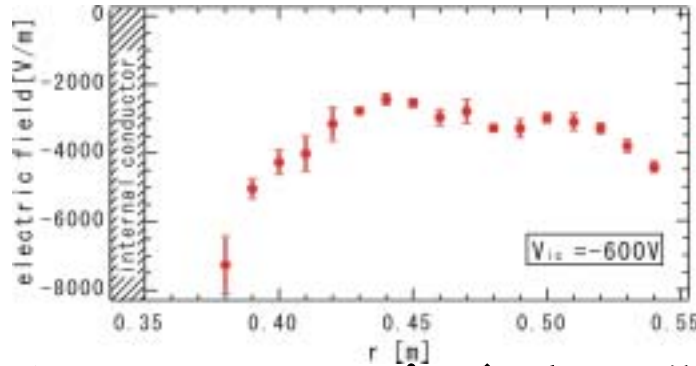
- ・**正電位**印加

内部導体表面付近にて電位が降下  
他の部分はほぼ0電位

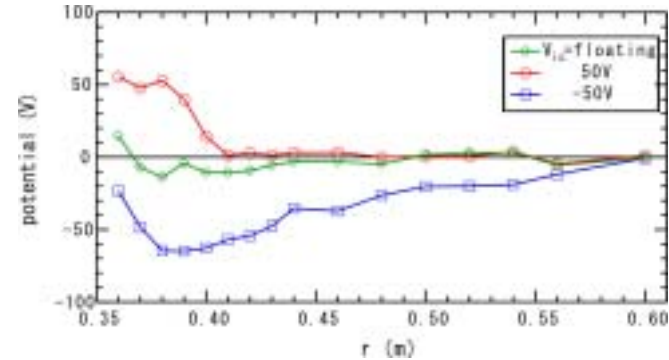
- ・**負電位**印加

閉じ込め領域全体に電場形成

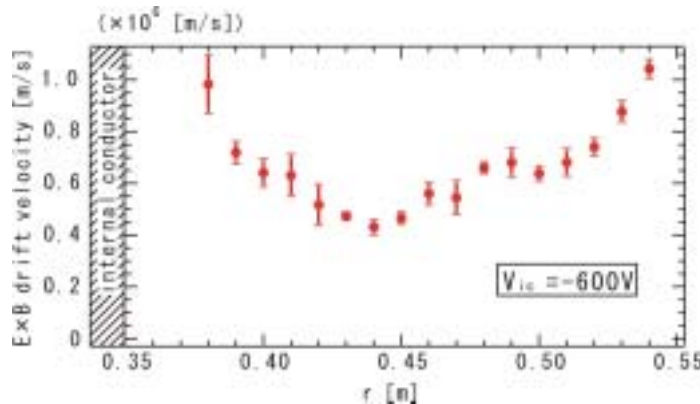
# 電場形成とプラズマ流の駆動



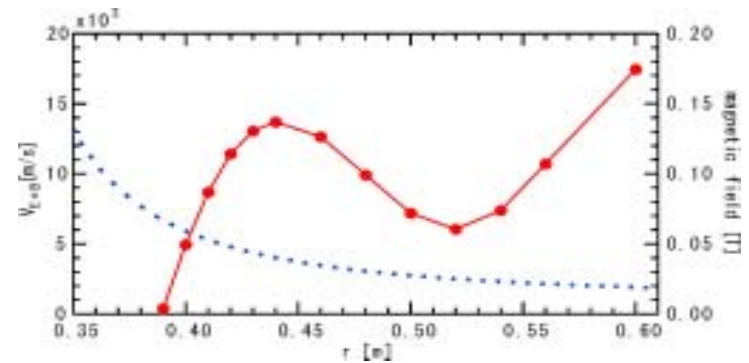
ポッケルスセンサによるプラズマ空間電位分布  
(13.56MHz RF実験)



emissive probeによるプラズマ空間電位分布  
(2.45GHz ECRプラズマ)



E × Bドリフト速度分布



E × Bドリフト速度分布 (V<sub>ic</sub> = - 50 V)

## E × Bドリフトによる流速分布

- ・13.56MHz RF実験: イオン音速を超える流れの駆動\*
- ・2.45GHz ECRプラズマ:

V<sub>ic</sub> = -50V印加時、15km/s程度のプラズマ流の駆動(イオン音速の半分程度の流れ)

\* H.Saitoh et al., Phys.Plasmas,11,3331(2004)



# まとめ

- ・内部導体系プラズマ閉じ込め装置Proto-RTでは
  - ・ポッケルスセンサ
  - ・emissive Langmuir probeを用いてプラズマ中の電場構造の測定を行っている
- ・内部導体電極を用いた外部電場印加実験ではトロイダル流形成に必要なトルクは古典的な摩擦力とバランスする
  - ・13.56MHzでの電極バイアス実験: 古典拡散が支配的
  - ・2.45GHzマイクロ波によるECRプラズマ: イオン-イオン衝突が支配的  
(電離度の上昇のため)
- ・電極電位を制御
  - ・正電位: 内部導体付近で電位が降下、密度が減少
  - ・負電位: プラズマ内部に電位形成
- ・プラズマ流の生成
  - ・13.56MHz RFプラズマ: イオン音速を超える流れの駆動
  - ・2.45GHz ECRプラズマ: イオン音速の半分の流速を達成