

内部導体装置Proto-RTにおける 外部電場を用いたプラズマ電位分布構造の制御

東大新領域, 東大高温プラズマ研究セ^A

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

1. 研究背景: 内部導体系プラズマ中の流れ駆動
2. 電極を用いた径方向電場の形成実験
3. 電子銃からの電子入射による非中性化
4. まとめと今後の課題

研究背景と本研究の目的

流れを持つプラズマの平衡状態と構造*の実験的検証

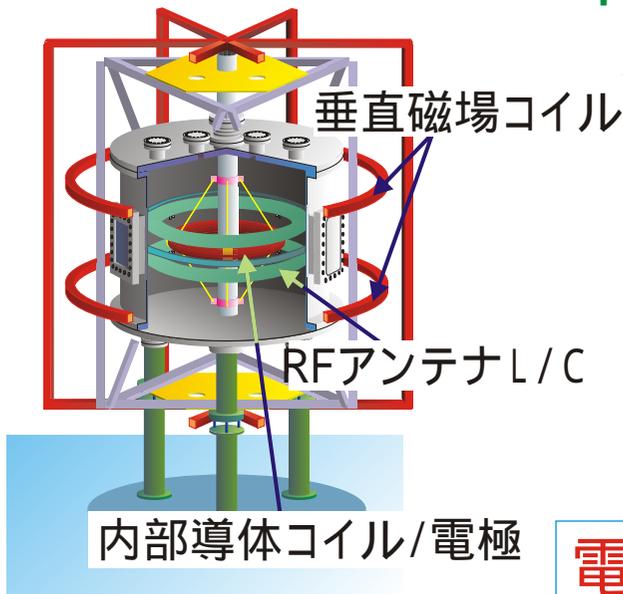
- 内部導体系プラズマ閉じ込め装置

Dipoleコイル + 垂直磁場コイルによるポロイダル磁場配位
径方向電場の形成 $E \times B$ ドリフトによるトロイダル流の駆動

流れがプラズマに与える効果の検証

- Proto-RT (Prototype-Ring Trap) 装置

磁場配位: Dipole磁場 (常伝導, 10kAt),
垂直磁場, トロイダル磁場コイル
(~ 100G, 13.56MHz RF放電プラズマ)



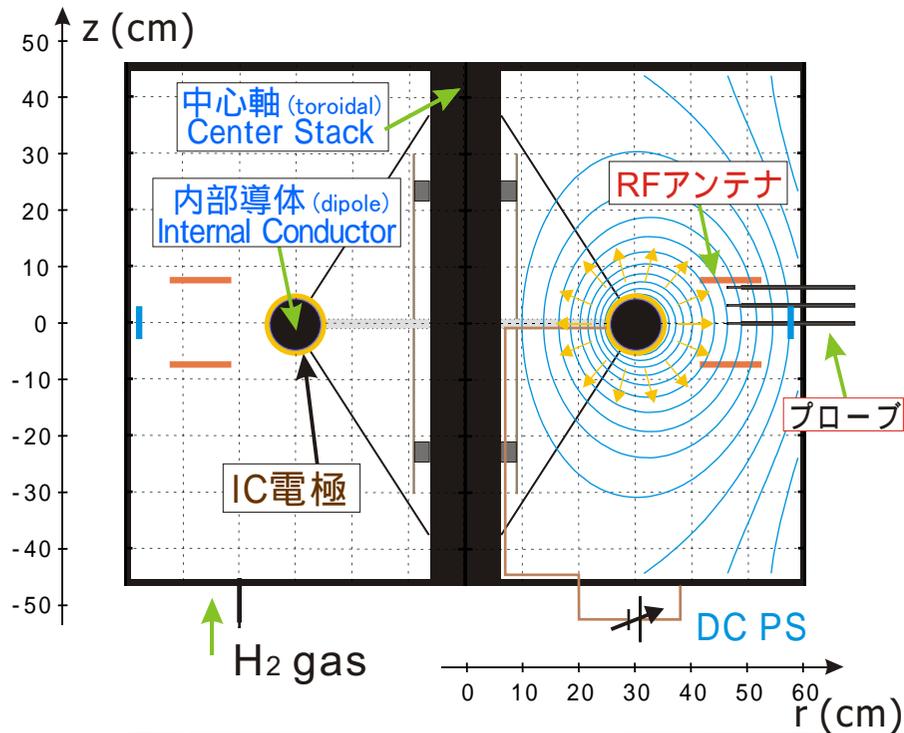
電場形成 : 内部導体系上に設置した電極
: LaB₆カソード電子銃

Proto-RT装置

電極/電子入射に対するプラズマの応答

* S. M. Mahajan and Z. Yoshida, Phys. Rev. Lett. 81, 4863 (1998)

実験装置Proto-RTの構成



- Dipole磁場, 垂直磁場コイル
純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

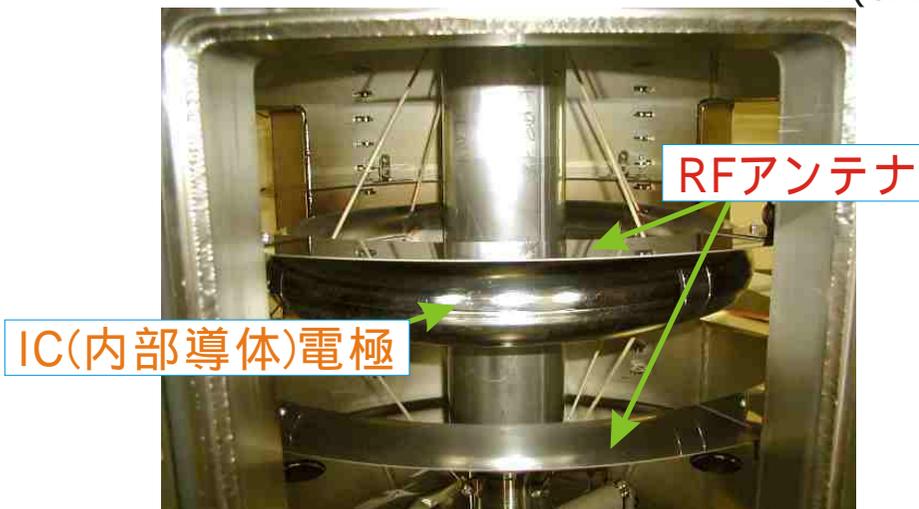
- C結合/L結合 13.56MHz RF放電

- 静電プローブ計測

Langmuir プローブ (T_e, n_e)

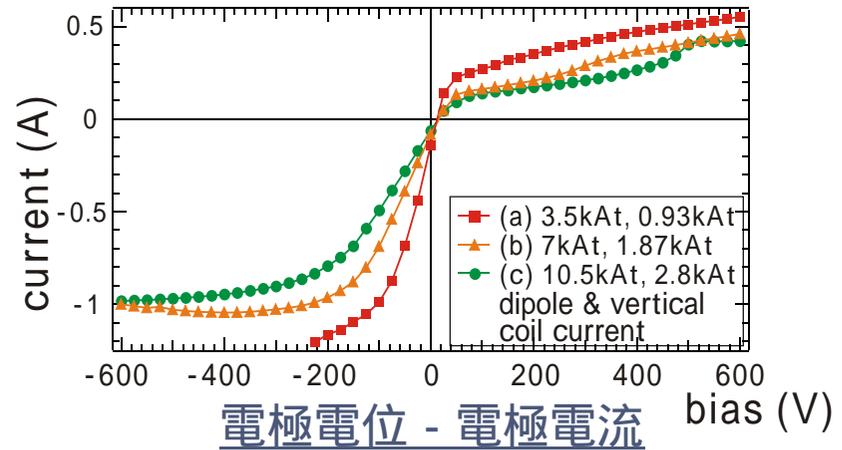
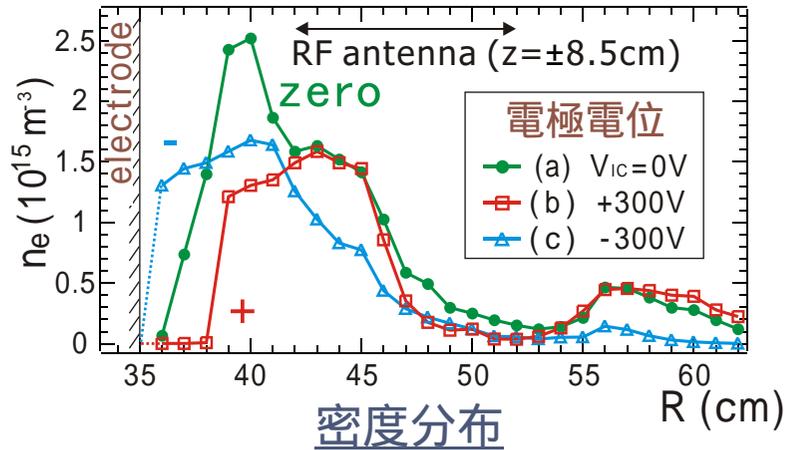
(低周波 RF 用)

Emissive プローブ (plasma)

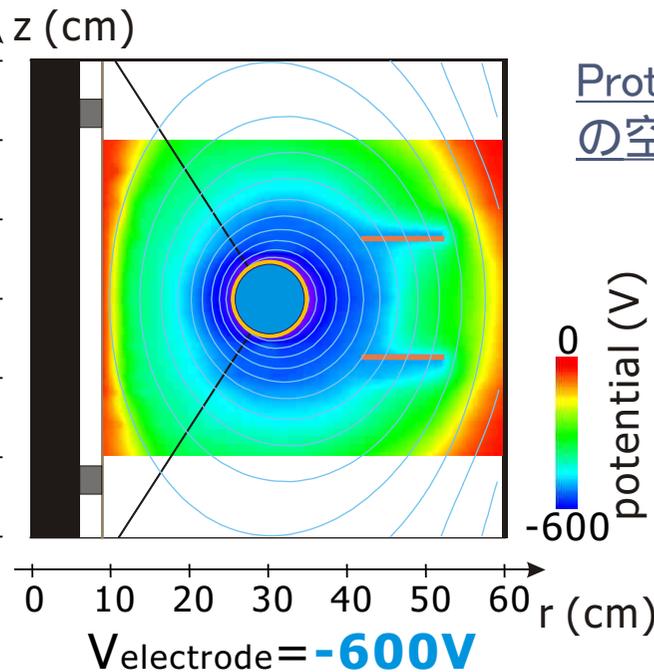
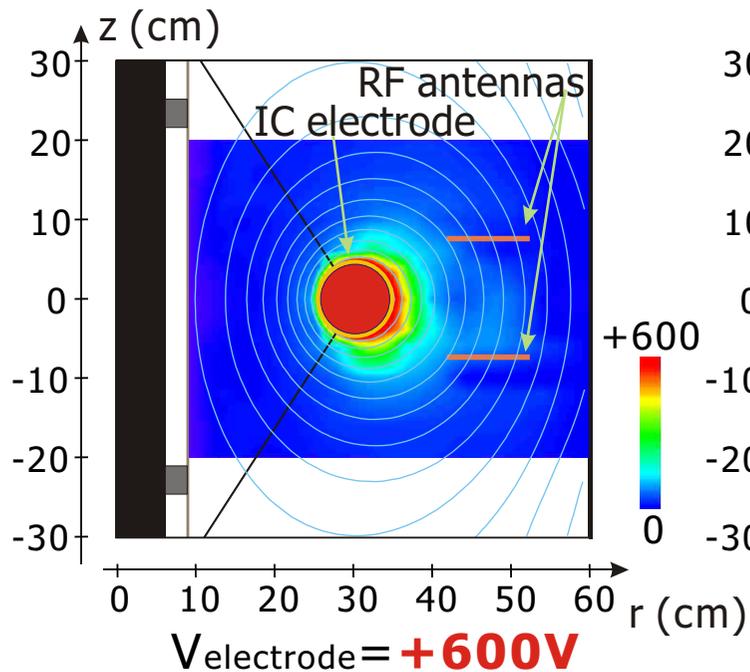


Proto-RT r-z断面と, 装置内部のRFアンテナ・電極

電極バイアスによる電場形成



- 内部導体電極 (プラズマ中心部) のバイアス
正電極付近に低密度領域, 電極電流の制限



Proto-RT $r-z$ 断面
の空間電位分布

正電位:
電極周辺の
低密度領域
で電位降下

負電位:
容器壁までの
広い範囲に電場

中性衝突による輸送とトロイダル流

Proto-RT プラズマのパラメータ

n_e	電子密度	$1 \times 10^{15} \text{m}^{-3}$
T_e	電子温度	5eV
T_i	イオン温度	$\sim 0.5 \text{eV}$
n_n	中性粒子密度	$8.8 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$
B	磁場強度	0.01 T
ω_{ci}	イオンジャイロ周波数	$1.0 \times 10^6 \text{rad s}^{-1}$
ω_{ni}	中性粒子-イオン衝突周波数	$5.9 \times 10^4 \text{s}^{-1}$
ω_{ie}	イオン-電子衝突周波数	4.7s^{-1}
ω_{ii}	イオン-イオン衝突周波数	6.9s^{-1}
V_{ExB}	$E \times B$ ドリフト速度	$3.0 \times 10^5 \text{ms}^{-1}$
c_s	イオン音速	$2.2 \times 10^4 \text{ms}^{-1}$
v_a	アルフベン速度	$7.0 \times 10^7 \text{ms}^{-1}$

中性衝突が支配的な低密度プラズマ

ポロイダル配位でのイオンの運動 :

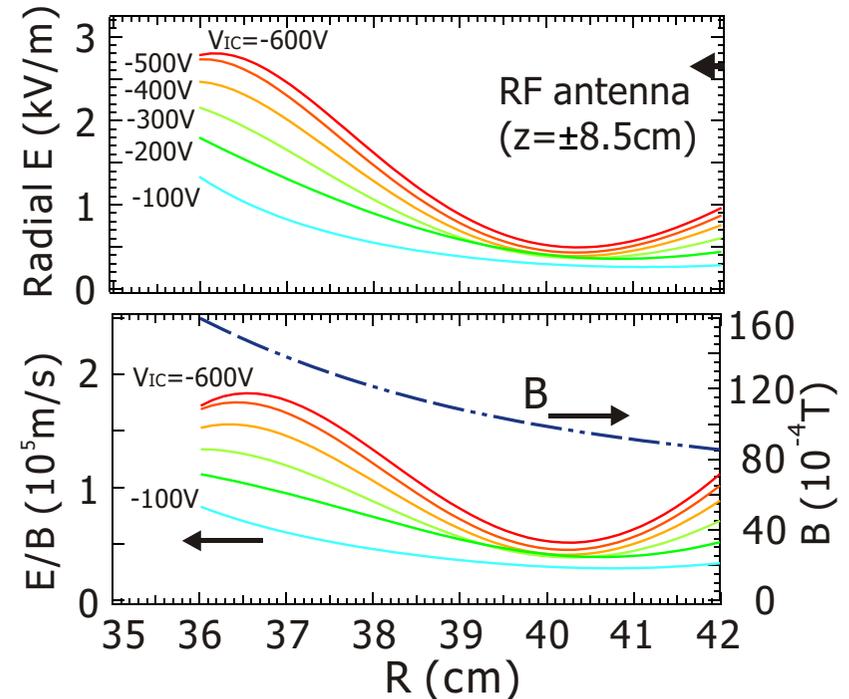
$$\mathbf{v}_i = \frac{q}{m_i} \frac{n_i}{\omega_{ci}} \mathbf{E} + \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$$

径方向運動
(中性衝突による輸送)

$$j_r \sim 10^{-3} \times E_r \text{ (主にイオン電流)}$$

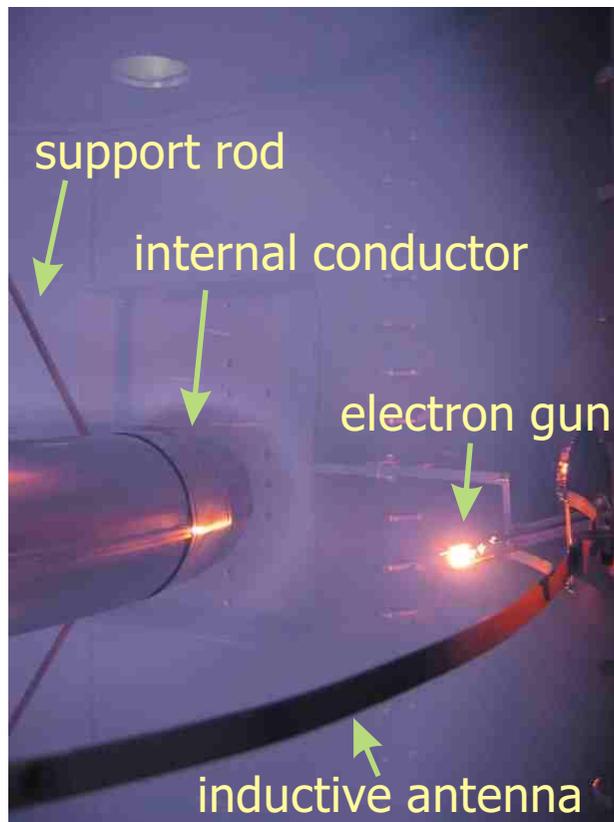
電場: $\sim 3 \text{kV/m}$ で飽和
電流密度: $\sim 1.7 \text{A/m}^2$

トロイダル周回運動
 $\sim E \times B$ ドリフト速度



電位勾配と $E \times B$ ドリフト速度の計算値

プラズマ中への電子ビームの入射



・ 電子銃による入射

Cathode-anode間電位による初期加速

プラズマ外部/周辺部からの電子注入

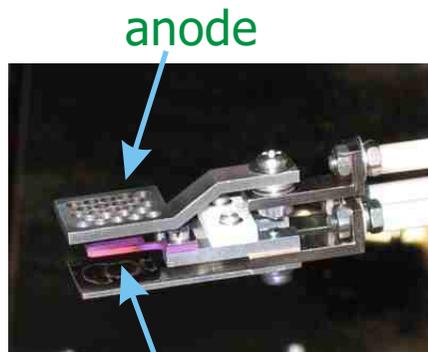
LaB₆カソード電子銃

引き出し電流 ~ 1A, 加速電圧 ~ 1kV

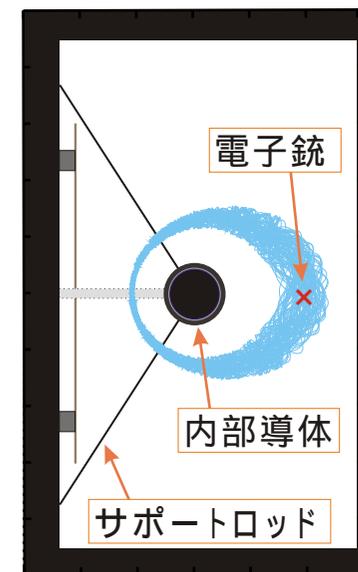
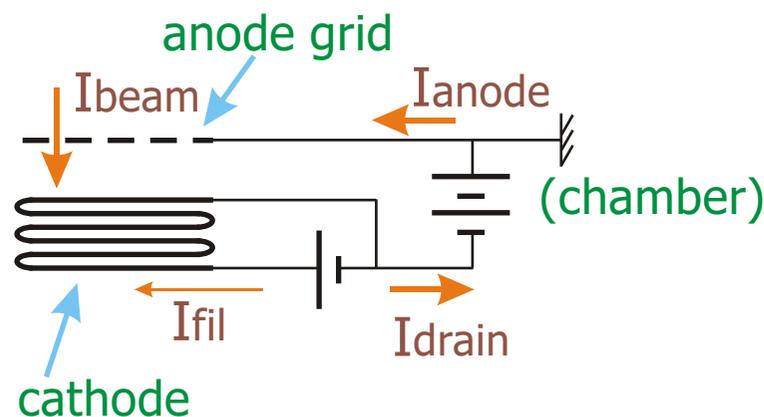
RFプラズマへの電子入射実験

電子銃の構造と配置

13.56MHz rf による誘導結合
プラズマ中における電子銃

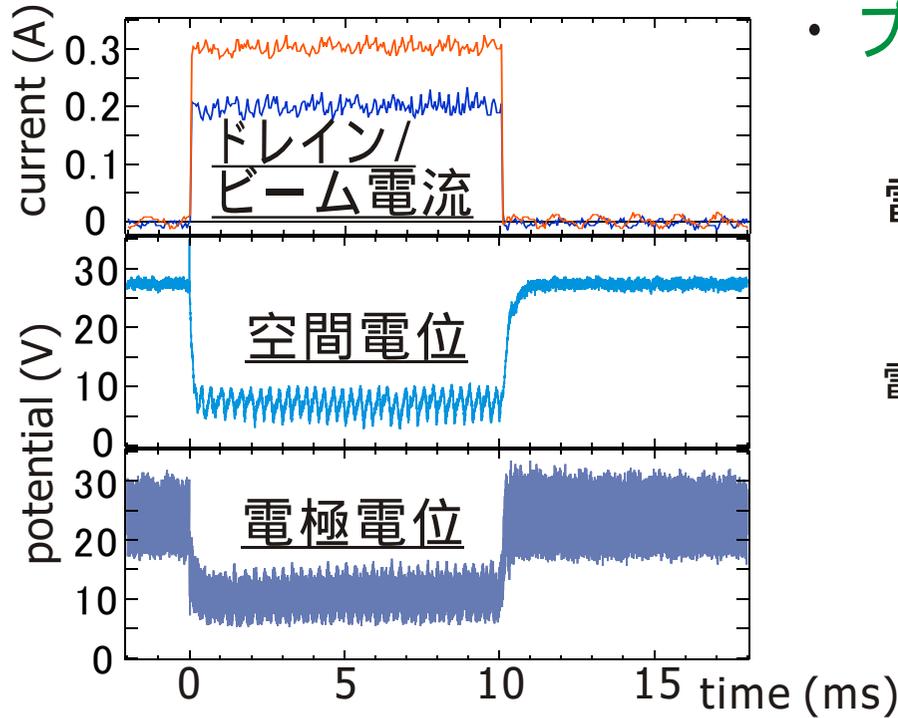


LaB₆ cathode



電子軌道(電場無し)

電子入射による電位分布の変化



電子入射中のプラズマ電位の変化

- プラズマ周辺部からの電子入射
プラズマ空間電位の降下

電位降下 $\sim 30\text{V}$, 電場 $\sim 50\text{V/m}$

空間電位はゼロ付近で飽和

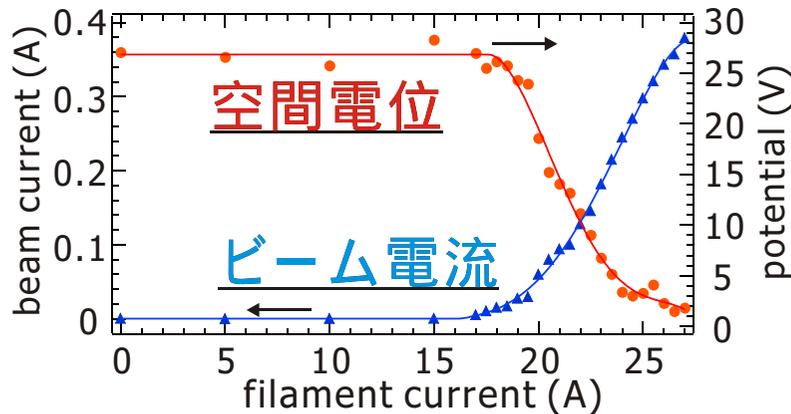
電子閉じ込め時間 $\sim 10^{-7}\text{C}/0.1\text{A}=1\text{ s}$

cf) 純電子実験 $\sim 100\text{ s}$ ($n_e=10^{13}\text{m}^{-3}$)

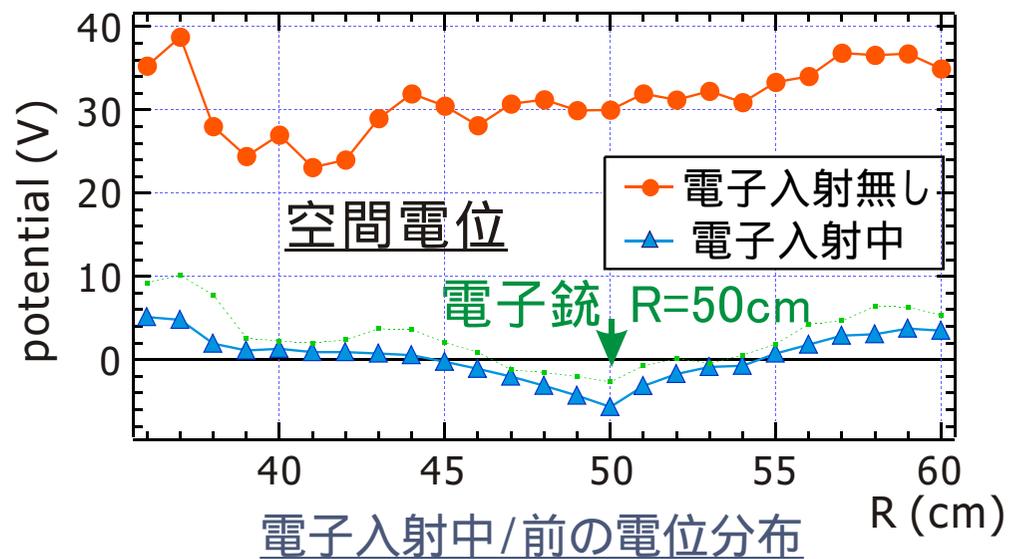
$\sim 100\text{ms}$ ($n_e=10^{12}\text{m}^{-3}$)

プラズマを介した電子損失

分布の改善(今後の課題)



ビーム電流と空間電位の飽和



電子入射中/前の電位分布

まとめと今後の課題

- ・ 内部導体型閉じ込め装置Proto-RTにおいて,
 1. 電極を用いた外部電場
 2. LaB₆カソード電子銃からの電子ビームの入射による径方向電場の生成実験を行った.
- ・ 粒子輸送には中性衝突が支配的 ($n_e=10^{15}\text{m}^{-3}$, $T_e=5\text{eV}$), 電極バイアス時の電流値と径方向電場強度の傾向と一致.
- ・ 電極に負電位を与えた際, プラズマ内部に電位形成, トロイダル方向の $E \times B$ 速度 $\sim 10^5\text{m/s}$ (\sim イオン音速度).
- ・ 電子入射によるプラズマの空間電位の降下は $\sim 30\text{V}$ で, 空間電位の最低値はゼロ付近, プラズマを介した電子損失.
- ・ 電子入射実験に関して, 磁場配位/強度の改善等を検討中.