

# 径方向電場制御によるトロイダル 電子プラズマの閉じ込め特性の改善

東大新領域, 東大工<sup>A</sup>

齋藤晴彦, 吉田善章, 森川惇二<sup>A</sup>, 渡邊将

1. 研究の背景と目的
2. 内部電位分布構造
3. 閉じ込め時間
4. まとめ

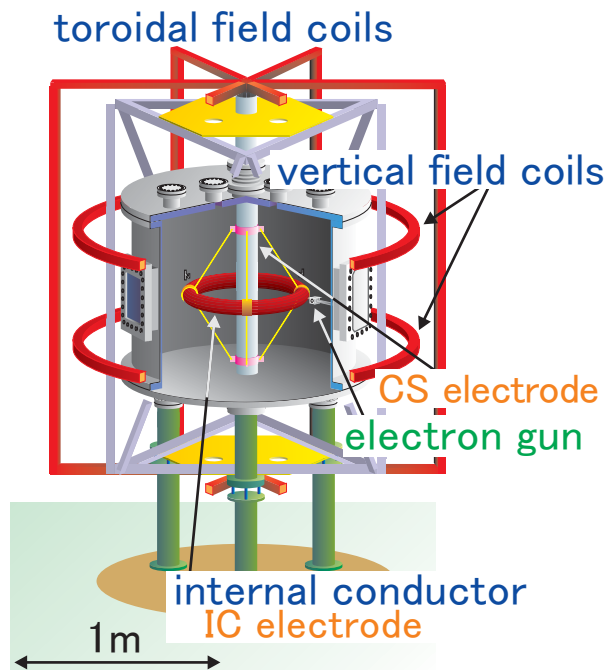
# 研究背景と本研究の目的

電場構造と流れ場を持つ磁化プラズマ

Proto-RT(Prototype-Ring Trap)装置:

トロイダル磁気面配位における非中性プラズマの実験研究

- 高速流を持つプラズマの平衡(Double Beltrami state)\*の検証  
プラズマの非中性化による径方向電場・流れ場の形成\*\*
- トーラス系における非中性プラズマ\*\*\*の特性



Proto-RT装置俯瞰図

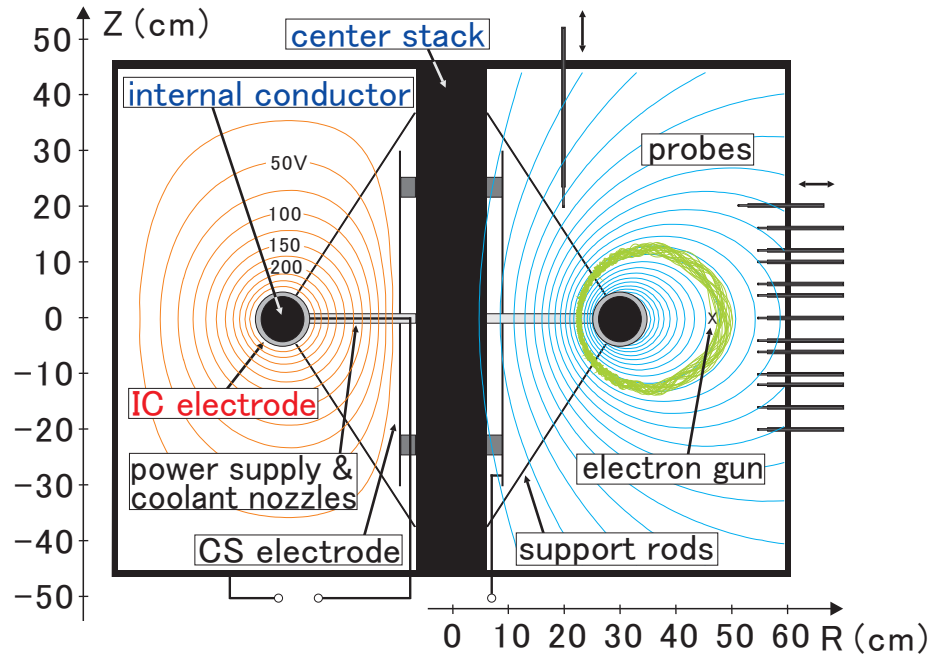
- 磁気面配位 (cf. 純トロイダル磁場)
  - 内部導体上の電極による電位構造制御
- ⇒ トロイダル電子プラズマの長時間閉じ込め

- 閉じ込め特性の評価
- 電位制御によるプラズマの安定化
- 閉じ込め時間(減衰時定数)の評価

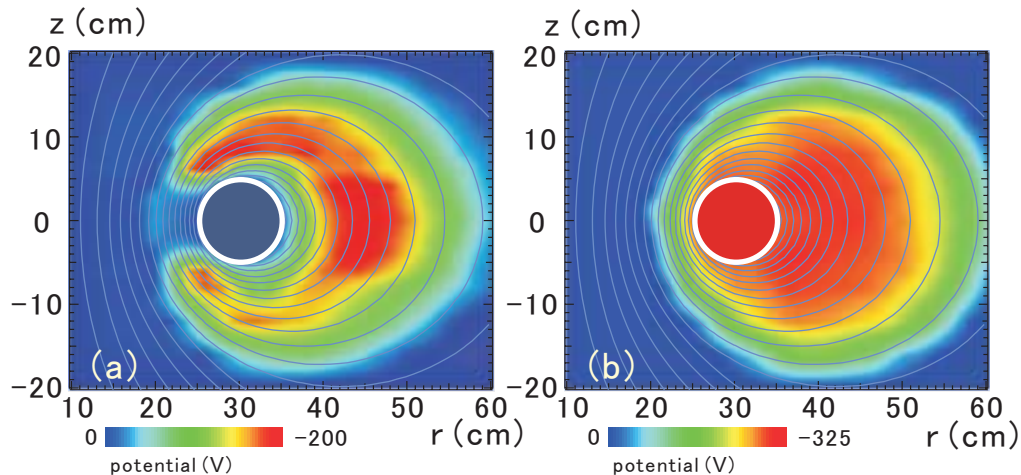
\* PRL **81** 4863 (1998), PRL **88** 095001 (2002). \*\* 講演15aXB-1.

\*\*\* in Non-neutral Plasma Physics III, PRL **92** 255005 (2004).

# 装置の構成と測定方法



装置断面と磁気面, 等電位面  
dipole磁場配位, 電極 $V_{IC} = -300V$

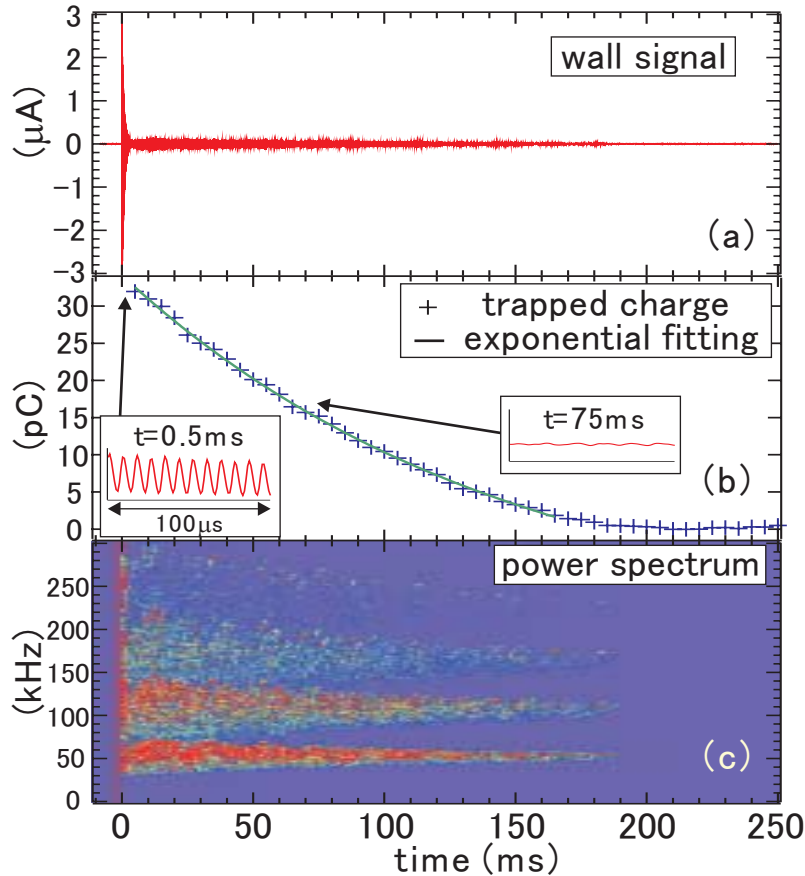


電子入射中の空間電位分布,  $V_{IC} =$  (a) 0V (b) -300V  
(b)では磁気面と等ポテンシャル面が接近

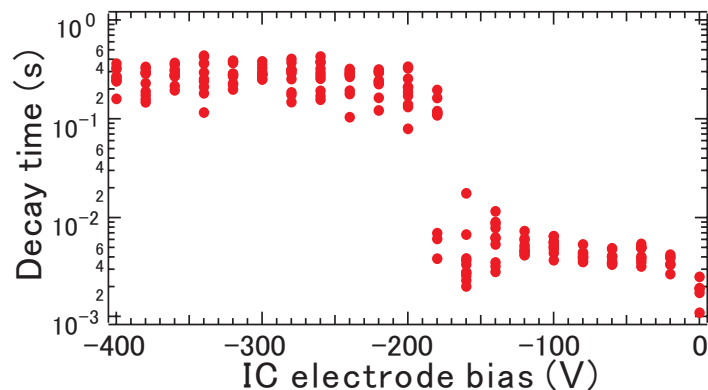
- 磁場コイル構成:  
内部導体 (dipole磁場) 10.5kAT  
垂直磁場コイル 5kAT  
トロイダル磁場コイル 30kAT  
 $B \sim 100G$ , ( $n_{\text{Brillouin limit}} \sim 5 \times 10^{14} m^{-3}$ )
- 外部電場によるバイアス  
電極 ~ 真空容器間に DC  $\sim 600V$
- LaB<sub>6</sub>カソード電子銃による電子入射

- 空間電位分布測定  
emissive Langmuir probes  
(電子入射中:  $I_{\text{probe}} \ll I_{\text{beam}}$ )  
 $n_e \sim 10^{13} m^{-3}$ ,  $Q \sim 10^{-7} C$
- 静電揺動測定  
wall probes 5 × 5mm foil  
5 × 250mm foil  
⇒ 閉じ込め電荷の見積  
(同一ポロイダル断面上)

# Wall probeによる電荷の評価

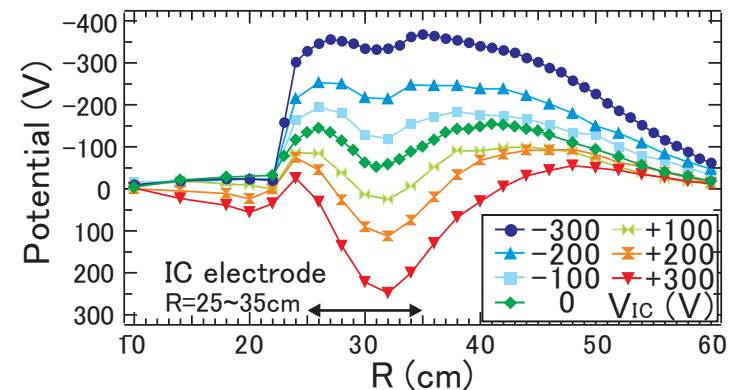


電極負バイアス時の静電揺動



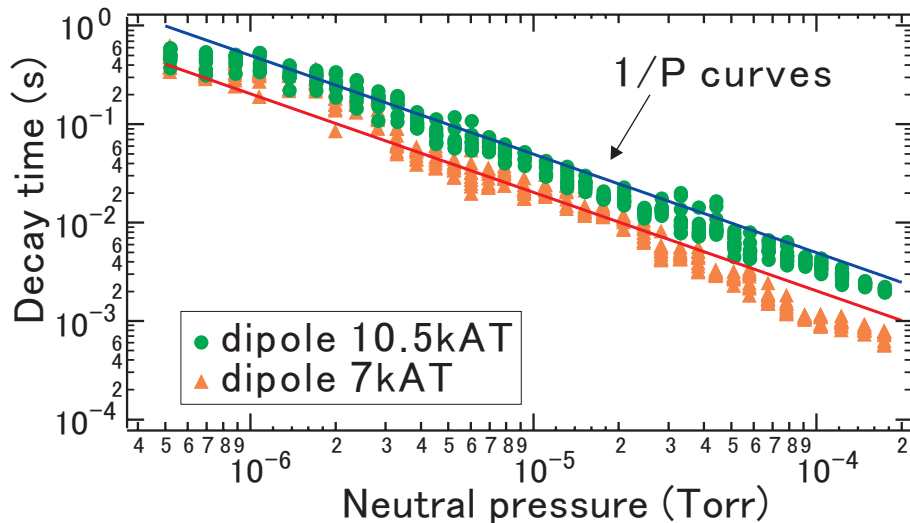
電荷減衰時定数の電極電位依存

- 電子入射 300V加速 ( $t=-100\sim 0\mu\text{s}$ )  
dipole磁場 (定常7kAT)  
電極バイアス電位  $V_{IC}=-300\text{V}$
- 電子銃停止後の電荷:  
⇒  $t\sim 1\text{ms}$ で $\sim 5\%$ まで減少 ( $5\times 10^{-9}\text{C}$ )  
揺動振幅は空間電位の10%程度
- ⇒ 電位制御無し ( $V_{IC}=0\text{V}$ ):  
安定化せず電荷は $\sim \text{ms}$ で消滅
- 電極による負バイアス時:  
揺動持続 (振幅は1%以下に減衰)  
(初期の中空状の電位分布の解消)  
電荷は $\sim 100\text{ms}$ 程度で指数関数的減少



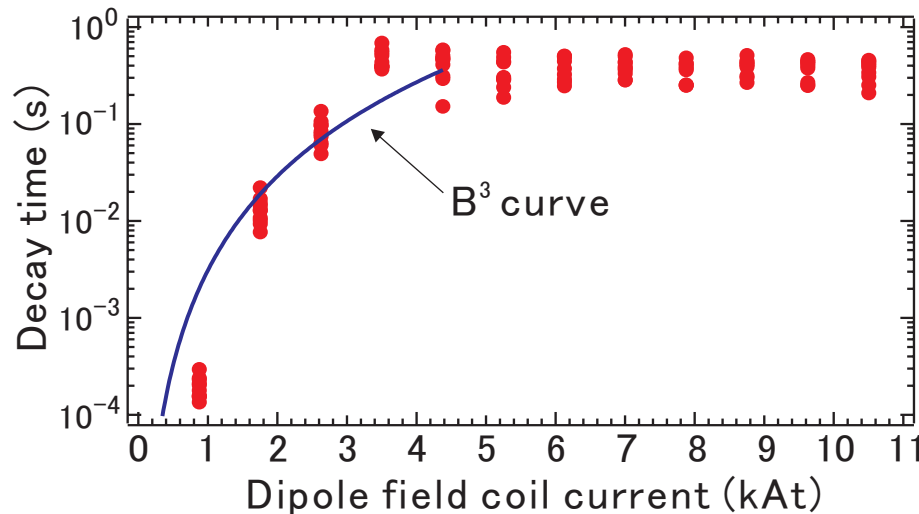
径方向電位分布 ( $Z=+6\text{cm}$ )

# 粒子閉じ込め時間



背景ガス圧依存

dipole磁場, 電極 $V_{ic}=-300V$ , 水素追加



磁場強度依存 (dipole磁場配位)

dipole磁場, 電極 $V_{ic}=-300V$ ,  $5 \times 10^{-7}$  Torr

- $t \sim 1\text{ms}$ 以降の電荷減衰時定数  
(安定な揺動の持続時)  
 $\tau \sim 0.5\text{s}$  (at base pressure)

- 古典拡散時間 (中性粒子との衝突)

$$\tau_{classical} \approx v_{en}^{-1} (\lambda_D / r_L)^2 \propto B^2 P^{-1}$$

$v_{en}$  衝突周波数

$\lambda_D$  デバイ長       $r_L$  ラーマー半径

$B$  磁場強度       $P$  中性ガス圧力

$$B \sim 100\text{G} \quad P = 5 \times 10^{-7}\text{Torr} \quad T_e \sim 1\text{eV}$$

$$\Rightarrow \tau_{classical} \approx 100\text{ms}$$

- 背景ガス圧力 (水素) 依存

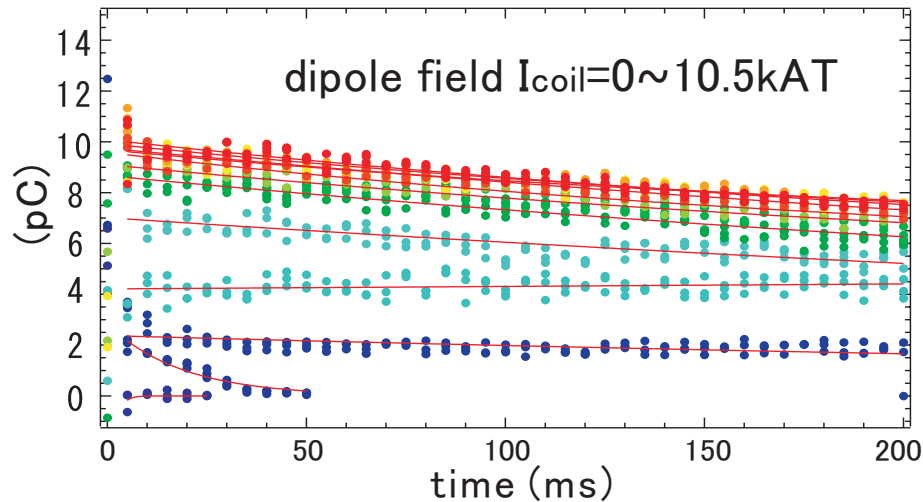
$10^{-6} \sim 10^{-4}$  Torrの範囲で  $\propto 1/P$

古典拡散による閉じ込めの上限

$\sim 10^{-4}$  Torr以下で $\tau$ の増加が鈍化

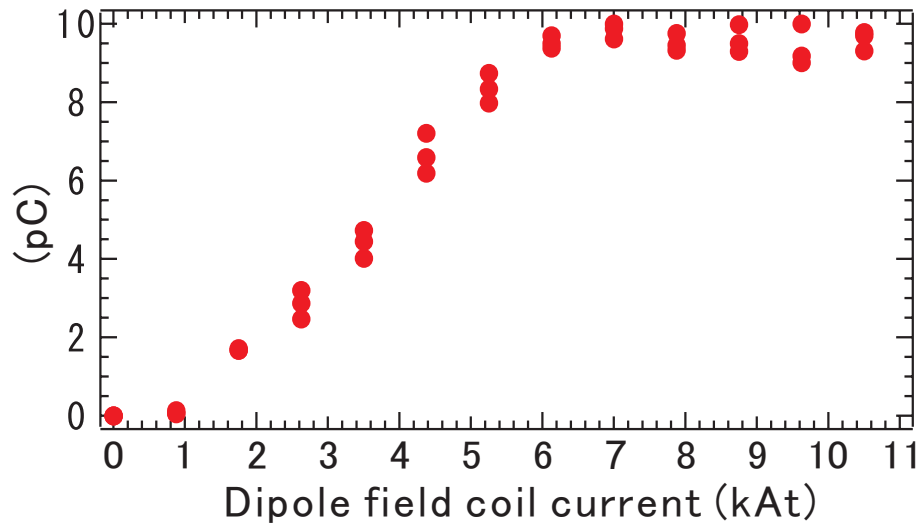
(真空度改善, 磁場増強)

# 閉じ込め電荷の評価



wall上電荷の減衰(磁場強度依存)

dipole磁場, 電極 $V_{ic}=-300\text{V}$ , base pressure



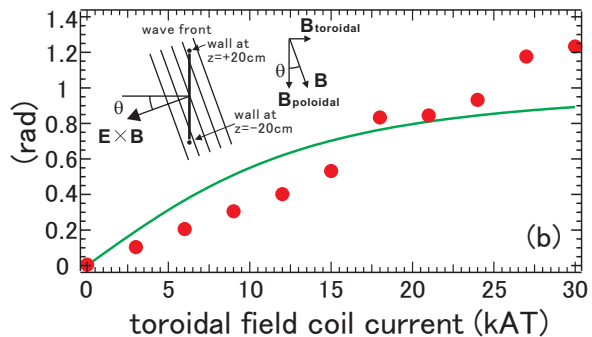
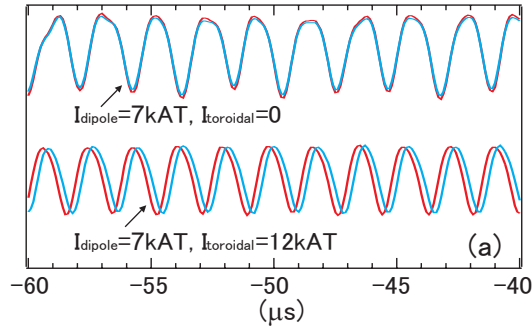
電荷 at t=5ms

- 安定な揺動時の電荷減衰  
電子入射 300V加速  
電極バイアス電位  $V_{IC}=-300\text{V}$
- 良好な閉じ込め特性を示す  
電荷には磁場強度に応じた上限  
(閉じ込め時間と同様な傾向)

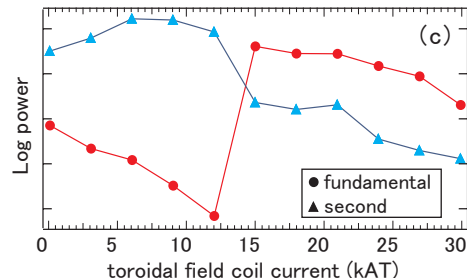
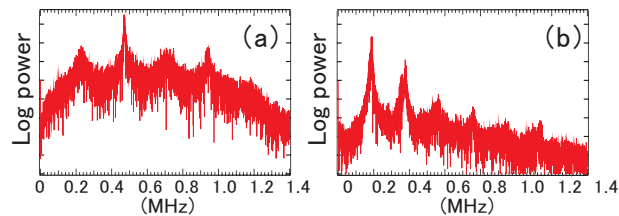
電荷はコイル電流6kAT程度で飽和

電子プラズマの電荷 $Q\sim 5\times 10^{-9}\text{C}$   
( $3\times 10^{10}$ 個)に対応

# Diocotron揺動の周波数, 伝播特性



トロイダル磁場追加時の静電揺動 (Z=±20cm wall) の位相差



トロイダル磁場追加時(b)のpower spectrum

- 周波数 (電子入射中)  $\propto 1/B$
- 揺動波形の位相  $E_{\text{external}}$  に線形な依存  
(wallは同一ポロイダル断面  $Z=\pm 20\text{cm}$ )

純dipole磁場:

ポロイダル断面内で同相

dipole+toroidal磁場:

下流側wallの位相遅れ

磁力線のピッチ角に応じた  
cross field方向に伝播する波

- 周波数からの粒子数の見積:

電荷減衰時, 基本波の周波数は62kHz→57kHz  
(10%弱の減少)

外部電場と自己電場による寄与

⇒電荷は引加電圧 ( $V_{\text{ic}}=-300\text{V}$ ) の10%程度  
～安定化までの初期のWall上の電荷減衰

- トロイダル磁場の追加  
静電揺動の減衰, higher modeが支配的



## まとめ

- ・ トロイダル磁気面配位における電子プラズマの閉じ込め  
古典拡散(中性粒子との衝突)が上限となる閉じ込め.

(背景圧力:  $P=4 \times 10^{-7}$  Torr, 初期の電子密度:  $n_e \sim 10^{13} \text{m}^{-3}$ )  
 $Q \sim 5 \times 10^{-9} \text{C}$  ( $3 \times 10^{10}$ ),  $\tau \sim 0.5 \text{sec}$  ( $B \sim 100 \text{G}$  の dipole 磁場)

背景中性ガス圧力依存:

$10^{-6} \sim 10^{-4}$  Torr で  $\propto 1/P$ ,  $10^{-6}$  Torr 以下で飽和傾向.

磁場強度依存:

減衰時間, 電荷共に磁場強度の上昇により飽和.

⇒ 低圧領域での異常輸送の存在

- ・ Wall probe の鏡像電荷からの閉じ込め粒子数推定値  
~ diocotron 周波数からの見積