

第11回若手科学者によるプラズマ研究会 2008年3月17日

# RT-1における純電子プラズマ実験

東大新領域, 高温プラズマ研究センター

齋藤晴彦, 吉田善章, 小川雄一, 森川惇二, 渡邊将, 矢野善久, 鈴木順子, 林裕之

- 目次
1. 研究背景: トロイダル非中性プラズマ
  2. 磁気圏型プラズマ実験装置RT-1
  3. 純電子プラズマの長時間閉じ込め  
磁気面の可視化, 閉じ込め時間の評価
  4. まとめと今後の課題



東京大学  
THE UNIVERSITY OF TOKYO

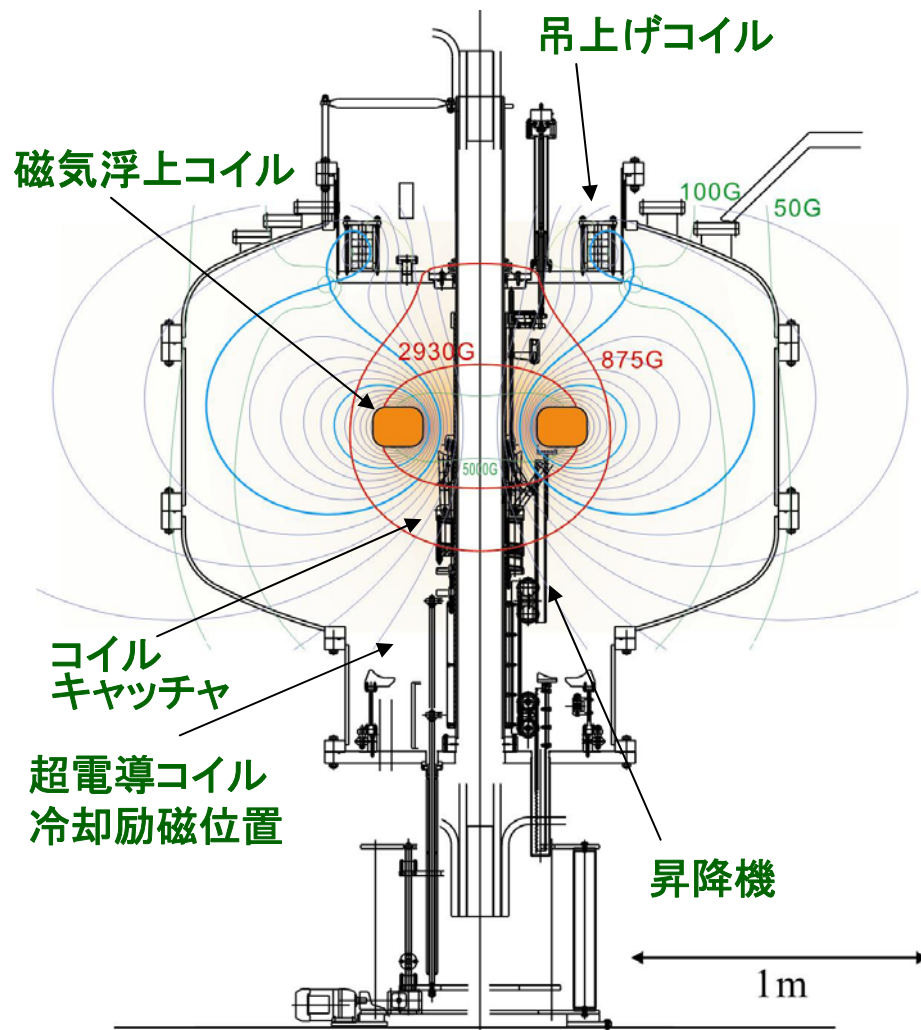
# 研究背景：トロイダル系における非中性プラズマ

- トロイダル系で非中性プラズマの安定閉じ込め配位を実現する事により、高エネルギーの反粒子や電子陽電子プラズマの実験研究が可能になる。
- 一般的な直線型配位 (Penning-Malmberg trap, Multi-Ring trap) と比較して、トロイダル系の非中性プラズマには未解明の点が多い。特に従来使用された純トロイダル磁場配位では、良好な閉じ込めが得られていない。
- 近年、磁気面配位を使用したトロイダル非中性プラズマ研究が開始され、純電子プラズマの閉じ込め時間が向上し、本格的な実験が開始されつつある。  
\* M. R. Stoneking et al., PRL **92**, 095003 (2004), J. P. Kremer et al., PRL **97**, 095003 (2006).
- 先行研究が行われたProto-RT装置 (常伝導コイル) では、惑星磁気圏状のdipole磁場中で、電子プラズマの1s程度の安定閉じ込めを実現した。
- 上述の研究課題を実現するためには、擾乱の影響を排してさらに高性能な非中性プラズマ閉じ込めを実現する必要がある。



Dipole磁場発生用に超伝導磁気浮上コイルを備えたRT-1において純電子プラズマ実験を行い、主に静電揺動計測により閉じ込め特性を調べた。

# 磁気圏型閉じ込め装置RT-1 (Ring Trap-1) \*



**Ring Trap 1 (RT1) 装置の断面図**

高温超電導コイル 115A (250kAT) Bi-2223  
吊上げコイル (最大定格90kAT) による制御浮上.

- Dipole磁場を持つ惑星磁気圏型装置.
- 主要な研究課題は,
  - ・流れを持つプラズマの実験研究
    - 超高 $\beta$ を実現するdouble Beltrami平衡\*\*
    - トロイダル非中性プラズマの閉じ込め
      - 反物質への応用(現在は純電子実験).
- 高温超伝導コイルを備え, 制御磁気浮上状態でプラズマ生成実験を行う.
  - ・GM冷凍機により17Kまでコイル冷却.
  - ・定格電流は250kAT(116A $\times$ 2160turn).
  - ・約6時間の繰り返し実験が可能.
- Dipole磁場コイルの機械的保持を排除する事により, プラズマへの擾乱を抑制.
- LaB<sub>6</sub>カソードにより電子入射を行い, 磁気面内に電子プラズマを生成する.

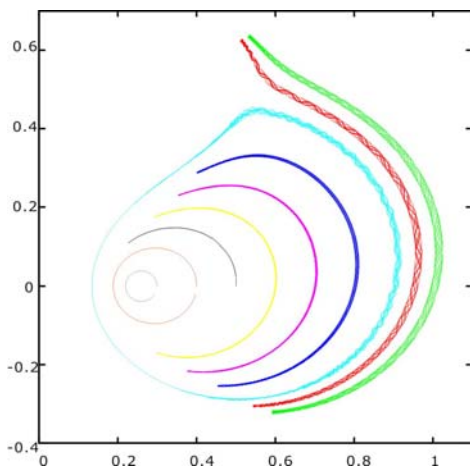
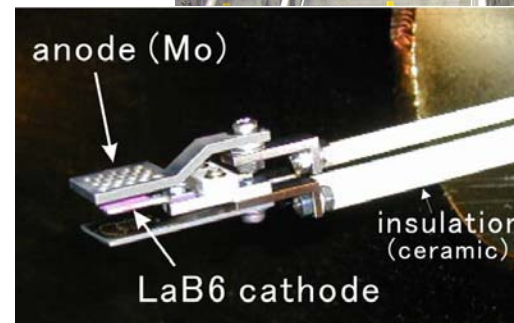
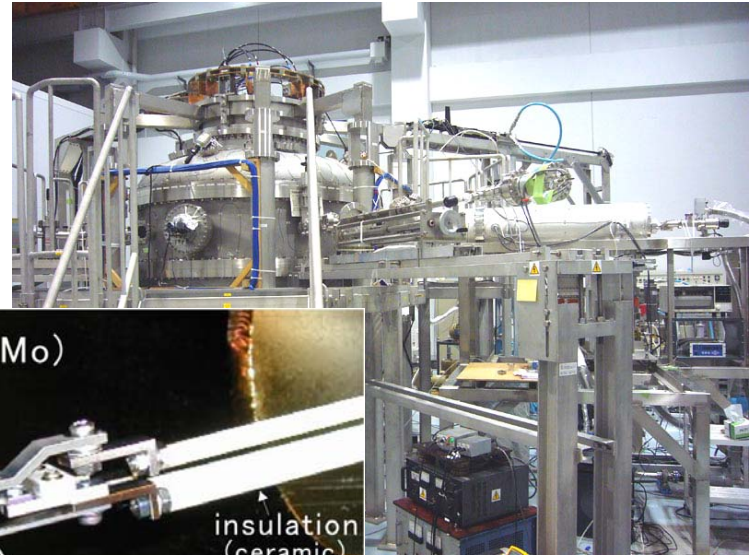
\* Z. Yoshida et al., Plasma Fusion Res. 1, 008 (2006).

\*\* S. M. Mahajan, Z. Yoshida, PRL 81, 4863 (1998).  
Z. Yoshida, S. M. Mahajan, PRL 88, 095001 (2002).

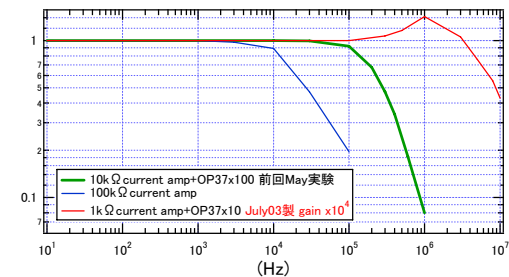
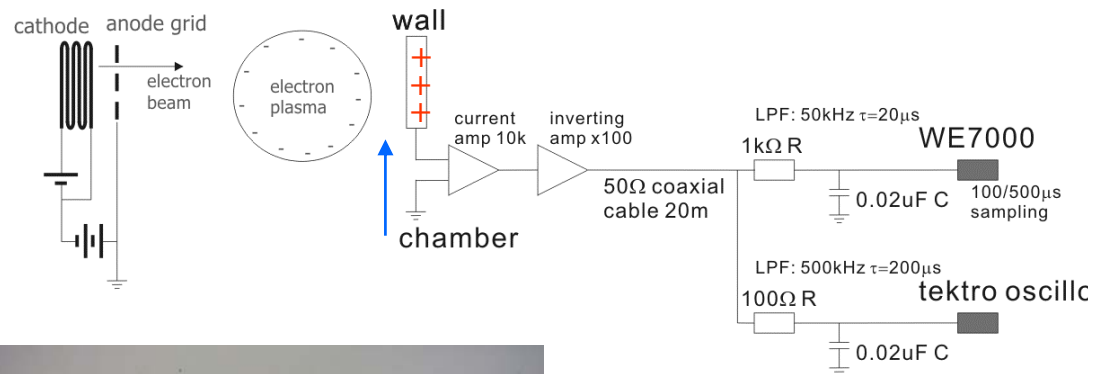
# 電子プラズマの生成と電子軌道, 静電揺動による計測法



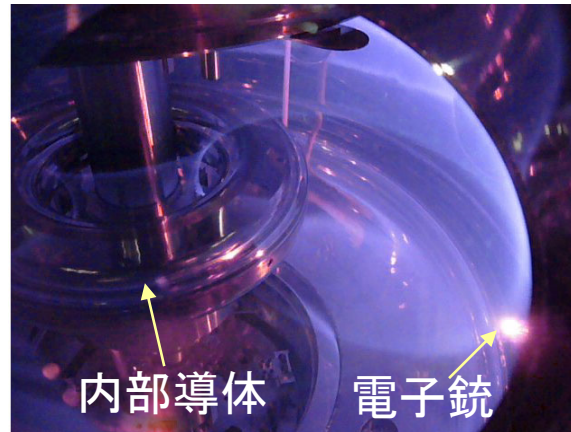
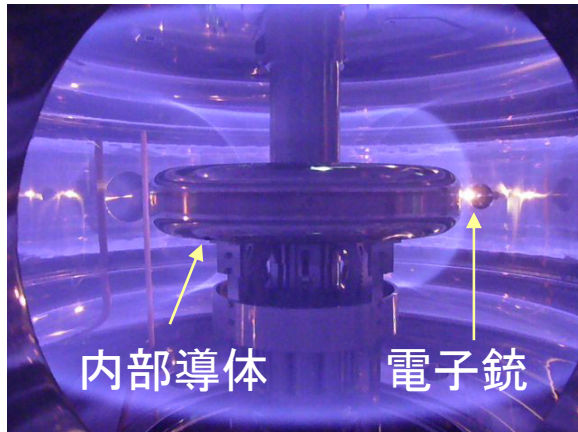
RT-1装置の外観写真.



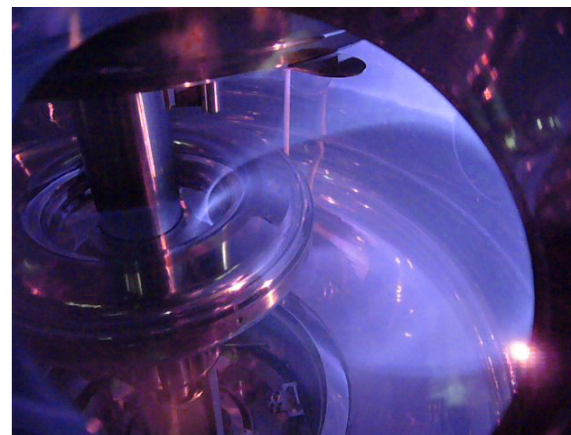
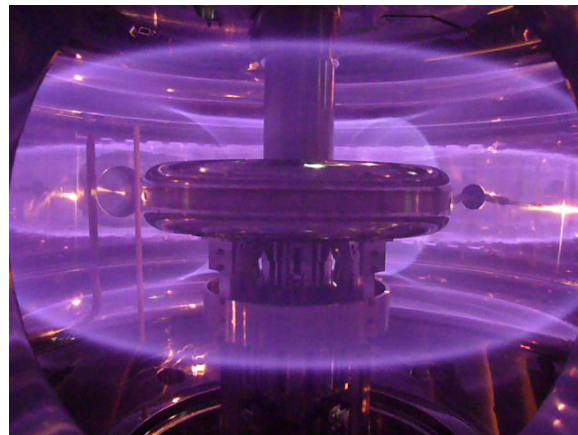
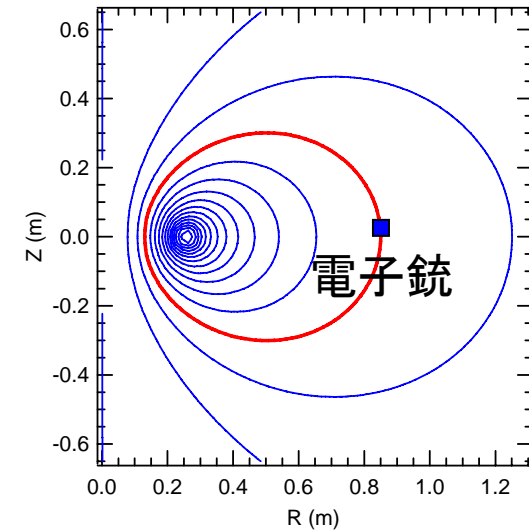
入射電子の軌道計算(r-z断面).



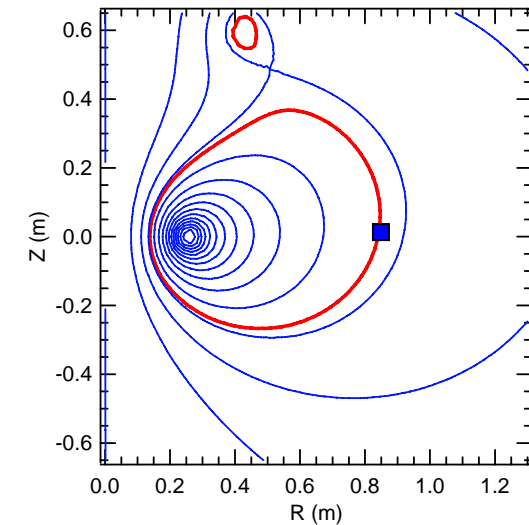
# 電子入射による磁気面の可視化



コイル支持状態(内部導体による純dipole磁場配位)



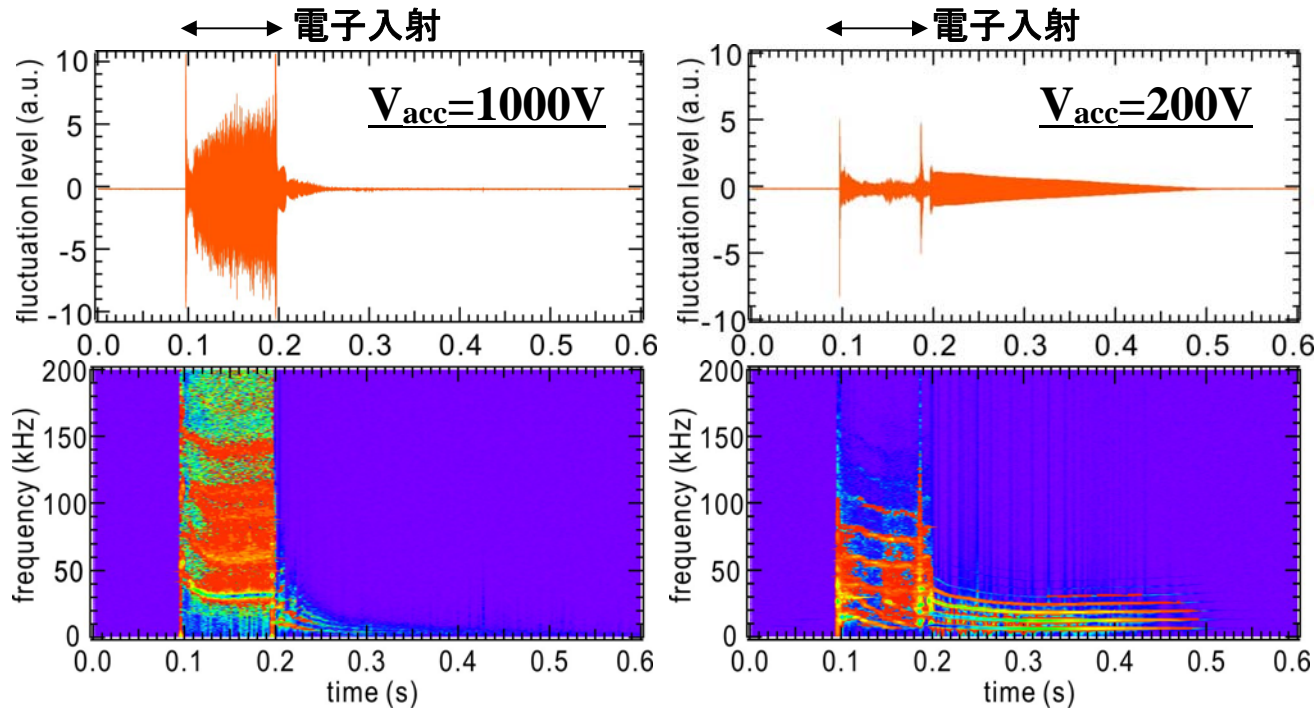
コイル磁気浮上状態(内部導体+浮上コイル磁場)



$1 \times 10^{-2}$  Paの水素ガス中にカソードより電子ビーム(加速電位500V)を入射。  
⇒衝突電離による発光により磁気面を可視化: 磁気面の計算値と良い一致を示す。

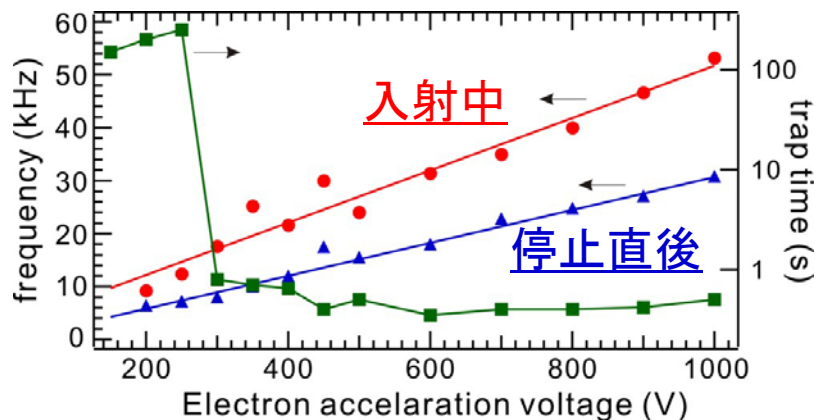
$\nabla B$ /curvature driftにより電子はトロイダル方向に輸送される。

# 静電揺動の安定化と長時間閉じ込めの条件



電子入射前後の揺動波形とFFTによるパワースペクトル.

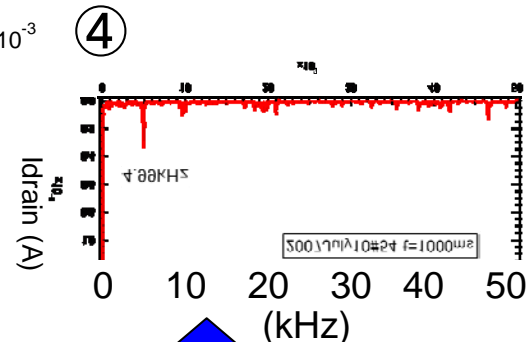
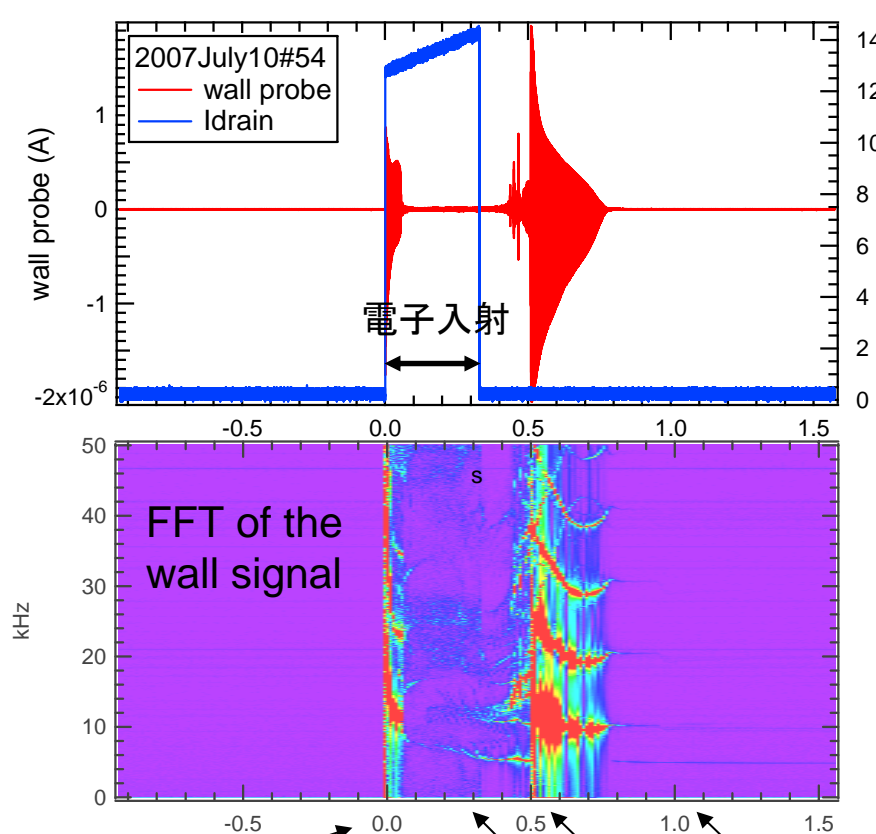
- $V_{acc}=1000V$ :
  - 電子入射中の揺動は安定化しない.
  - 電子供給の停止後、周波数と振幅の減少が同時に観測され、閉じ込めは終了.
- $V_{acc}=200V$ :
  - 入射中の周波数を基本波に持つ揺動が持続する.
  - 揺動は安定化.



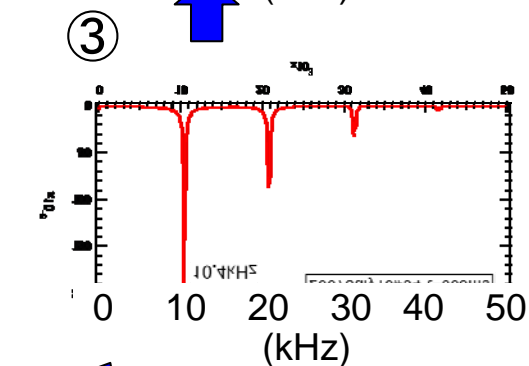
電子入射前後の揺動周波数と閉じ込め時間.

- 電子入射エネルギーを抑制し、初期の形成電位を制限する事により、電子供給停止時の周波数遷移が観測されない.
- 長時間 (~分) に渡りほぼ一定の周波数 (基本波成分) を保つ揺動を持続して観測.
- 磁場強度に対して電荷の上限を示唆.

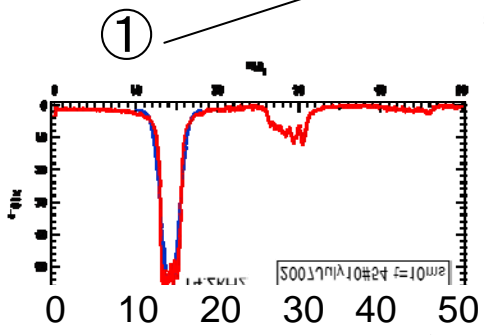
# 電子入射前後の静電揺動波形



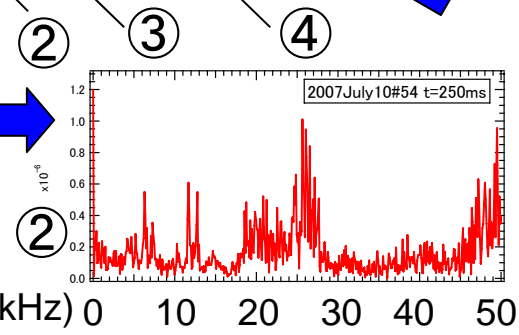
④ t=1s (安定閉じ込め期)  
大振幅のpeakが減衰。  
周波数は5kHz程度で  
非常にゆっくりと下がる。



③ t=500ms (不安定性出現)  
~6kHzは消え, 周波数が  
時間的に減少, 同時に  
power低下. 帯域は狭い。



① t=10ms (入射開始直後)  
14.2kHzにbroadなpeak.  
時間的に減少, 減衰。

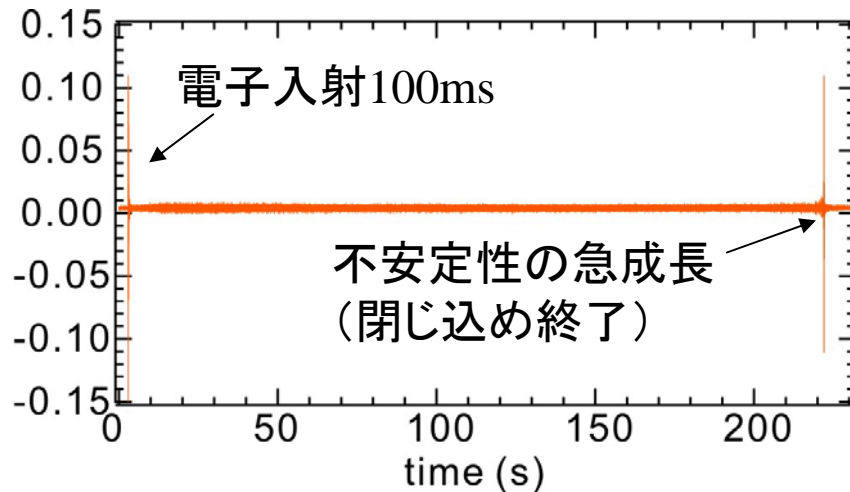


② t=250ms (入射停止直前) (kHz)  
~25,50kHzにbroad peak.  
基本波は~6kHz?

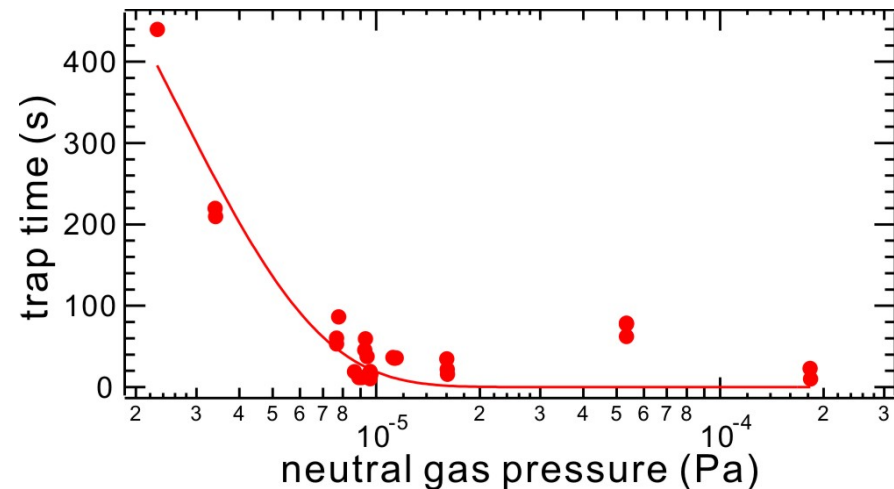
トロイダル方向にExB速度で伝搬するn=1 modeの静電波を仮定, 周波数は  $f = E_r / (2\pi RB) \sim 10\text{kHz}$

実際に観測される周波数と近い値を取り, 観測した振動モードはトロイダル系のdiocotron揺動と考えられる。

# 長時間閉じ込めの観測と背景ガス圧力依存性



長時間閉じ込めの典型揺動波形.



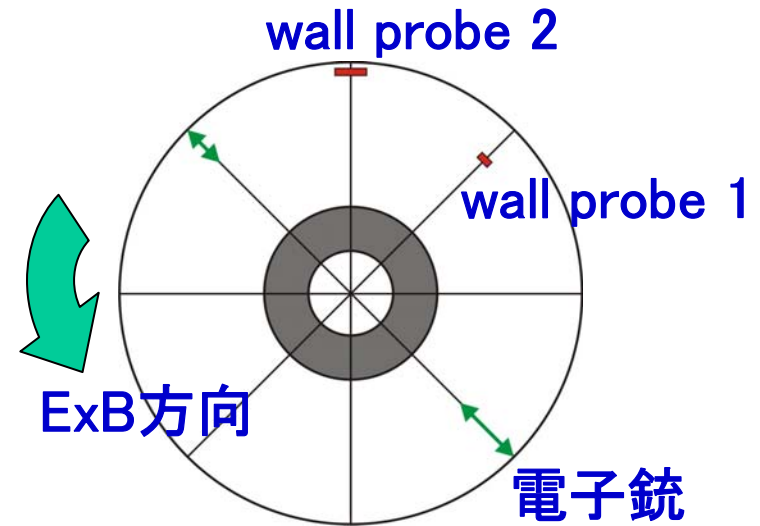
「閉じ込め時間」と背景水素ガス圧力.

- 電子プラズマの閉じ込めは、揺動の急成長(径方向の急激な輸送)により終焉する.
- 安定閉じ込め中、揺動の振幅は微小な増減を繰り返すが、おおむね安定に持続する.
- 閉じ込め時間の依存性は、古典拡散( $\tau \propto B^2 P^{-1}$ )とは異なり背景圧力に対して非線形であり、イオンの蓄積に伴う不安定性の成長を示唆している.
- 観測された閉じ込め時間は最大で400s程度.
- 生成したトロイダル電子プラズマのパラメータ:
  - 電子入射中の空間電位は加速電圧 $V_{acc}$ とほぼ等しい. -200Vから-1000V.
  - 長時間閉じ込めが観測される条件での径方向電場強度  $E_r \sim 500V/m$ .
  - 閉じ込め電子数(電子密度も同程度)は  $N \sim 4\pi^2 \epsilon_0 a R E_r / e = 2 \times 10^{11}$ .

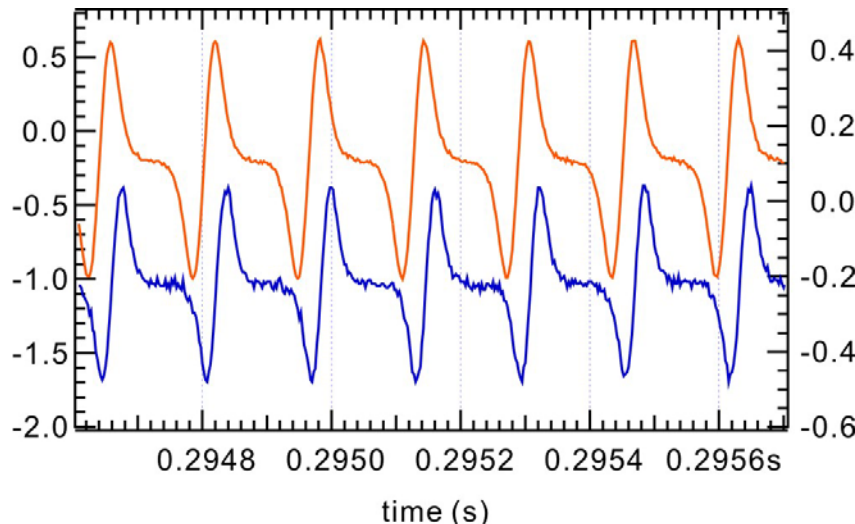


# プラズマ中の波動の伝播方向の特定

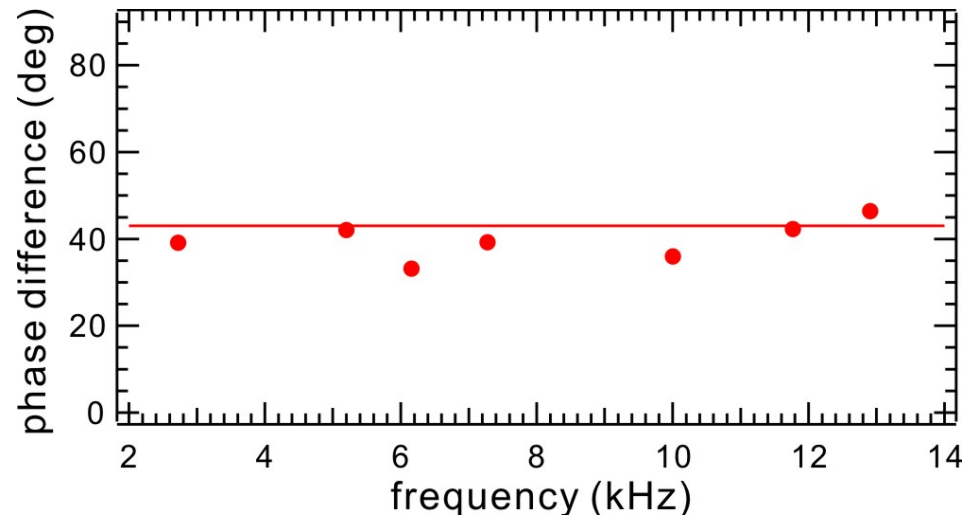
- 複数のwall probe(トロイダル方向に43度離れて配置)による揺動信号の同時計測.
- トロイダル方向で, wall位置の角度差に等しい位相差を, 揺動の基本周波数によらず検出.
- ポロイダル方向には位相差は観測されない.
- トロイダル方向に $E \times B$ 速度で伝播するモード数1の波動を仮定すると, 電場強度  $E_r \sim 2\pi R B f_{E \times B}$  の計算値は, 前述の空間電位からの評価と一致.
- 直線型のdiocotron modeに類似したトロイダル非中性プラズマのモードと推定される.



RT1 top view (walの位置関係).



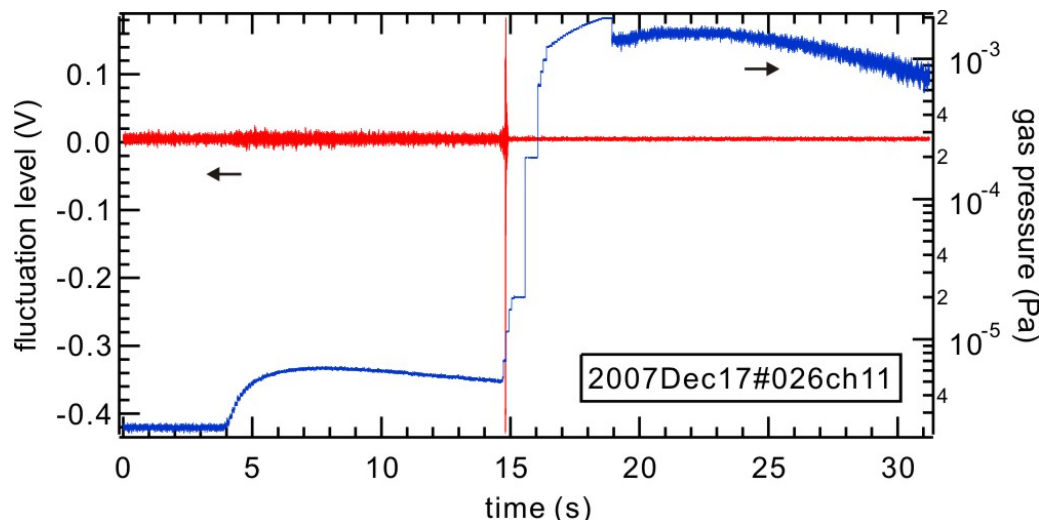
43度離れたwall probeによる揺動計測.



Wall間の位相差の周波数依存.

# 閉じ込め電荷の時間発展の測定計画(今後の課題)

- 今後は周波数に加えて、閉じ込め電荷等の時間発展の計測を行い、プラズマのより定量的な閉じ込め時間の評価を行う事が課題である。
- 直線型配位と異なり、トロイダル系では軸方向への粒子輸送⇒dumpによる電子プラズマの“破壊検査”は実現困難。
- 揺動信号(鏡像電荷)の時間積分による電荷の時間発展計測を試みているが、数分に渡る長時間積分は、計測系のノイズ(off set電流とバイアス電圧, bit noise)の影響で成功していない。
- ガス導入⇒真空度悪化による不安定性成長の誘起によるロス電荷測定方法を計画中。



水素ガスの導入による閉じ込め停止.

- 計測方法:
  1. 電子入射⇒閉じ込め.
  2. 閉じ込め中に水素等の中性ガスを導入し、平衡を破壊.
  3. Wall probeからdecayする鏡像電荷を測定し、総電荷を計測.

- Wall probe信号－総電荷の校正.  
空間電位分布計測⇒密度分布

## まとめ

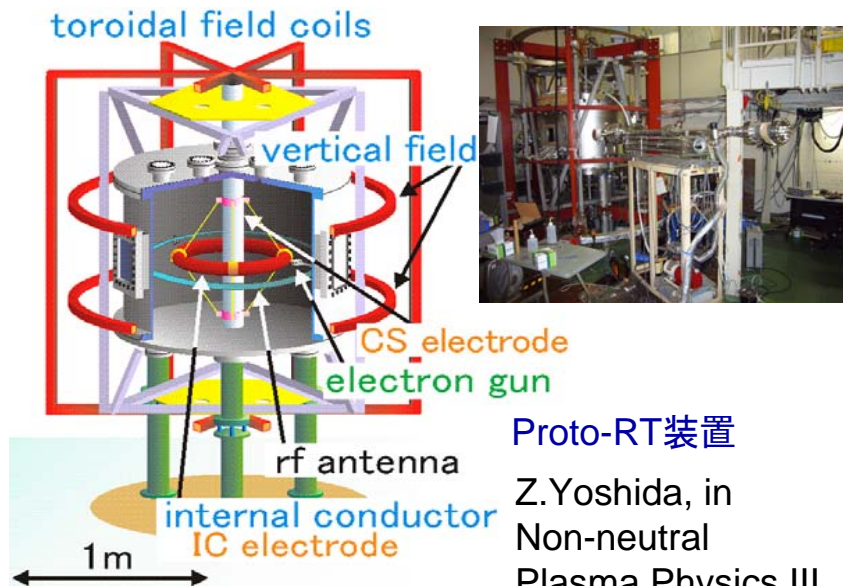
---

- 超電導磁気浮上コイルを備えたRT-1装置の磁気圏型dipole配位において、トロイダル純電子プラズマの長時間閉じ込め(～分)を実現した。
- 軌道計算によれば、入射した電子はほぼ磁気面上に分布しており、衝突や電場の影響により閉じ込め領域内部へと拡散した密度分布を形成しているものと考えられる。  
こうした傾向は、中性ガス中への電子入射により可視化された電子分布と一致している。
- 電子加速電圧を最適化する事により、揺動周波数の入射停止直後の遷移が抑制され、その際に安定な閉じ込めが観測される。
- 閉じ込めは不安定性の急成長(イオンの効果が疑われる)により終了。
- 観測した波動はトロイダル方向(径方向 $E \times$  純dipole磁場 $B$ )に $E \times B$ 速度で伝搬しており、直線型のdiocotron modeと類似した静電揺動モードである。
- 閉じ込め時間の定量的な評価が今後の課題。

予備スライド

# トロイダル系の非中性プラズマ

- 任意の非中性度, 高エネルギー粒子の閉じ込めが可能 ( $^{22}\text{Na}$ 線源: 陽電子 $\sim 0.54\text{MeV}$ ).
- 電子陽電子プラズマ: pair plasmaに関する実験室研究 や  
反水素プラズマ: 3体再結合による反水素の合成 $\Rightarrow$ 磁気中性線上への閉じ込め.
- こうした多様な研究を実現するためには. . .  
トロイダル系で非中性プラズマの安定な閉じ込め, 測定法を確立する事が必要.
- これまでのトロイダル非中性プラズマ研究  
1940頃 $\sim$  ベータatronやレーダー用の高周波源真空管中の電子群の不安定性.  
1960頃 $\sim$  HIPAC: 負電位井戸によるイオン蓄積装置としての応用可能性.  
1990頃 $\sim$  Avinash, Karら: Low aspect torus (これら全て純トロイダル磁場)  
1997 $\sim$  Ring Trap (Proto-RT, Mini-RT, RT-1. . . ) トロイダル対称・磁気面配位  
2000頃 $\sim$  Columbia, CHS@NIFS (非対称), Lawrence...



Proto-RT装置

Z.Yoshida, in  
Non-neutral  
Plasma Physics III

Columbia Non-neutral Torus

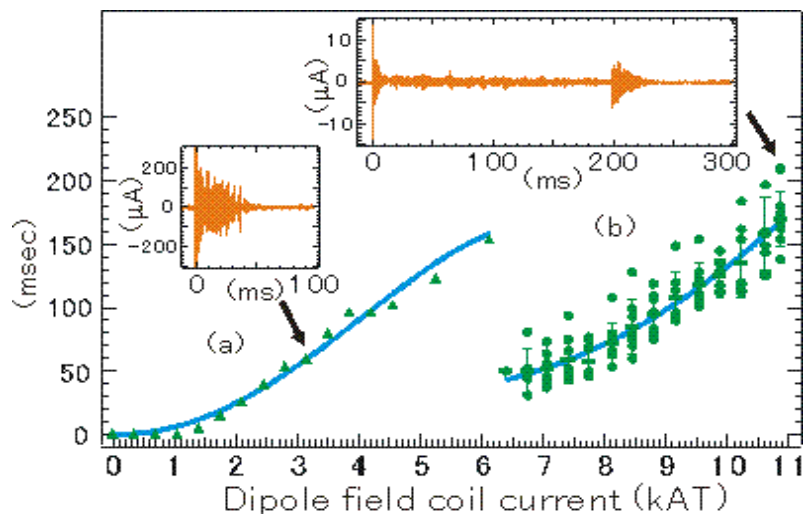


\*Pedersen & Boozer, PRL 88,  
205002 (2002).

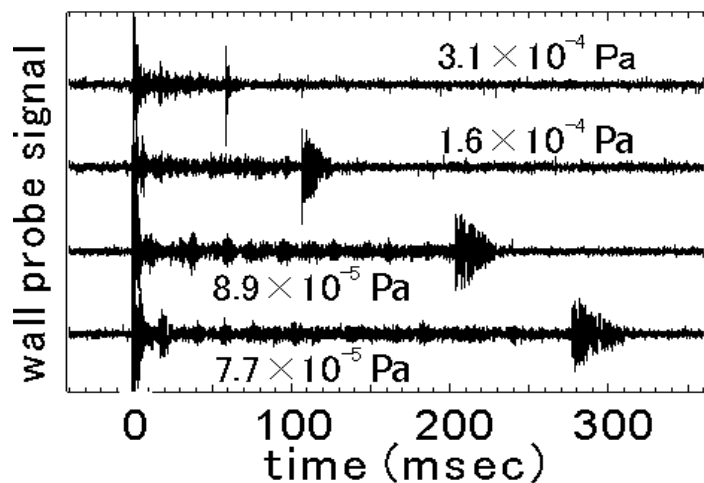


# (参考) Previous PEP Experiments in Proto-RT@Hongo

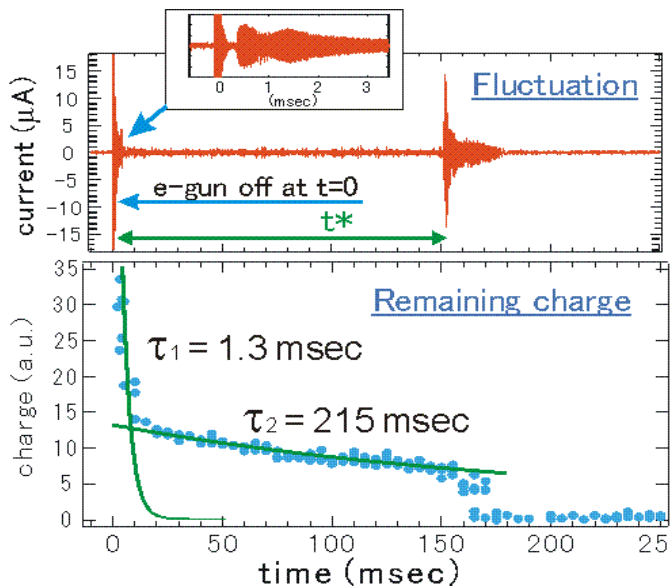
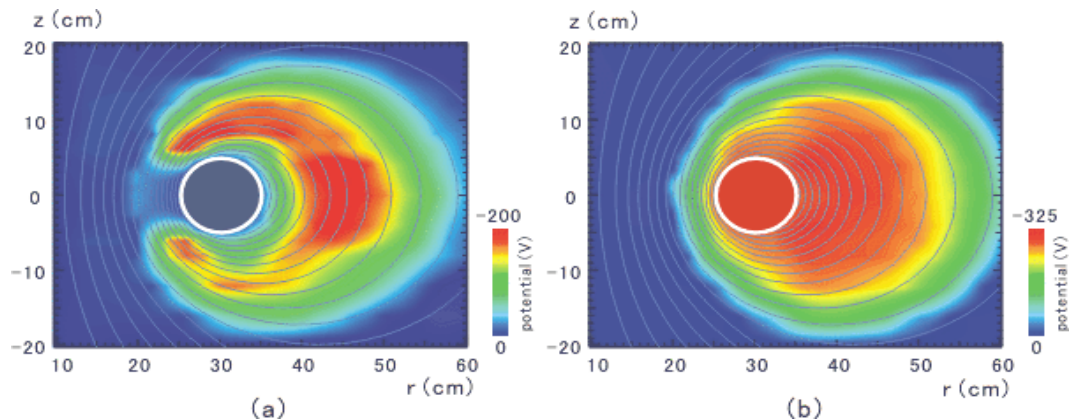
## P-RT data 2002-2004



$t^*$  vs B strength and typical waveforms



Trapped charge in different H<sub>2</sub> pressure

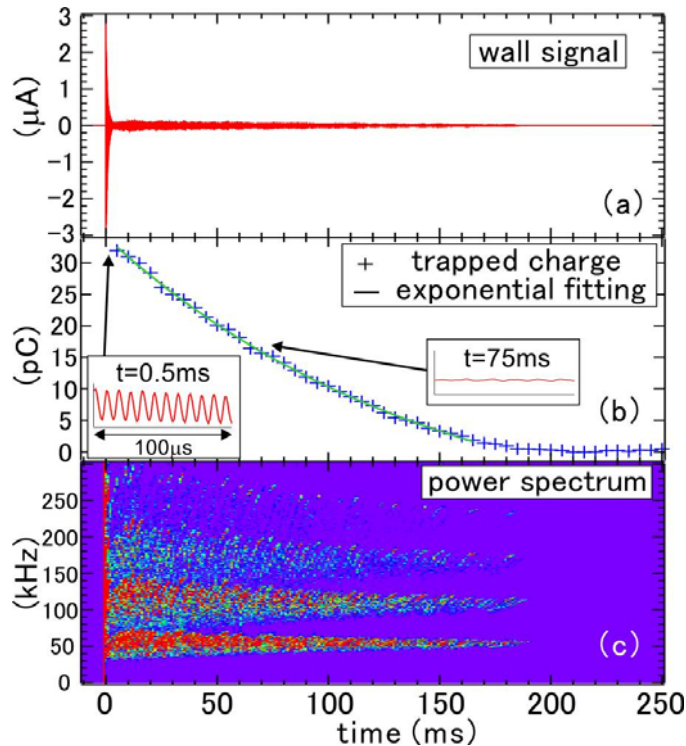


等電位面と磁気面の接近 (b)  
⇒ 揺動の安定化, 閉じ込めの改善

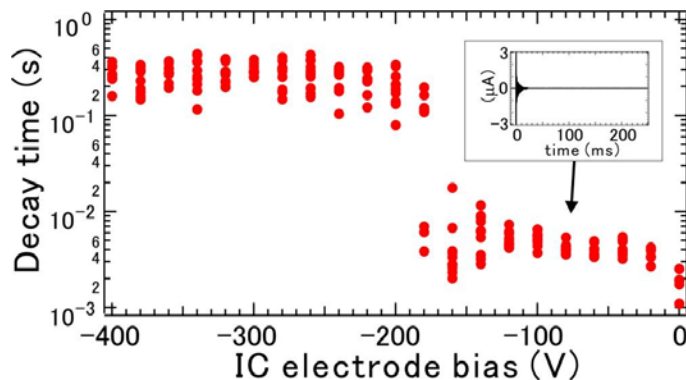
電子の中性粒子との衝突による古典拡散時間に匹敵する閉じ込め時間

トロイダル磁気面配位で純電子プラズマの長時間閉じ込めを観測  
10<sup>11</sup>個の電子を1秒弱程度閉じ込め

# (参考) Proto-RTにおける揺動と電荷見積



Fluctuation signal of toroidal electron plasma



Confinement time in the variation of  $V_{ic}$

## Experimental procedure:

Electron injection ( $V_{acc}=300\text{V}$ ,  $t=-100\mu\text{s}\sim 0\text{s}$ ) into DC magnetic field by  $I_{ic}=7\text{kAT}$  and radial electric field by  $V_{ic}=-300\text{V}$ .

## Confinement properties:

Stop of e-gun at  $t=0$  (electron plasma of  $\sim 10^{-8}\text{C}$ )

$\Rightarrow$  Trapped charge at  $t=1\text{ms}$ :  $\sim 5 \times 10^{-9}\text{C}$

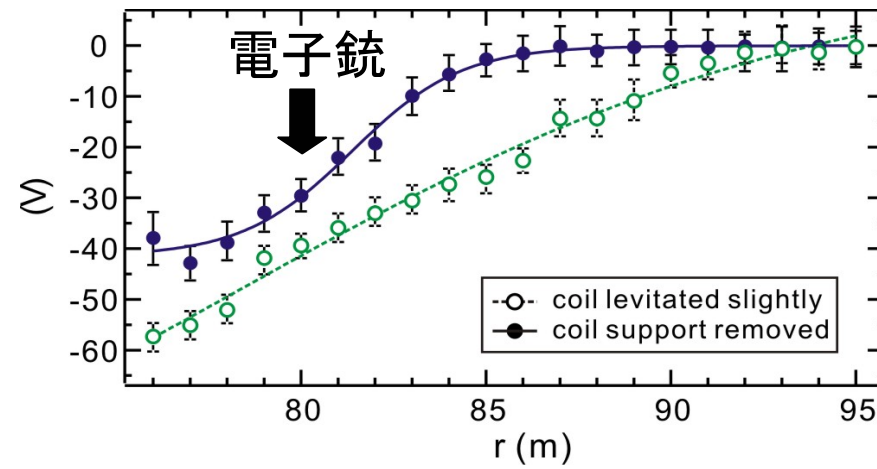
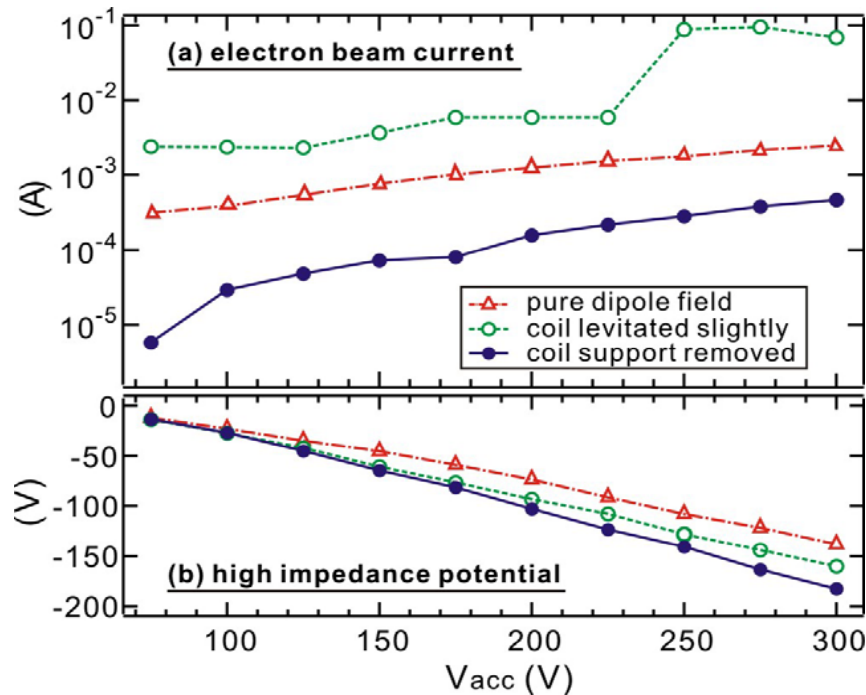
Without potential control ( $V_{ic}=0\text{V}$ ):  
Plasma is not stabilized, fast decay in  $\sim\text{ms}$ .

With potential control ( $V_{ic}<\sim -200\text{V}$ ):  
Stable oscillation mode is realized,  
fluctuation amplitude at  $t=0.5\text{ms}$ :  $\sim 10\%$   
at  $t=75\text{ms}$ :  $< 1\%$

(normalized by the fluctuation amplitude at  $t=-50\mu\text{s}$ )

Magnetic surfaces of dipole field  
 $\sim$  Equi-potential contours of the plasma  
 Elimination of Hollow potential structures

# 空間電位の形成と径方向分布(電子入射中)



## 電子ビーム電流

コイル磁気浮上時, 電子ビーム電流は  
はコイル支持状態の1/100に.

電子入射中, 入射エネルギーの  
60%程度の大きさの空間電位が  
定常的に形成される.

トーラス状の電子プラズマ形状を近似  
(大半径 $R=0.7\text{m}$ , 小半径 $a=0.25\text{m}$ )

$$Q = 4\pi^2 \varepsilon_0 a R E_r = 2 \times 10^{-8} \text{ C}$$

$$n_e \sim 10^{12} \text{ m}^{-3}$$

## 電位分布

セパトリクス ( $R=92\text{cm}$ ) 内部の閉じ  
込め領域 ( $R=80\text{cm}$ ) から電子入射:

コイル完全浮上時に限り, 電子銃  
カソード付近で大きな電位勾配を観測.



# 電子プラズマによる空間電位の形成と電荷の見積

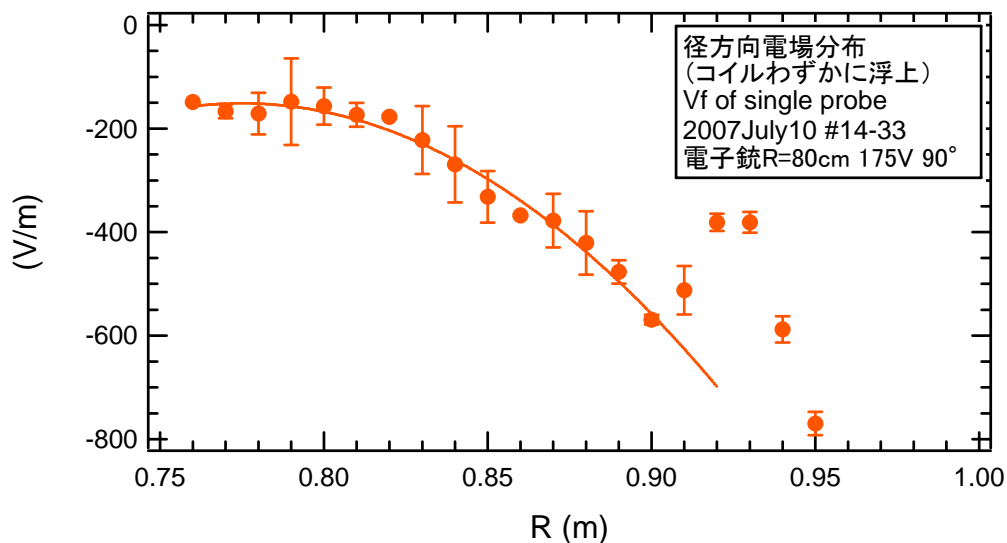
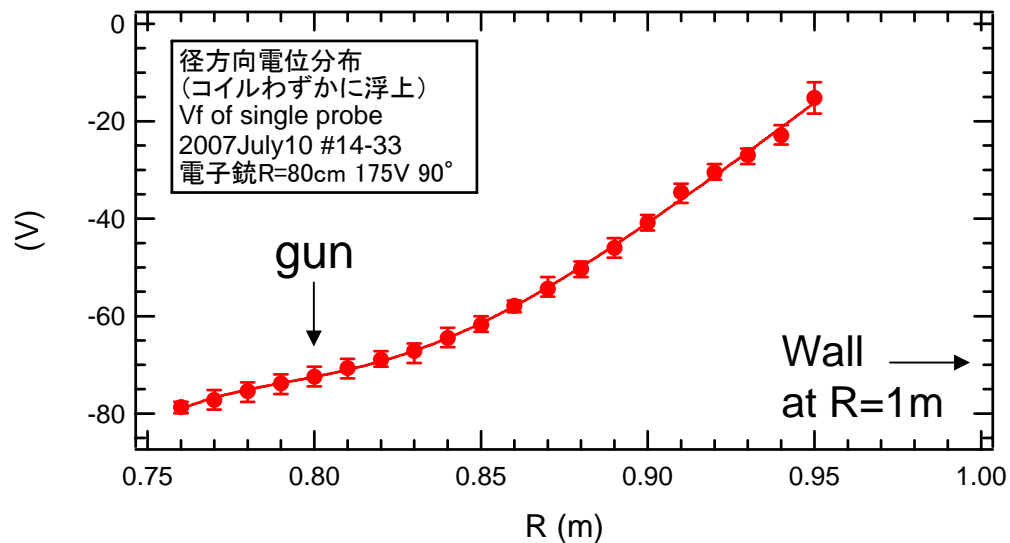
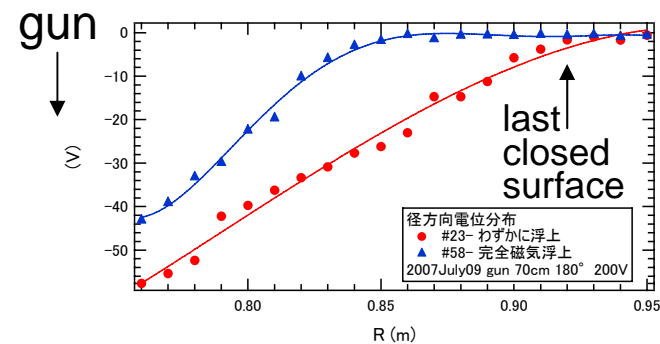


Image chargeの測定に使用したwall.  
セラミック管によりプラズマから絶縁された  
金属箔により、電場揺動を計測する。



壁に向かってゼロに近づく分布。

磁気浮上時には、閉じた磁気面の  
内部のみで電場が観測される。

電場強度はいずれの場合もedge部  
で500V/m程度の大きさ。

EとBのcross field方向=トロイダル方  
向に伝播するdiocotron揺動の位相  
速度は

$$v_{\phi} = E / B \sim \frac{5 \times 10^2}{1 \times 10^{-2}} \sim 5 \times 10^4 \text{ m/s}$$

装置周長は  $2 \pi R = 5\text{m}$

⇒ 予想される周波数は10kHz程度。