

磁気圏型配位RT-1におけるトロイダル 非中性プラズマの長時間閉じ込め

東大新領域

齋藤晴彦, 吉田善章, 小川雄一, 森川惇二, 渡邊将, 矢野善久, 林裕之, 水島龍徳

- 目次
1. 研究背景と本研究の概要
 2. RT-1の装置概要と電子プラズマ生成, 計測系
 3. 実験結果 長時間閉じ込め
 4. 実験結果 揺動の多点計測
 5. まとめと今後の課題



磁気圏型配位を用いた非中性プラズマ研究¹

- ・直線型配位と異なり, 電位井戸が不要 任意の非中性度のプラズマ閉じ込め.
- ・反物質プラズマ (pair plasma他) への応用が可能.

Proto-RT装置における先行研究^{1,2,3}

- ・トロイダル純電子プラズマによる基礎実験.
- ・高エネルギー電子の磁気面内への入射²や長時間閉じ込め ($\sim 0.1\text{s}$)³に成功.
- ・内部導体 (常伝導コイル) コイル支持構造による機械的擾乱.

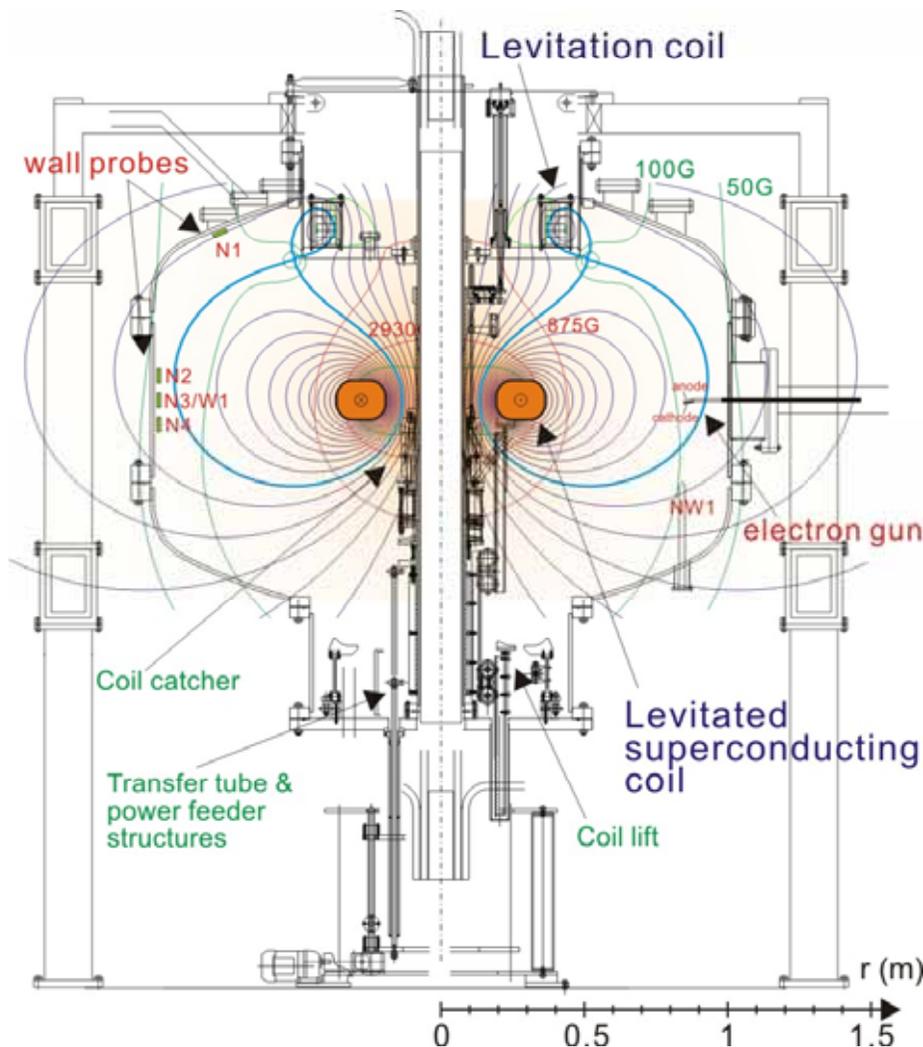
RT-1装置における純電子プラズマ研究⁴

- ・磁気浮上させた超伝導コイルによりdipole磁場を発生する配位.
- ・閉じ込め性能のさらなる向上が期待出来る.

本研究では, RT-1の純電子プラズマの性能評価を目的として, 以下を実施した.

- ・多点wall probeによる揺動の同時計測 閉じ込め時間測定と揺動モード特定.
- ・電場計測 プラズマの密度分布の概算.

1. Z. Yoshida, Y. Ogawa, J. Morikawa *et al.*, in *Non-neutral Plasma Physics III* (1999).
2. PRE **65**, 036409 (2002). 3. PRL **92**, 255005 (2004). 4. PFR **2**, 045 (2007).



Ring Trap 1 (RT-1) 装置の断面図

(*ECHプラズマの磁気計測と流速計測に関しては、
28aXE-1水島, 28aXE-2矢野, 30pSP-1吉田)

磁気浮上させたdipole磁場コイルにより生成する惑星磁気圏型配位。

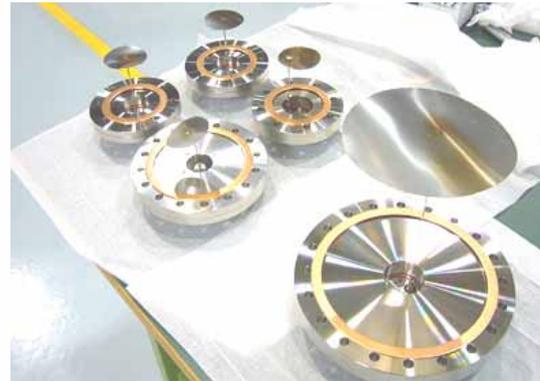
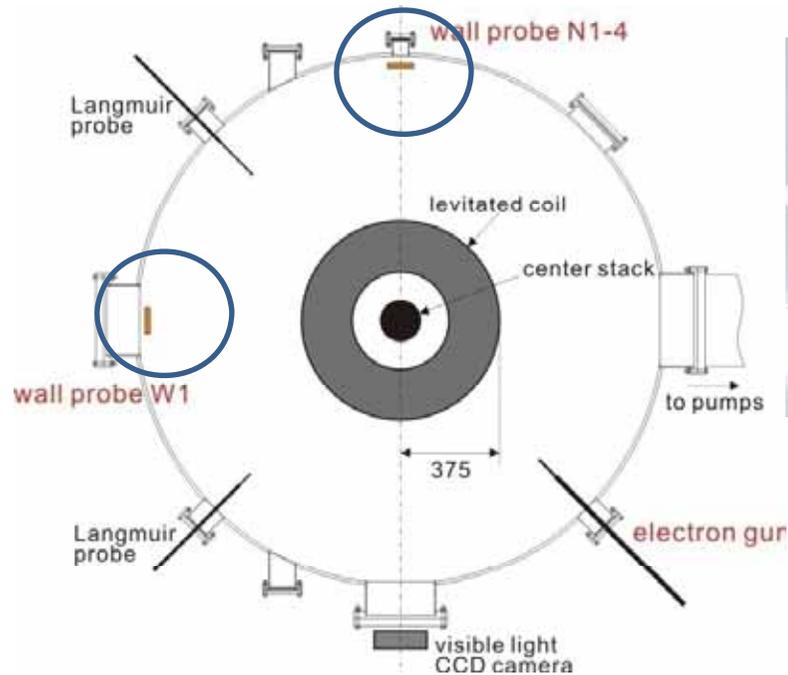
- 主要な研究課題は、
- ・流れを持つプラズマの実験研究*
 - 超高 β を実現するdouble Beltrami平衡
 - ・トロイダル非中性プラズマの閉じ込め
 - 反物質への応用(現在は純電子実験)。

- 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 × 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
プラズマへの擾乱を抑制。

トロイダル非中性プラズマの基礎実験として純電子実験を実施。

LaB₆カソード電子銃, 静電計測。

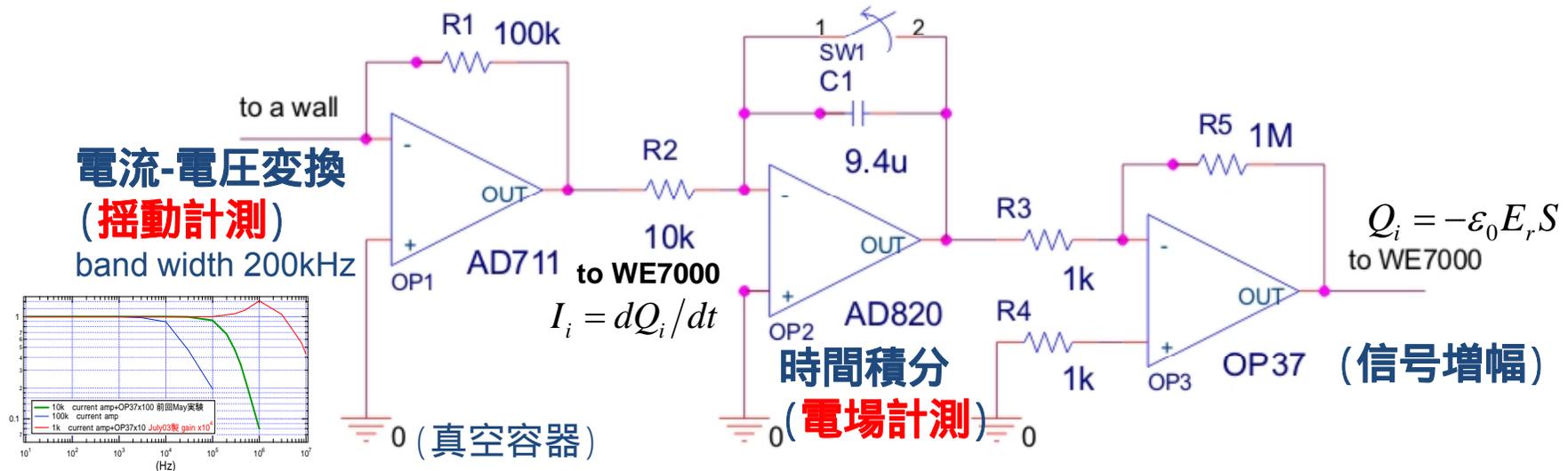


RT-1のtop viewとwall probeの配置(左), wallの構造とRT-1内部の配置図.

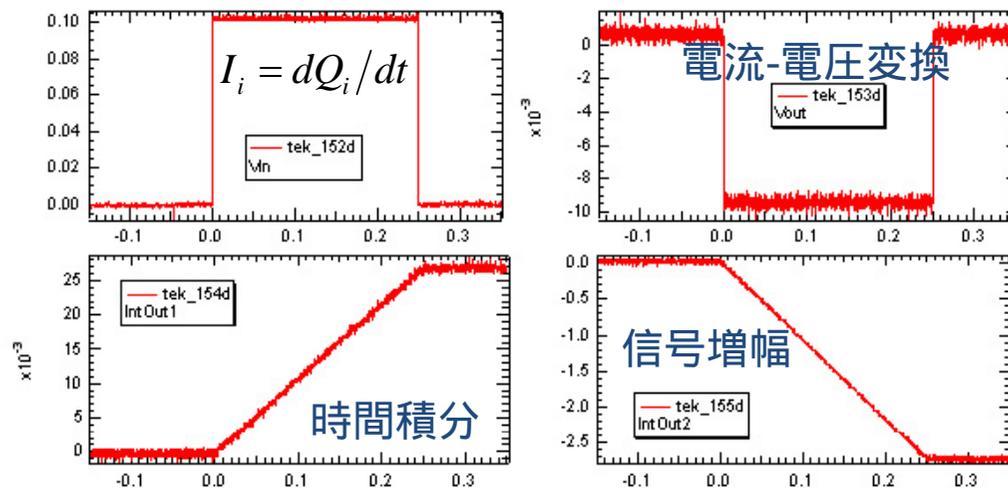
プラズマの静電揺動と電場強度をwall probe(金属箔)により測定.

純電子プラズマの電場によりwall表面に誘導される鏡像電荷密度は $\sigma_i = -\epsilon_0 E_r$.
wallのプラズマに対向する面積 S を用いて鏡像電荷は $Q_i = -\epsilon_0 E_r S$.

擾乱を抑制するために, wallは電流アンプを介して真空容器に接地し,
鏡像電流(→揺動) $I_i = dQ_i/dt$ と電荷(電場) $E_r = -\int I_i dt / \epsilon_0 S$ を同時計測.



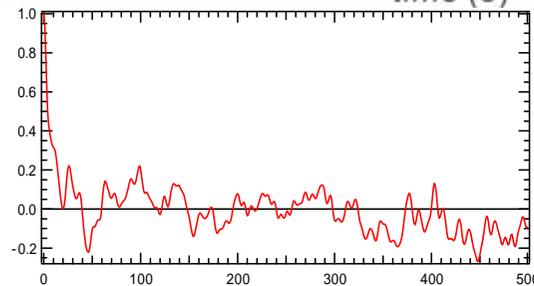
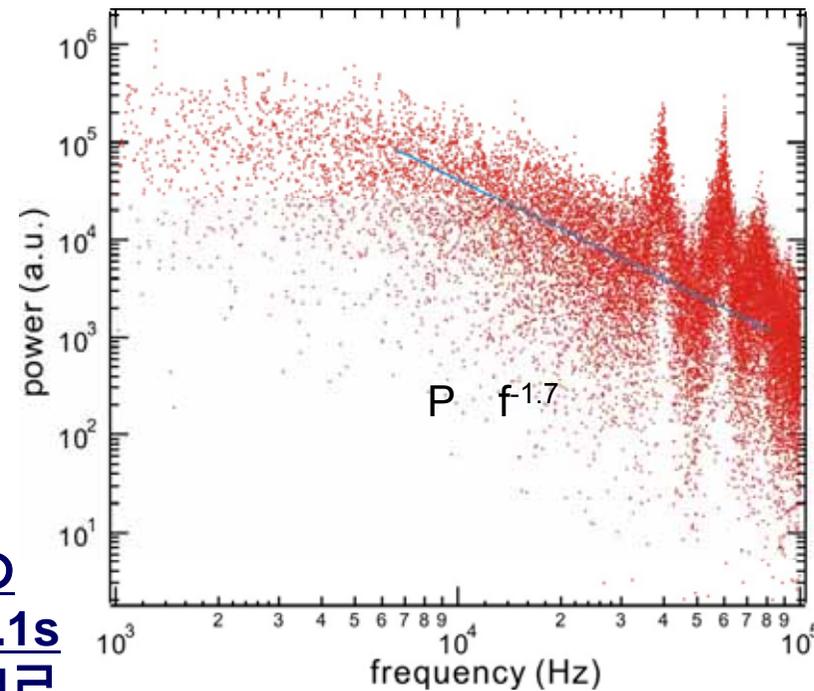
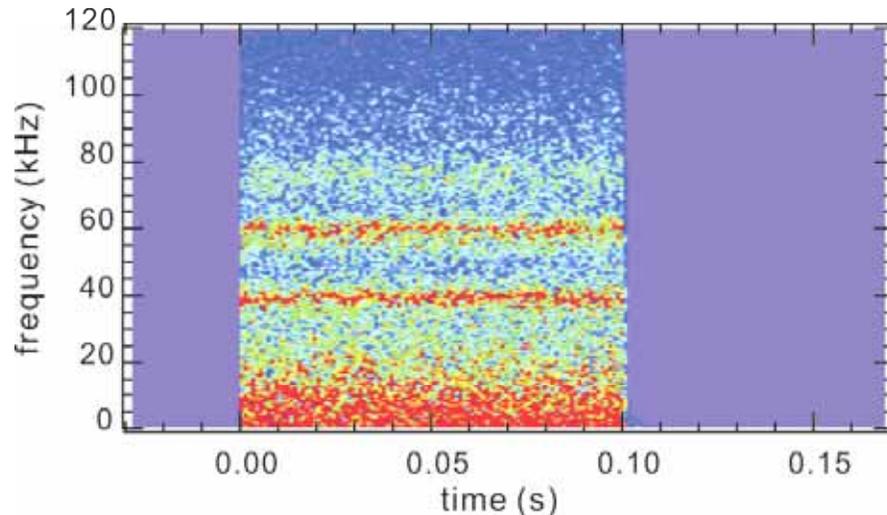
Wall probe計測回路：揺動信号(鏡像電流)と電場強度(積分信号)の同時計測



測定感度 $I_i \sim 10\text{nA}$,
 $E \sim 10\text{V/m}$ (s/n=1) .

積分回路のドリフトによる
動作時間の上限 ($\sim 10\text{s}$) .

電流入力時の回路の各出力信号(動作試験)

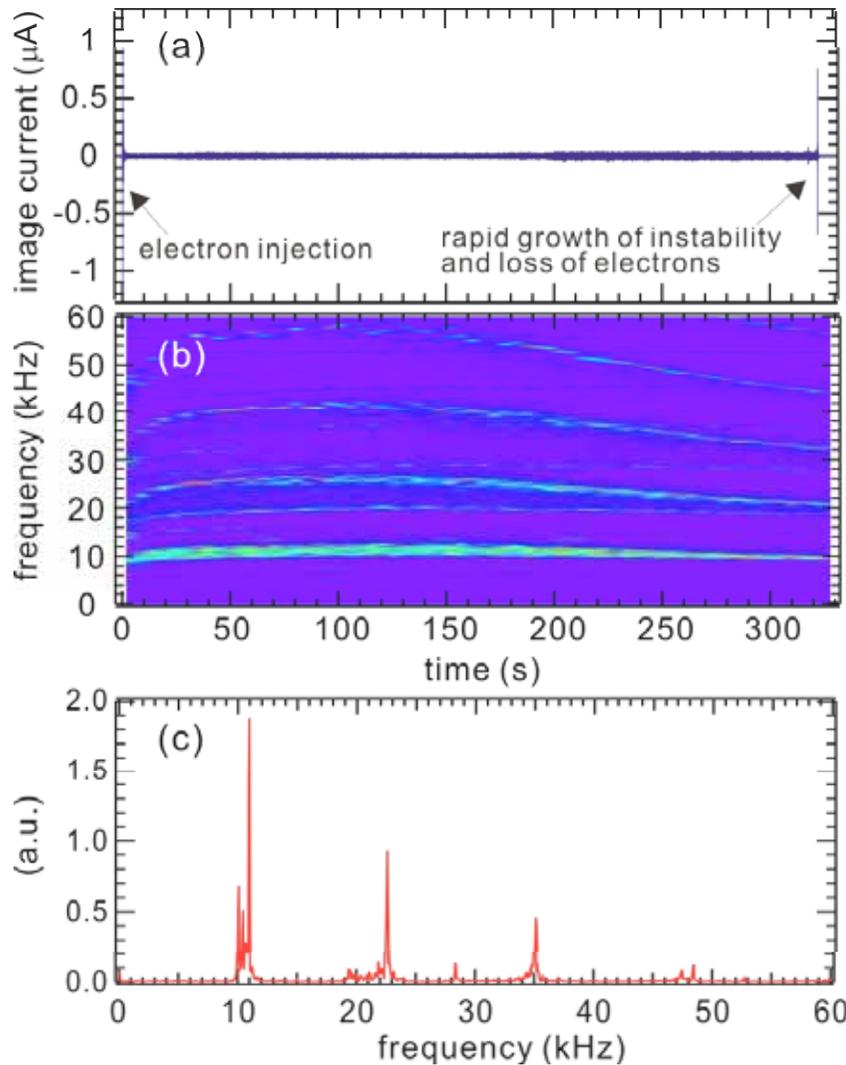


揺動スペクトルの
時間発展 (t=0-0.1s
に電子入射) と自己
相関関数

揺動のパワースペクトル

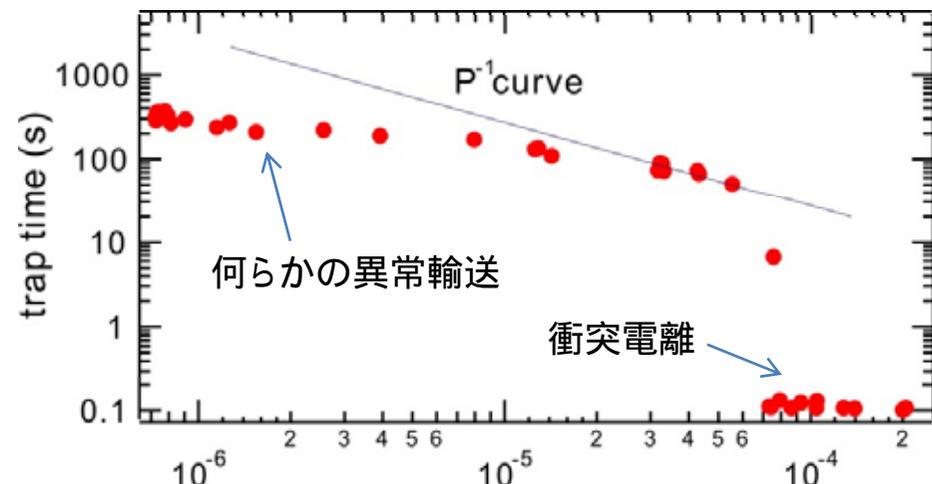
コイル支持状態では、磁気面を横切る支持構造による擾乱が大きく、揺動は低周波のモードに加え乱流的なスペクトルを持つ。

t=0.1sに電子入射停止後、揺動信号は~100us以内に減衰し、長時間の閉じ込めは観測されない(シア流の存在による不安定化, 拡散)。



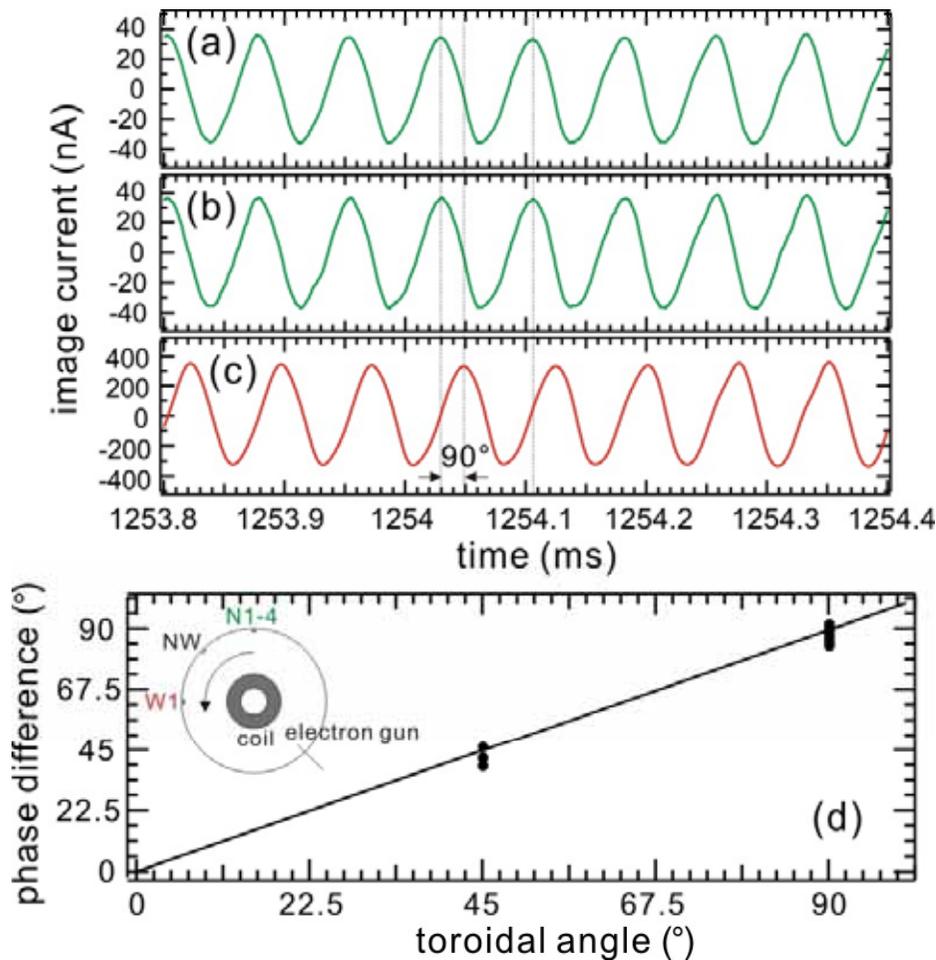
長時間閉じ込め時の(a) 揺動の典型波形と(b)周波数のパワースペクトルの時間発展. (c) $t=260\text{s}$ の周波数強度.

コイル磁気浮上時, プラズマは安定化し, 揺動には乱流的なf依存性が抑制され diocotron周波数が支配的となる.
 数百秒(中性ガスとの衝突による拡散と同程度)の閉じ込めが観測される.



安定閉じ込め時間の中性ガス圧依存

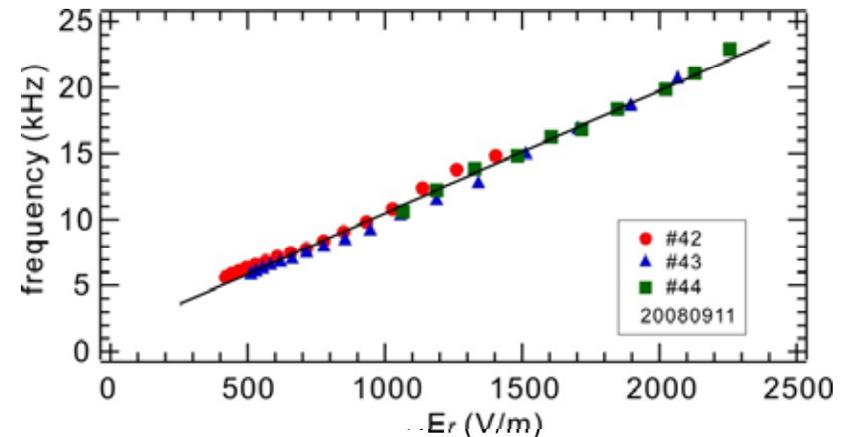
高ガス圧側では弱電離プラズマ生成.
 低ガス圧で, 中性粒子衝突による古典拡散から逸脱し, 異常輸送の傾向を示す(不正磁場等の効果?)



(a) wall W1 (西) 及び N2, N4 (北) による揺動の同時計測, (b) トロイダル方向に 90° 及び 45° 離れた wall 信号の位相差 (RT-1 の top view と wall, ExB 方向).

静電揺動はポロイダル方向に位相差を持たず, トロイダル方向に $n=1$ (基本波) のモード数を持つ.

波動の伝搬方向は, $E \times B$ ドリフト方向.

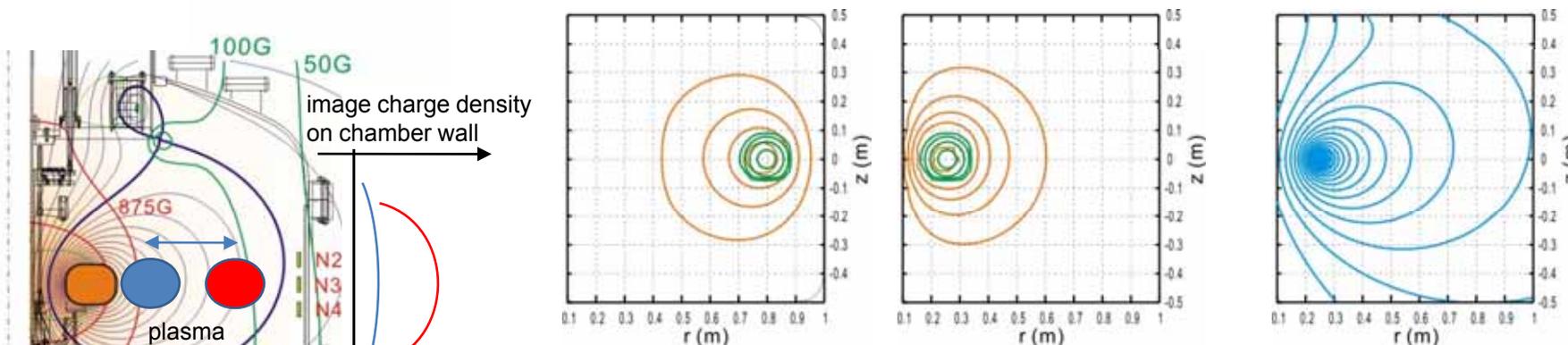


揺動周波数と電場強度

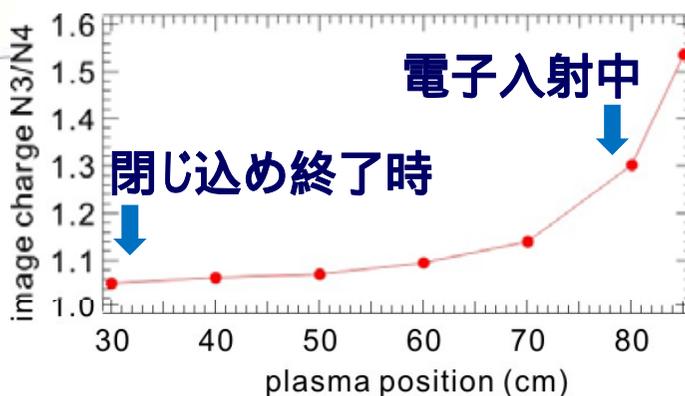
周波数は, RT-1 のパラメータでの diocotron (トロイダル方向の $E \times B$ 周回) 周波数 ($B=0.03T$, $R=0.7m$) に等しい.

長時間閉じ込みが観測される条件で 径方向電場強度 $E_r \sim 500V/m$.

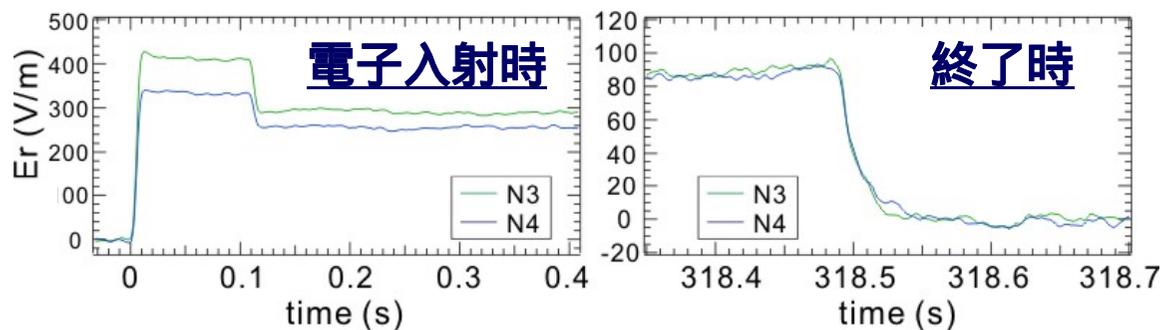
$$N \sim 4\pi^2 \epsilon_0 a R E_r / e = 2 \times 10^{11}$$



想定した電子密度分布と静電ポテンシャル分布, 磁気面



プラズマ位置とwallのimage charge比

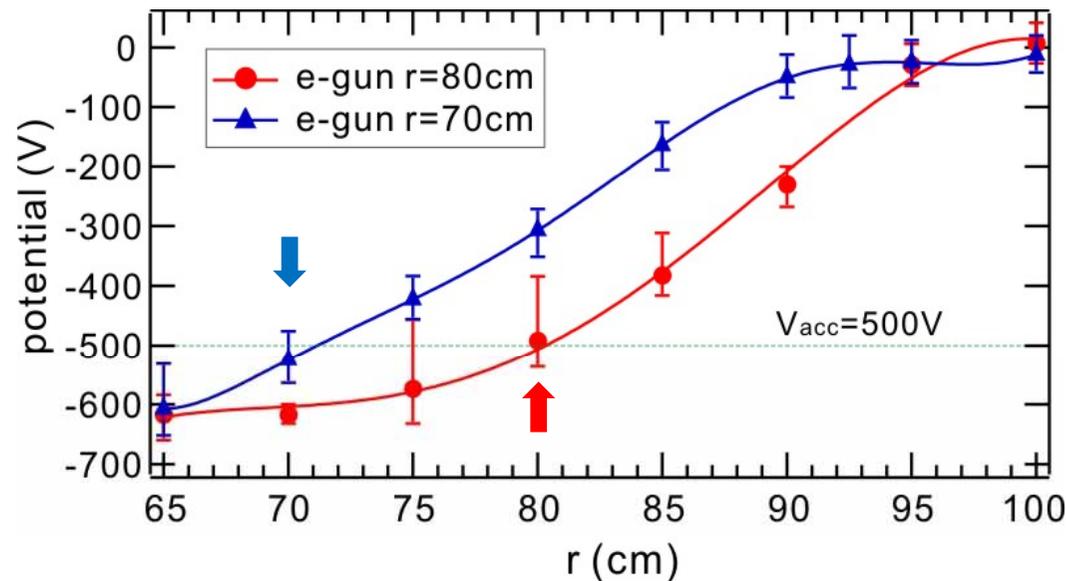


wall probe上の鏡像電荷比は, 電子分布位置を反映している (ch数は少ないが) .

wall信号を最も良く再現する分布は, 電子入射中 $r \sim 75$ cm (電子銃付近), 閉じ込め終了時には $r \sim 30$ cm に中心を持つ.

強磁場領域で内部導体を囲む密度分布は, 剛体回転に近い電位分布を形成する.

電子入射と閉じ込め時のwall信号



電子入射中の空間電位分布

電子入射中，電子銃による初期加速電圧 V_{acc} を有意に上回る電位がプラズマ中で観測される．

電子銃より内側に電位勾配が存在しており，磁気面内部の強磁場側に粒子が輸送されている事を示している．

電子は磁気面内部の強磁場側に侵入し安定な閉じ込め配位を形成する．

磁気圏型配位RT-1において純電子プラズマ実験を行った。超電導コイルの磁気浮上により、コイル支持構造による擾乱が抑制され、残存ガスの中性粒子との衝突による古典拡散時間程度の閉じ込めが実現された。

電子プラズマの安定閉じ込め時間は300s以上に達しており、単一荷電粒子の閉じ込め配位として磁気圏型配位の性能が確認された。

静電揺動と電場強度計測用のwall probeを導入し、揺動の伝搬方向と周波数特性を計測した。揺動は、純ポロイダル磁場中でトロイダル方向にExB速度で伝搬するdiocotron modeである。

Wallの多点計測によれば、電子プラズマは磁気面内部の強磁場側に侵入して安定な閉じ込め配位を形成している。その際の電位分布は剛体回転を与え得る、磁気面等高線に近い形状を取る。

今後は、定性的な理解に留まっている電子分布の議論を進め、平衡解析と比較して、長時間閉じ込めを実現するプラズマについて現実に即したモデルを作成する事が課題である。