

磁気圏型配位における 非中性プラズマの安定閉じ込め

東大新領域

齋藤晴彦, 吉田善章, 森川惇二, 矢野善久, 水島龍徳, 小林真也
(RT-1 Experiment)

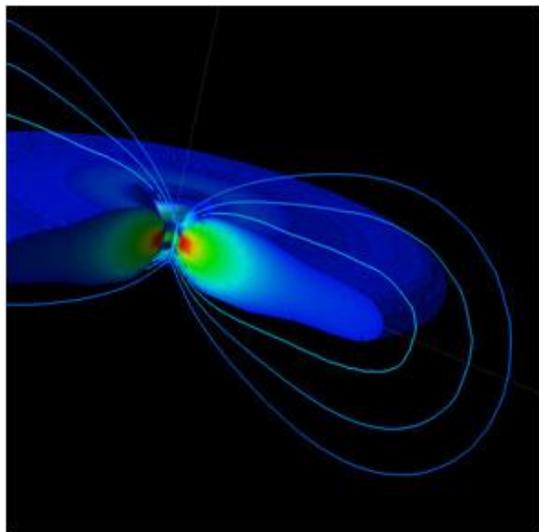
目次

- 研究背景: トロイダル系の非中性プラズマ閉じ込め研究
- 磁気圏型プラズマ閉じ込め装置Ring Trap 1 (RT-1)の概要
- 純電子プラズマの長時間閉じ込めと内向き輸送
- まとめと今後の課題



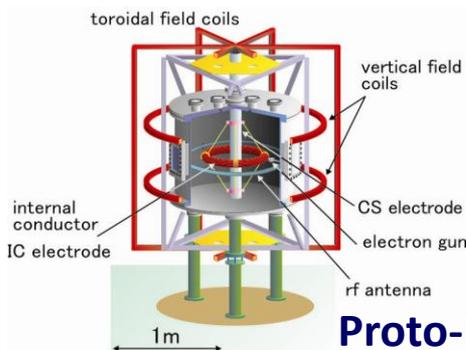
東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

- 電気的中性条件を満たさない**非中性プラズマ***(単一荷電粒子群やその混合物)は様々な集団現象を示し、研究対象となっている。
- **プラズマの基礎特性**(閉じ込め, 拡散, 波動etc.)の研究に加え, 近年研究が開始された**反物質研究**(電子陽電子の**pairプラズマ**や, CPT対称性の検証を目指す**反水素合成**)**を行う上でも非中性プラズマは基礎技術の一つである。
- 通常, 非中性プラズマの閉じ込めにはPenning-Malmberg trap等の**直線型配位**が使用され, 単一荷電粒子の極めて良好な閉じ込めが実現されている*。
- 一方で, 磁力線方向の閉じ込めに電場を使用する直線型配位では, 異なる電荷を持つ粒子の同時閉じ込めは困難である。
- ここで, 静電井戸を使用しない**トロイダル系**で非中性プラズマの安定な閉じ込め配位が確立されれば, 上述の多様な実験研究が可能になる***。
- こうした観点から, 各種トロイダル系で非中性プラズマの研究が開始されており, **安定な長時間閉じ込め**と**閉じ込め領域内への粒子入射**が鍵となる。
- 本研究では, 「磁気圏型配位」RT-1によるdipole磁場を用いた非中性(**純電子**)プラズマ実験を安定閉じ込めと粒子の内向き輸送について報告する。

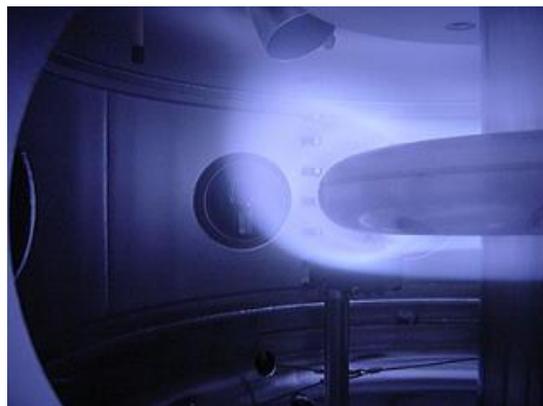


High- β flowing plasma near Jupiter

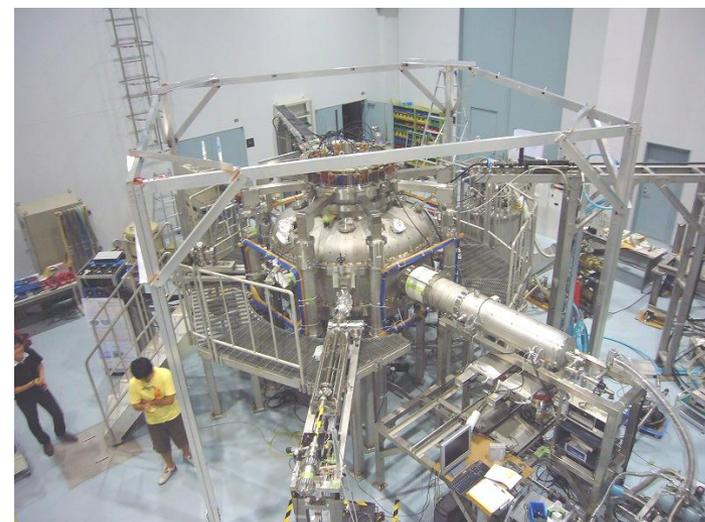
- **磁気浮上した超伝導コイル**によりdipole磁場を生成.
- 天体現象との類似 (木星磁気圏に観測される高 β プラズマや捕獲される高エネルギー荷電粒子)
- 主な研究目標は,
 - **先進核融合** (D-T→D-D/D-3Heを燃焼)を可能にする**超高 β プラズマ閉じ込めの実現*** (流れの効果**).
 - 反物質のトラップに適した**トロイダル非中性プラズマ**の安定な閉じ込め配位の確立.



Proto-RT (1998-) コイル支持



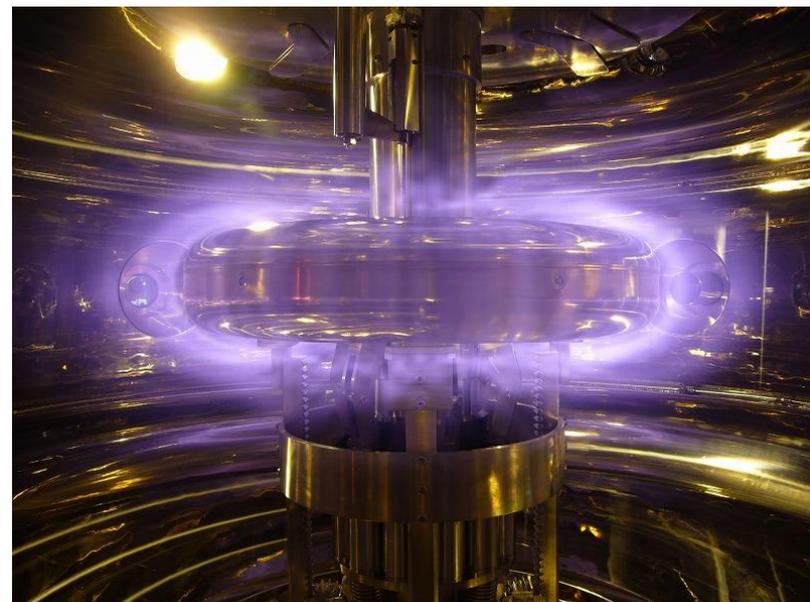
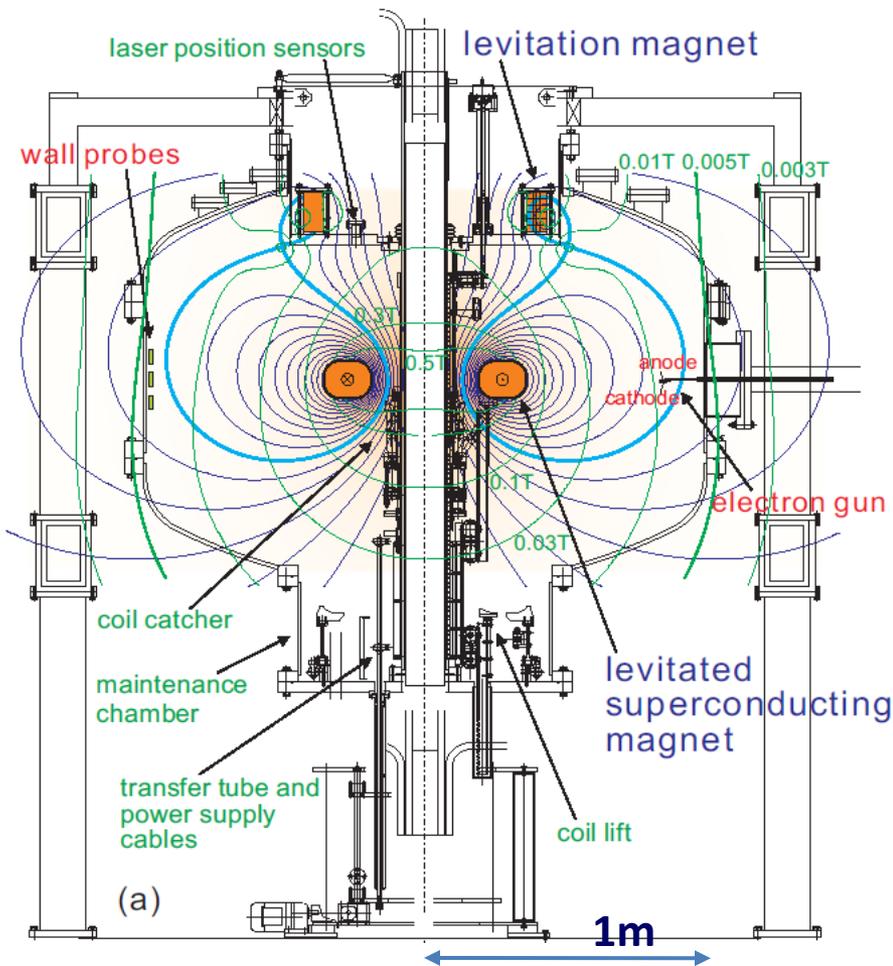
Mini-RT (2003-)



Ring Trap 1 (RT-1) (2006-)

**2008 Yoshida, IAEA Fusion Energy Conf., local $\beta > 70\%$

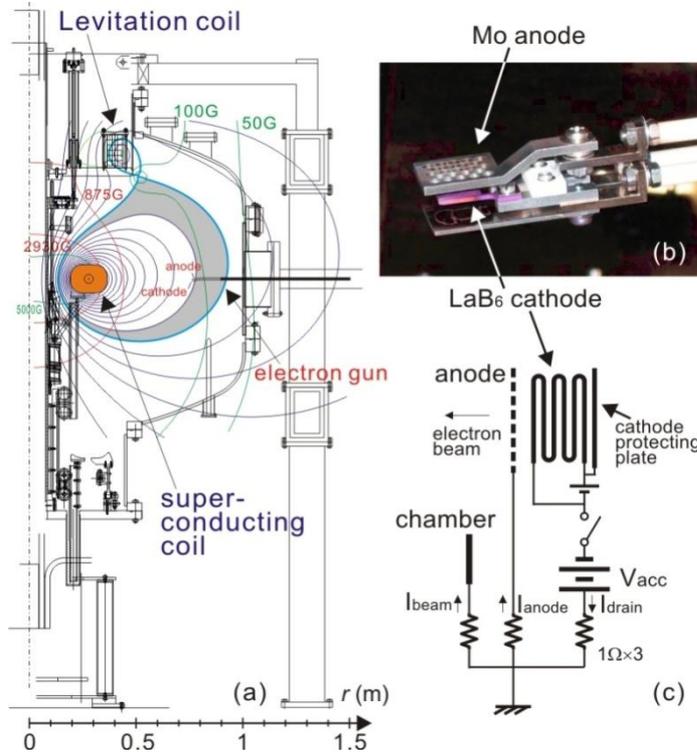
*Hasegawa Nucl. Fusion **30**, 2405, Yoshida PRL **88**, 095001; PFR **1**, 008 (2006), Garnier, Phys. Plasmas **13**, 056111.



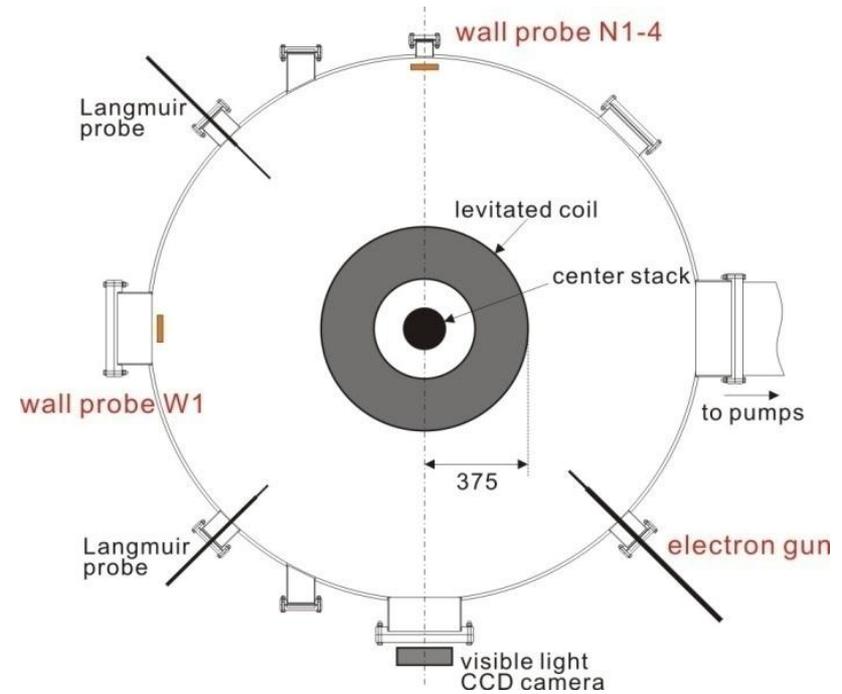
RT-1*のrz断面と、ECHにより生成した磁気圏型プラズマ。

16Kまで冷却したコイルを無冷却状態で磁気浮上させ、8時間の連続運転を行う。

- 高温超伝導 (Bi-2223) 線材を使用したdipole磁場コイル (重量110kg)。
- 超伝導コイル250kAT (116A × 2160turn) + levitationコイル28.8kAT。
- プラズマへの擾乱を抑制するために、コイルは磁気浮上して運転される。



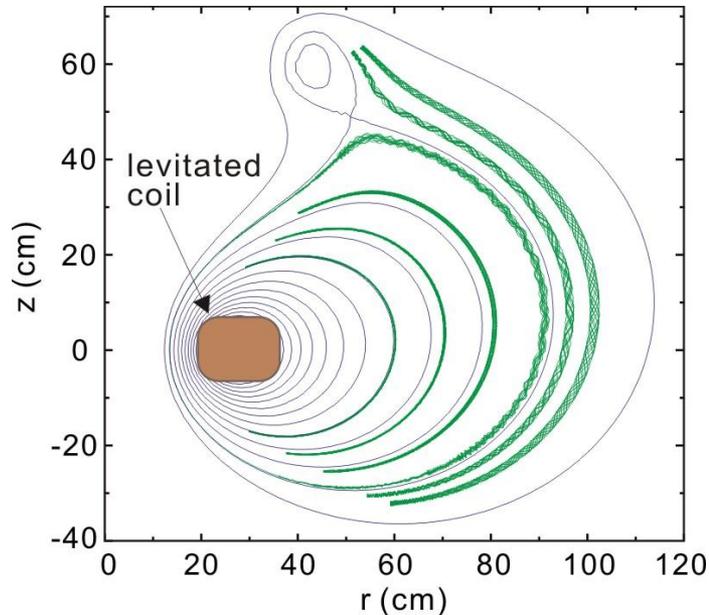
RT-1断面と電子銃の構造



RT-1のtop viewと計測器等の配置



- 閉じ込め領域周辺部の電子銃から電子を入射する。
- 電子はLaB₆熱カソード(-V_{acc})とアノード(真空容器電位)間で加速され、初期エネルギーeV_{acc}を持って静磁場中に入射される。

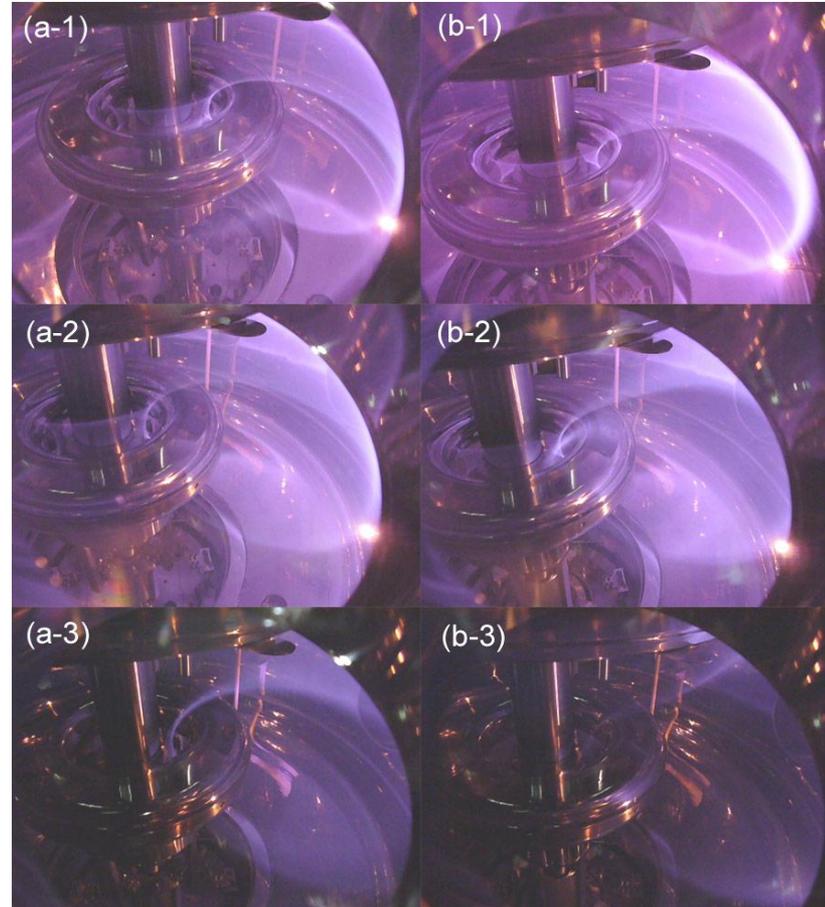


RT-1の磁場配位での単一粒子軌道
(ポロイダル断面への投影図).

$$P_\theta = \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = mr^2\dot{\theta} + qrA_\theta = \text{const.}$$

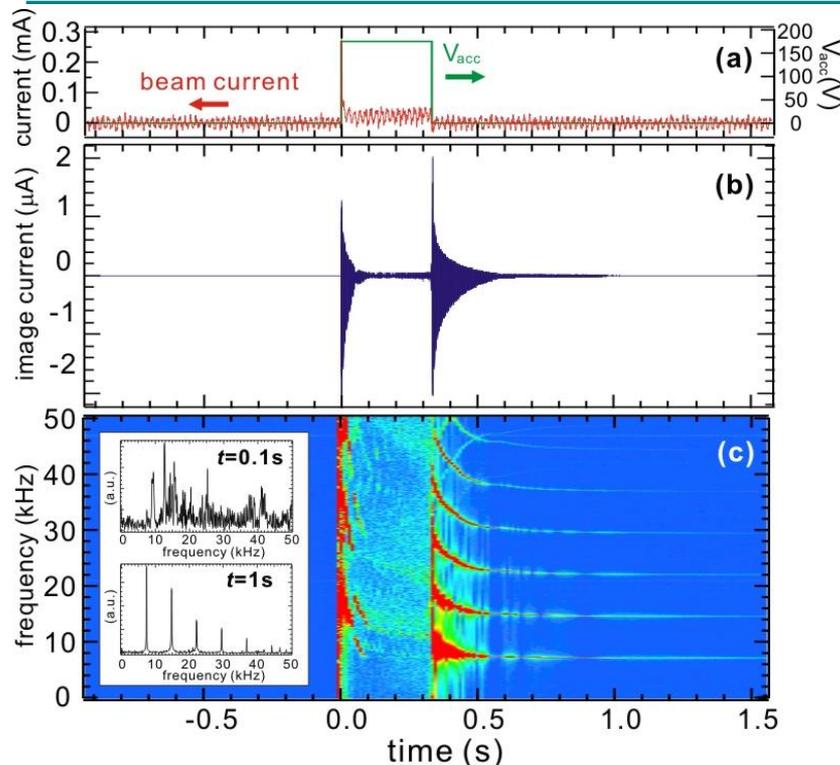
$$L = \frac{mv^2}{2} + q\mathbf{v} \cdot \mathbf{A} - q\phi$$

$$d \leq \left| \frac{mr\dot{\theta}}{qB_p} \right|$$

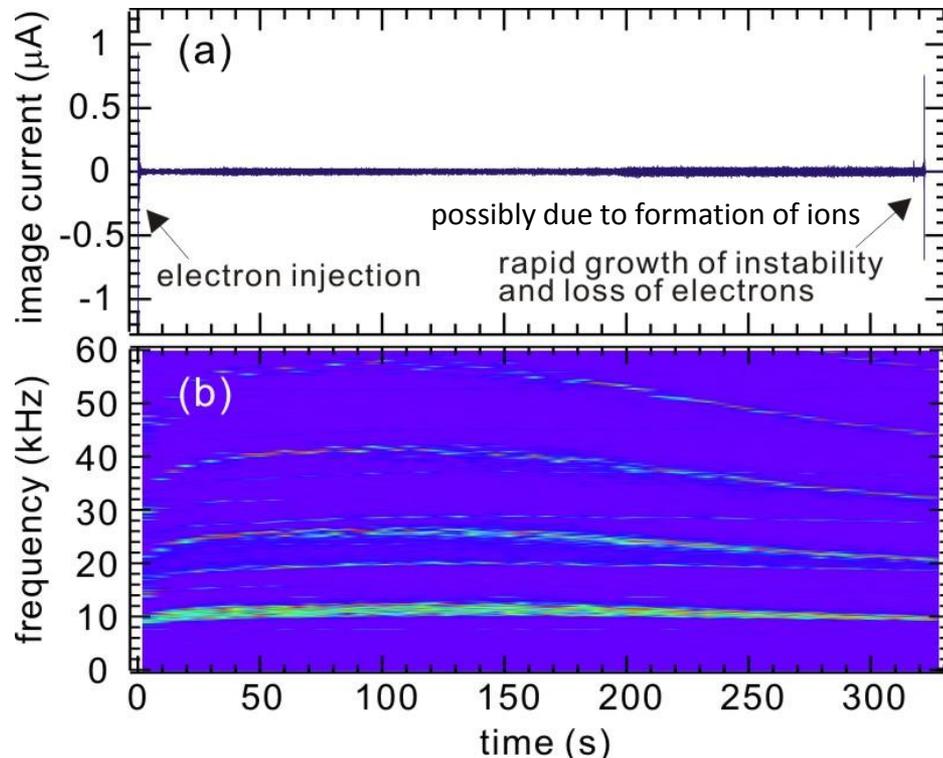


中性ガス中への電子ビーム入射による磁気面の可視化. (a) 純dipole, (b) コイル磁気浮上時.

- 正準角運動量の保存により, 電子は初期磁気面付近に局在($r_L < 6\text{mm}@500\text{eV}$).
- 可視化された磁気面は, 真空磁場の磁気面と良い一致を示す.



電子入射前後の揺動波形と周波数スペクトル

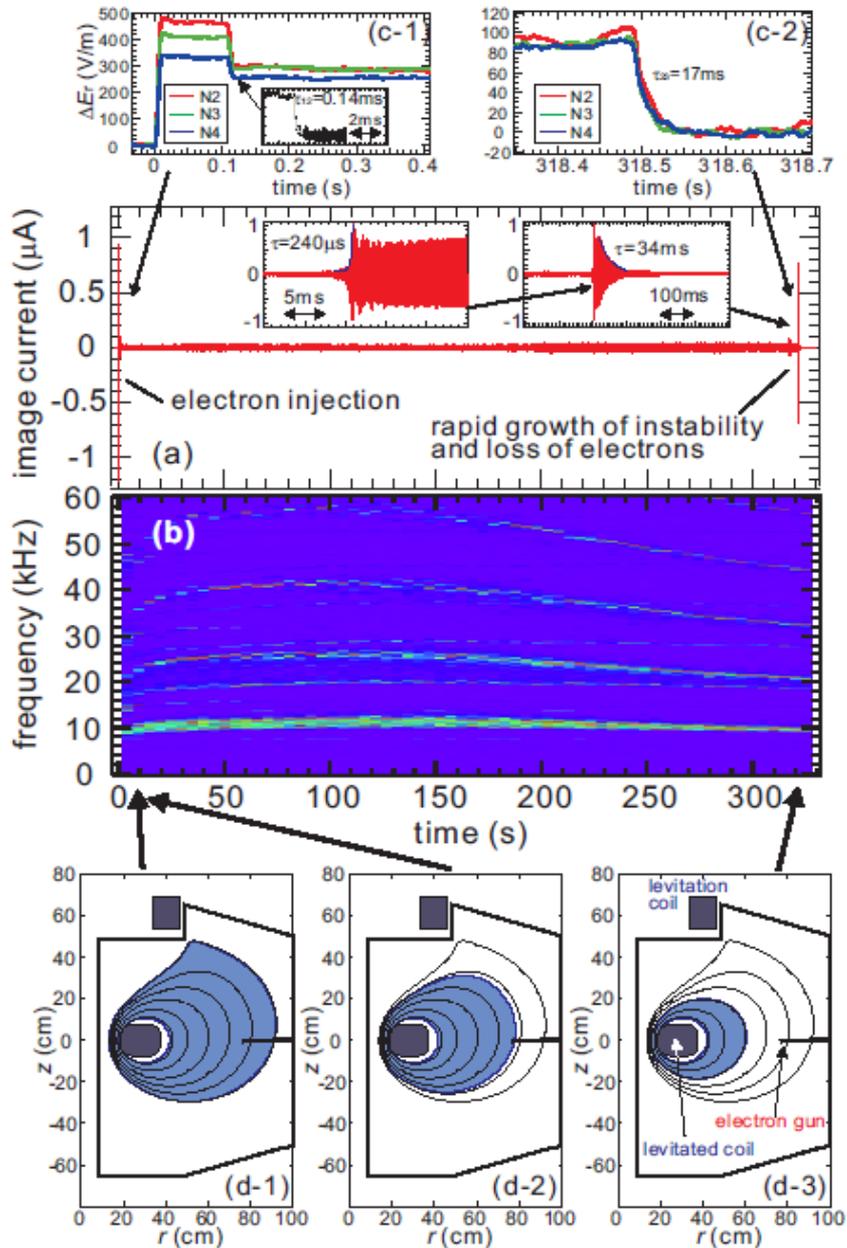


長時間閉じ込めの揺動と周波数

- 電子の入射中と停止直後, 揺動*は乱流的な大振幅の静電波形を持つ.
- コイル磁気浮上時には揺動は安定化し, 300秒以上の安定閉じ込めが実現される**.
- 安定閉じ込め中には剛体回転を示唆する揺動が観測される.
- 揺動の伝搬方向や速度は, 非中性プラズマのdiocotron mode (流体のKelvin-Helmholtz modeに相当)に一致している.

*Diocotron mode (Kelvin-Helmholtz instability). **Yoshida2010, to be published in PRL.

磁気面を横切る内向き輸送 (閉じ込め領域の時間変化) 8/12



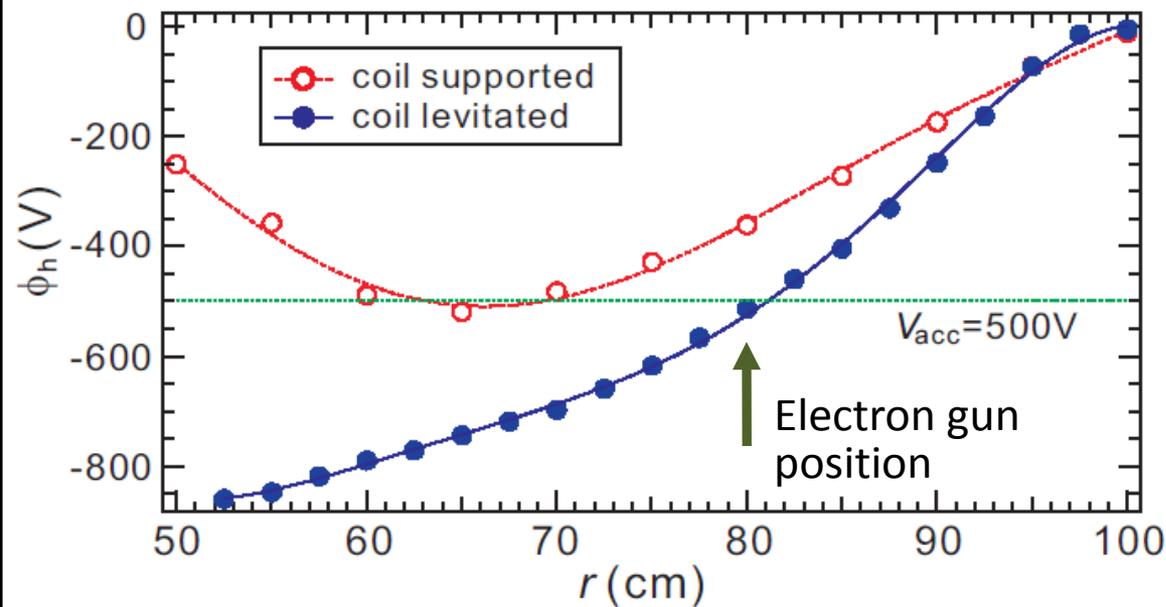
➤ 多点電場計測による閉じ込め領域の推定

- ・ wall probeによる非接触の電場計測.
- ・ プラズマ境界が磁気面に一致し、最内殻は内部導体と接する磁気面であると仮定.
- ・ プラズマ生成／閉じ込めの各段階で、電場計測結果を最も良く再現する分布を推定.

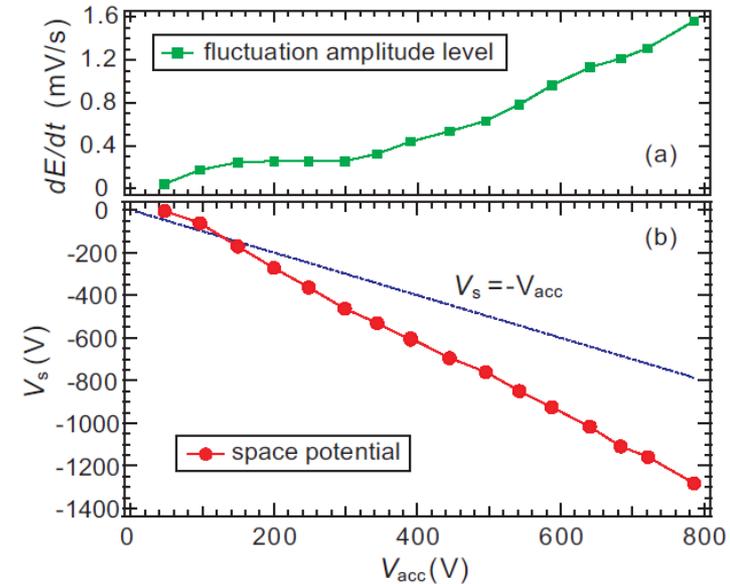
➤ 閉じ込め領域の内向きシフトが観測される.

1. 電子入射中, セパラトリクス内部のほぼ全域にプラズマが存在.
2. 電子入射停止後 (~ 周回時間), 電子銃の構造物と接する磁気面上の電子は失われる.
3. 強磁場領域で安定閉じ込めが実現される.

➤ 電子は初期磁気面から逸脱して強磁場領域へと輸送され, 安定な平衡が形成される.



装置赤道面 ($z=0\text{cm}$) で計測した空間電位分布.



初期エネルギーと空間電位.

- コイル磁気浮上を行わない時, コイルは真空容器と同電位であり, ポロイダル磁場中での $E \times B$ 速度は強いシアを持つ. ⇒ 揺動が大きく閉じ込めは短い.
- コイル磁気浮上により流速のシアが減少した時にプラズマは安定化し, 長時間の閉じ込めが実現される.
- 電子銃より内側(強磁場側)の空間電位の大きさは電子の初期エネルギーを上回り, 電子が加速されエネルギーを得て内向き輸送された事を示している.

RT-1の純電子密度と真空度では、電子-中性粒子衝突が支配的。
 中性衝突を考慮して、RT-1のパラメータで磁気面を横切るfluxを評価すると

$$m_e n_e \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) - k_B T_e \nabla n_e - m_e n_e \mathbf{v}_{ne} \mathbf{v}$$

$$\mathbf{v}_{\perp} = -\frac{k_B T_e \nabla n_e / n_e + e\mathbf{E}}{m_e \mathbf{v}_{ne} [1 + (\omega_c / \mathbf{v}_{ne})^2]} + \frac{\mathbf{v}_{E \times B} + \mathbf{v}_D}{1 + (\mathbf{v}_{ne} / \omega_c)^2}$$

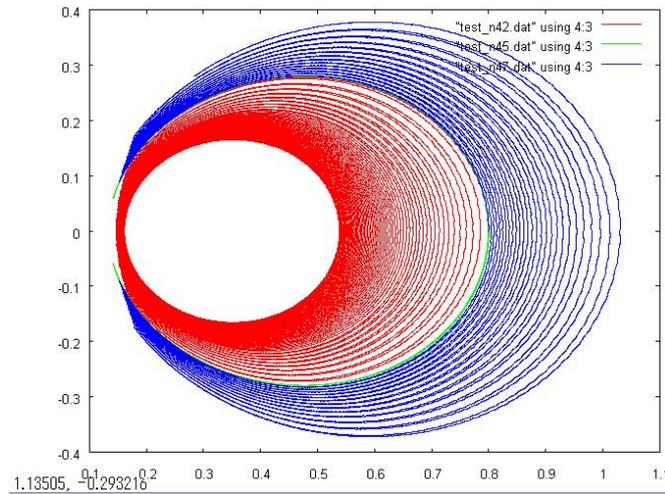
$$\mathbf{v}_{n\perp} \sim -\frac{k_B T_e \mathbf{v}_{ne}}{m_e \omega_c^2} \frac{\nabla n_e}{n_e} - \frac{e \mathbf{v}_{ne}}{m_e \omega_c^2} \mathbf{E} = -D_{n\perp} \frac{\nabla n_e}{n_e} - \mu_{\perp} \mathbf{E}$$

$$B = 0.03 \text{ T}, T_e = 100 \text{ eV}, P_n = 10^{-6} \text{ Pa}, \text{ and } n_e = 10^{12} \text{ m}^{-3}$$

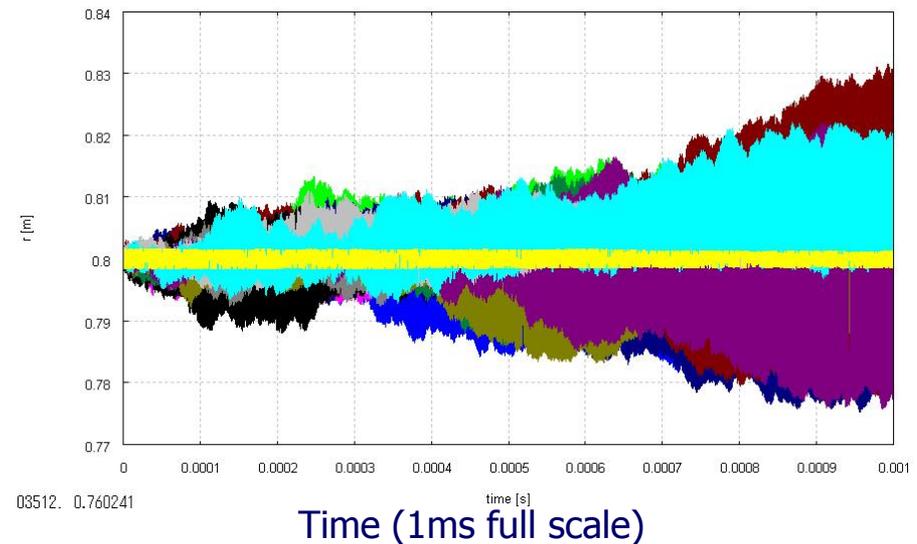
$$I_{n\perp} = e n_e v_{n\perp} A \sim 10^{-10} \text{ A}$$

内向きに輸送される粒子は $10^9/\text{s}$ 程度となり、観測結果(ビーム入射開始から10ms以内に 10^{10} 程度以上のプラズマが電子銃より強磁場領域に観測される)を説明出来ない。

同様に、電子の加速による空間電位の増大も説明出来ない。



Resonance particle orbits including azimuthal electric field of 10^4V/m
(Electron orbit for 0.01ms)



Radial transport of electrons due to random electric field.

- ▶ トロイダル方向の周回周期程度より早い揺動があり系が非対称の時、電子の正準角運動量(第三断熱不変量)は保存されず、径方向に輸送される*。
- ▶ その際、第一、第二断熱不変量が保存されれば、強磁場側で電子は加速。
- ▶ 実験的に観測される乱流的状态(100V/m程度のランダム電場)時、電子の径方向移動速度は $\sim 1\text{cm}/1\text{ms}$ であり、実験結果と矛盾しない。

*Shulz & Lanzerotti 1974, Walt 1971.

- 磁気圏型装置RT-1のdipole磁場配位において、**非中性(純電子)プラズマ**の閉じた磁気面内への入射と安定閉じ込めを実現した。
- コイル磁気浮上の効果によりプラズマは安定化。
Ne $1-10 \times 10^{11} \text{m}^{-3}$ $\tau > 300 \text{s}$ 安定閉じ込め中にコヒーレントな揺動。
- 多点電場計測によれば、静電揺動が非安定時、粒子の強磁場側への radial diffusion が起こり、安定閉じ込め領域に電子雲が生成される。
- **強磁場領域への粒子侵入とエネルギーの増大**は、静電位計測からも確認され、空間電位は初期の加速電位を上回る。
- プラズマが乱流的状態の時、第三断熱変量が非保存となり、粒子が内向きへと磁気面を横切り輸送される事で粒子進入が実現された。
- 今後の課題
 - ・ 粒子捕獲率の向上(希少粒子への適用性)。
 - ・ 電子プラズマ内部の、より詳細な内部構造と平衡の理解。
 - ・ 温度計測, 電子入射方法, 永久磁石によるコンパクトトラップの開発。