

天文学会2007年秋季大会 A134a

磁気圏型プラズマ装置RT-1 における初期計測実験

東京大学新領域創成科学研究科
プラズマ理工学講座(吉田・小川・古川研究室)

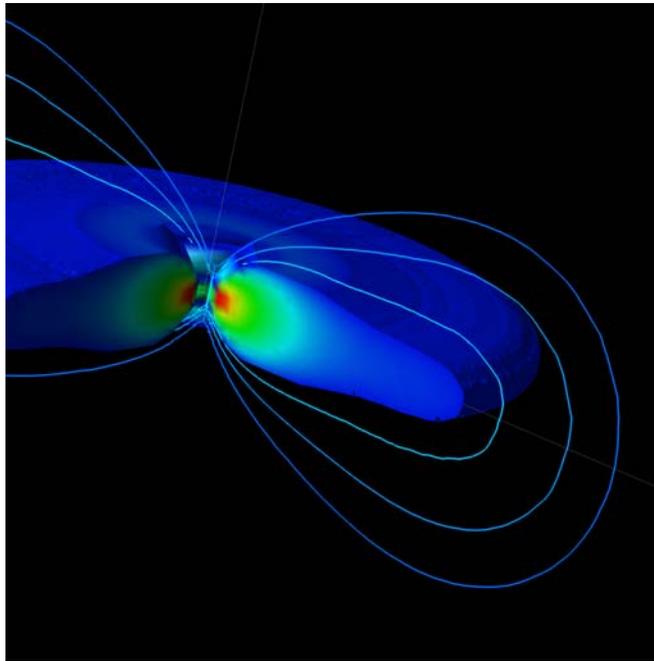
東大新領域, 高温プラズマ研究センター

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

- 目次
1. 磁気圏型プラズマ実験の研究背景
 2. 8.2GHzマイクロ波によるプラズマ生成
 3. 純電子プラズマの長時間閉じ込め
 4. まとめと今後の課題



研究背景：磁気圏型閉じ込め装置によるプラズマ実験*



木星磁気圏のプラズマ平衡の数値計算.
高速流の動圧の効果により, 超高 β プラズマ閉じ込めが実現される.

J. Shiraishi, Z. Yoshida et al., Phys. Plasmas **12**, 092901 (2005).

擾乱を抑制しプラズマの良好な閉じ込めが必要
⇒超伝導コイル磁気浮上プラズマ実験を開始
RT-1装置(2006~)による初期実験結果を報告

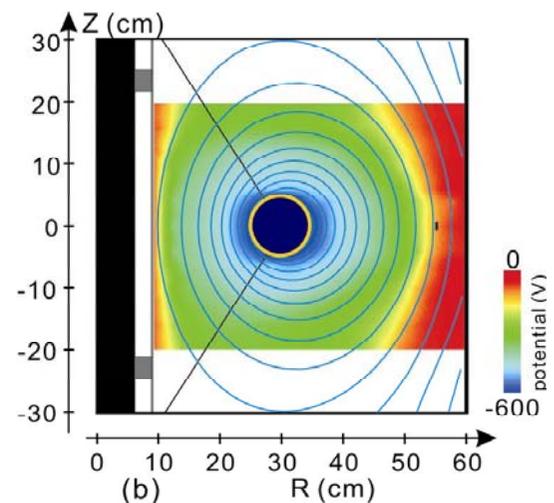
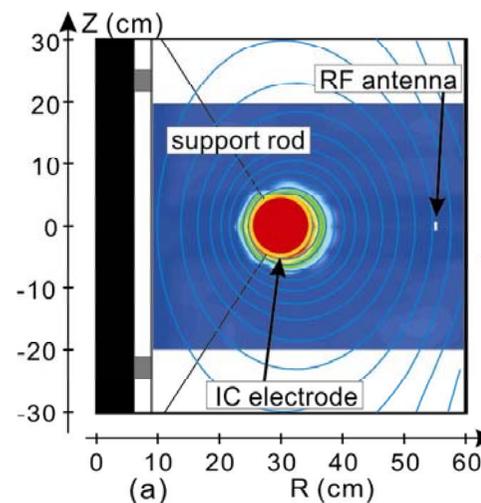
* Z. Yoshida et al., Plasma Fusion Res. **1**, 008 (2006).

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

内部導体系・磁気圏型プラズマ実験配位

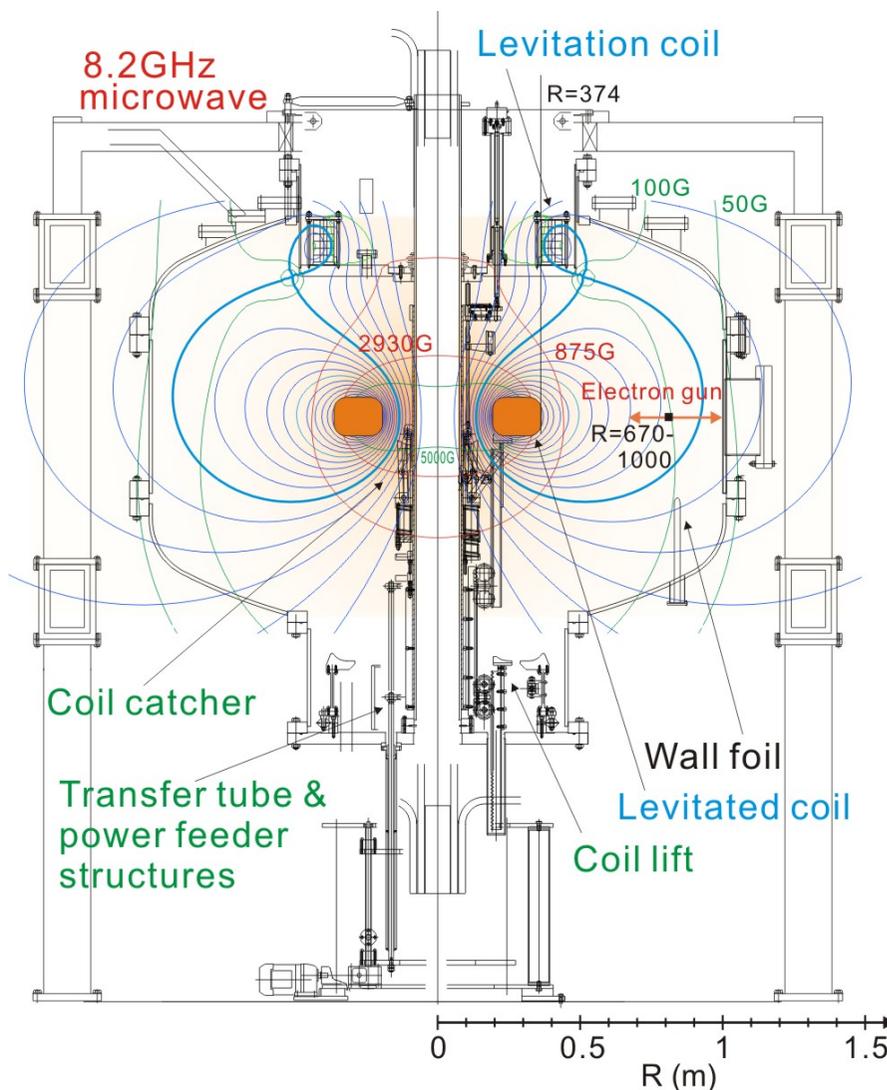
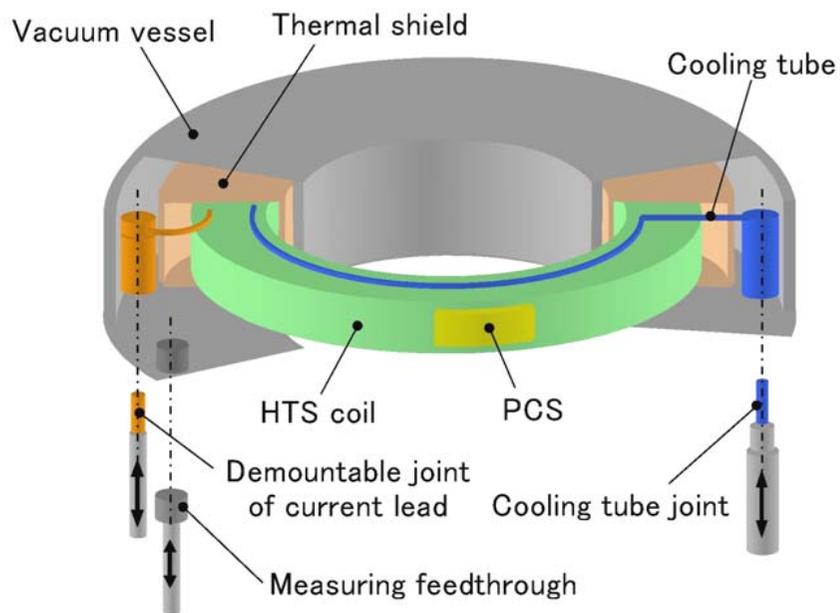
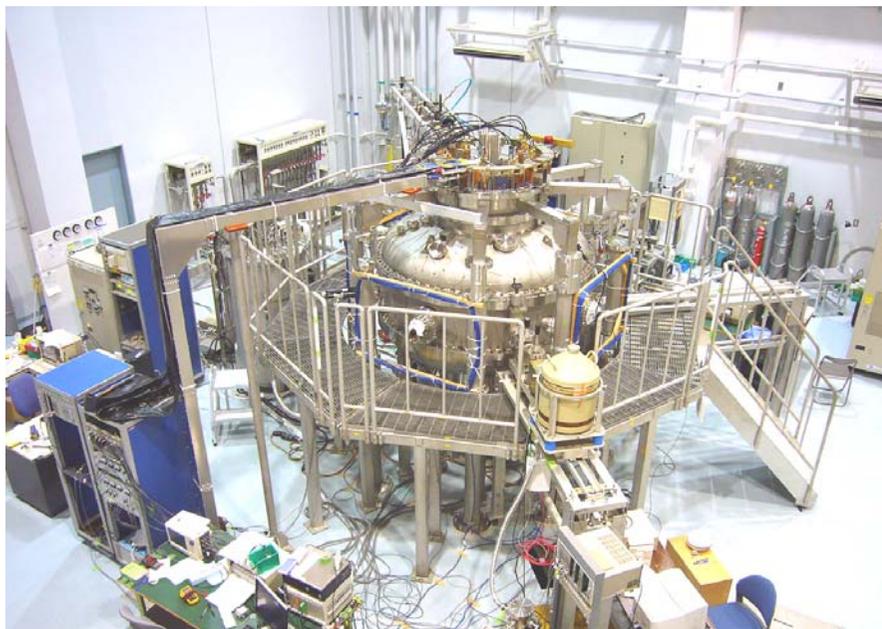
惑星磁気圏と類似したdipole磁場を生成.

- ・流れを持つプラズマの高 β 平衡状態の検証 (double Beltrami state**)
- ・反物質を含む各種非中性プラズマ閉じ込め



Proto-RT装置(磁場コイルは支持構造により容器内部に固定)における電極バイアスによる電場形成.
トロイダル方向にマッハ数5程度の流れが定常的に生成される.

超伝導コイル磁気浮上式装置RT-1(Ring Trap-1)



超伝導内部導体装置RT-1の全体図、断面図、Bi-2223高温超電導コイル模式図

($T_c = 110\text{K}$)

RT-1プラズマ生成部・計測器の配置

Soft X-ray



- Si(Li) detector with Be window
- PHA system

可視分光

トロイダル流速,
イオン温度等

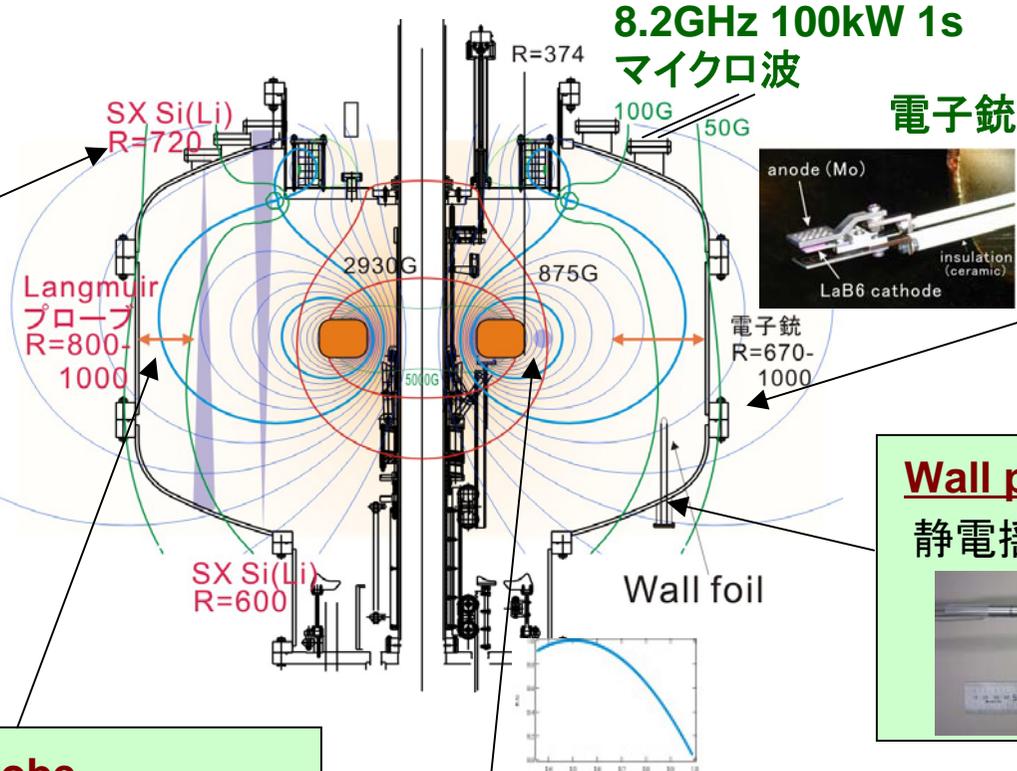
Edge Langmuir probe

- double probe for Te, Ne profile measurements
- 純電子プラズマ空間電位の概算: electron saturation current

$$\Phi_H = \Phi_S - \frac{k_B T_e}{e} \ln \left(\frac{I_{es}}{I_{em} + I_c} \right)$$

emission current current collected by probe

※ emissive probeを準備中



Diamag loop



磁気ループ (2箇所)

Wall probe (絶縁金属板)

静電揺動の非接触測定



マイクロ波干渉計 75GHz heterodyne

R方向密度分布を仮定

$$N_e = N_{peak} \times (1 - (2 \times (r - 0.5))^2)$$

↓

線積分密度とピーク密度は

$$N_{peak} = 2.1 \times \int_{L1}^{L2} N_e dl = \int_{0.45}^1 N_e \times (r^2 - 0.45^2)^{-0.5} r dr$$

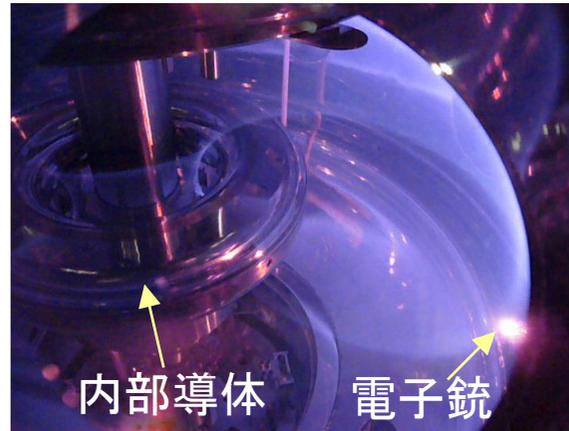
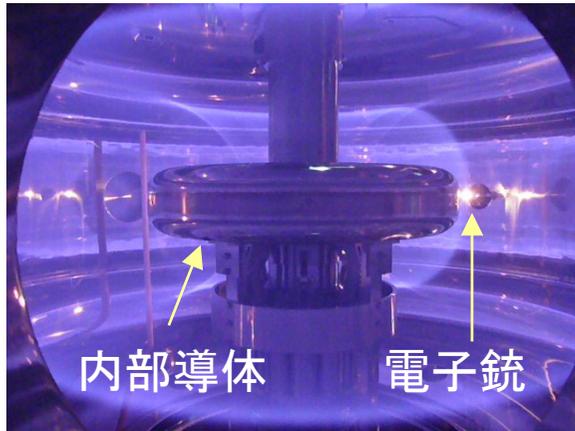
この関係式をピーク電子密度の見積りに使用。



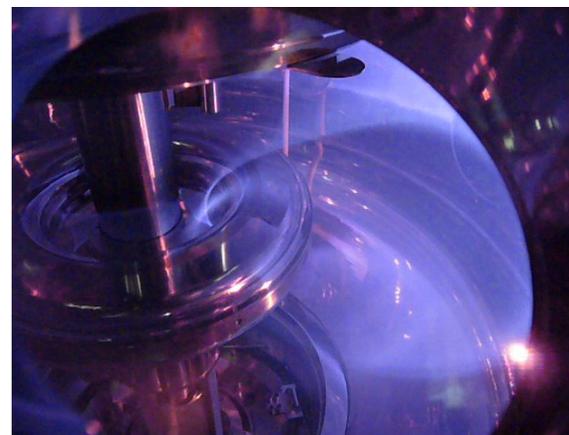
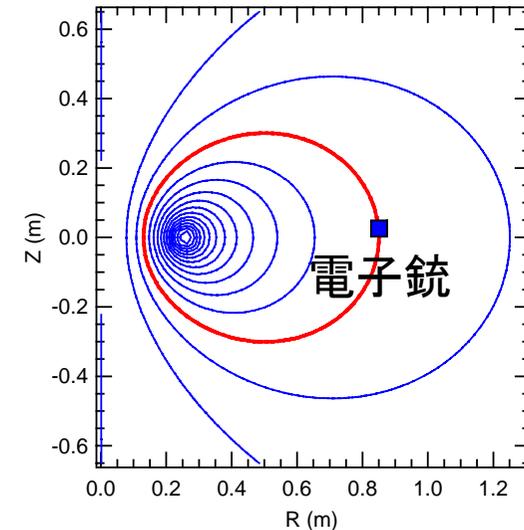
電子入射による磁気面の可視化

1×10^{-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。

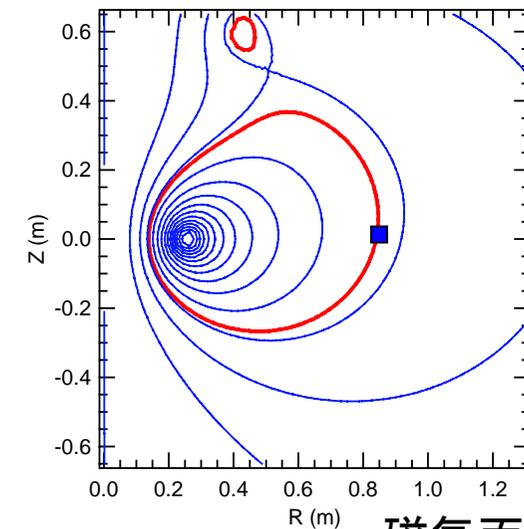
∇B /curvature driftにより電子はトロイダル方向に輸送される。



コイル支持状態(内部導体による純dipole磁場配位)

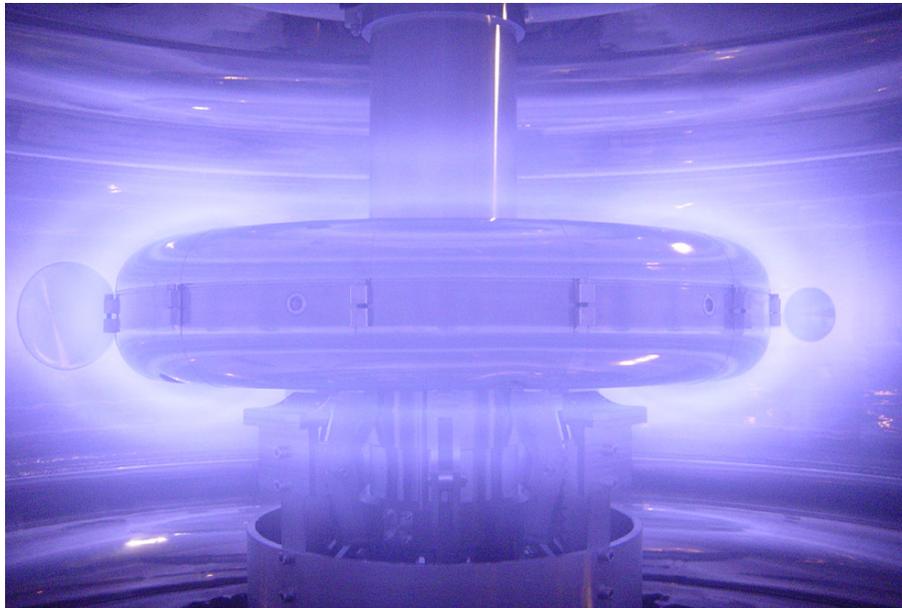


コイル磁気浮上状態(内部導体+浮上コイル磁場)

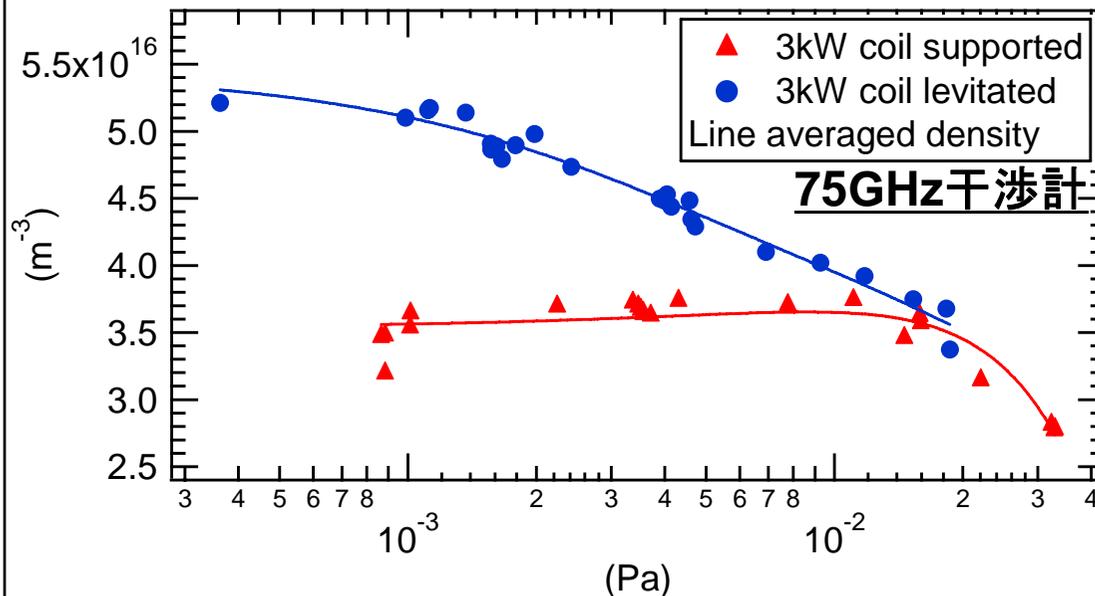


磁気面計算

RFプラズマ1:コイル浮上によるプラズマ性能向上



コイル磁気浮上状態でのプラズマ生成



コイル完全磁気浮上時と支持時の電子密度の比較

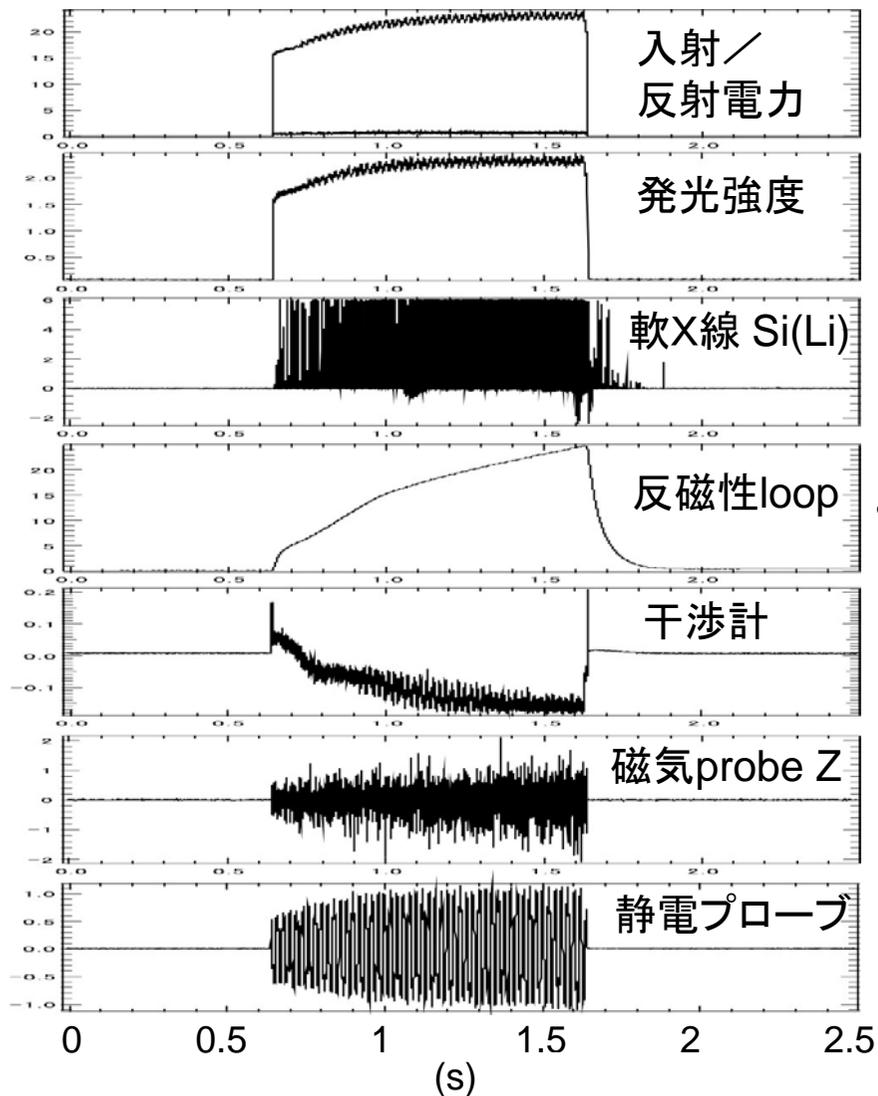
コイル浮上により, 線平均密度, エッジ部の電子密度ともに2倍程度の増大が見られる.

特に, 中性粒子との衝突の影響が低減する低ガス低圧域で顕著. (cut off density, $\alpha=1 \Rightarrow 3.1 \times 10^{-3}$ Pa)

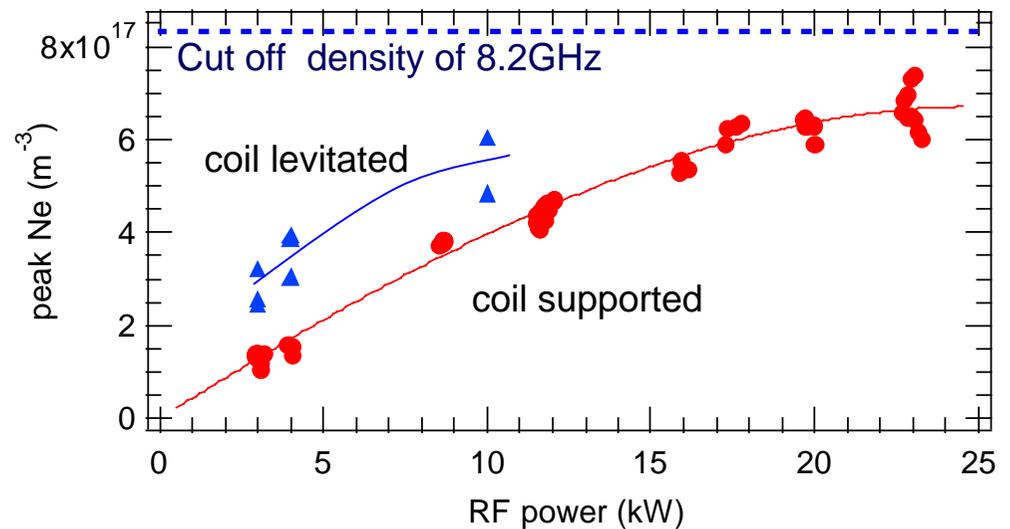
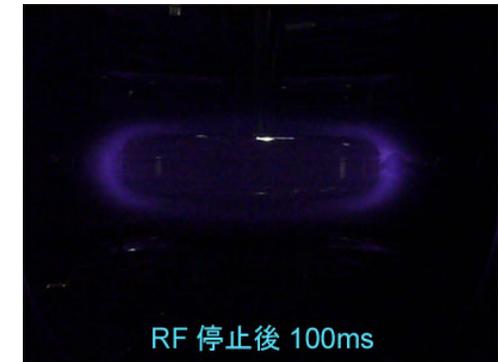
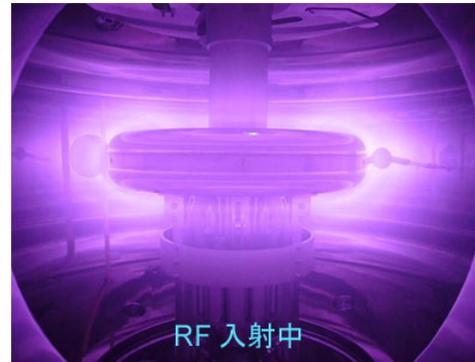
逆に電離度が1%程度以下の弱電離時には, コイル磁気浮上の効果は見られない.

コイル支持構造による粒子損失の抑制によるプラズマ閉じ込め改善を示している.

RFプラズマ2: 入射電力上昇による電子密度向上



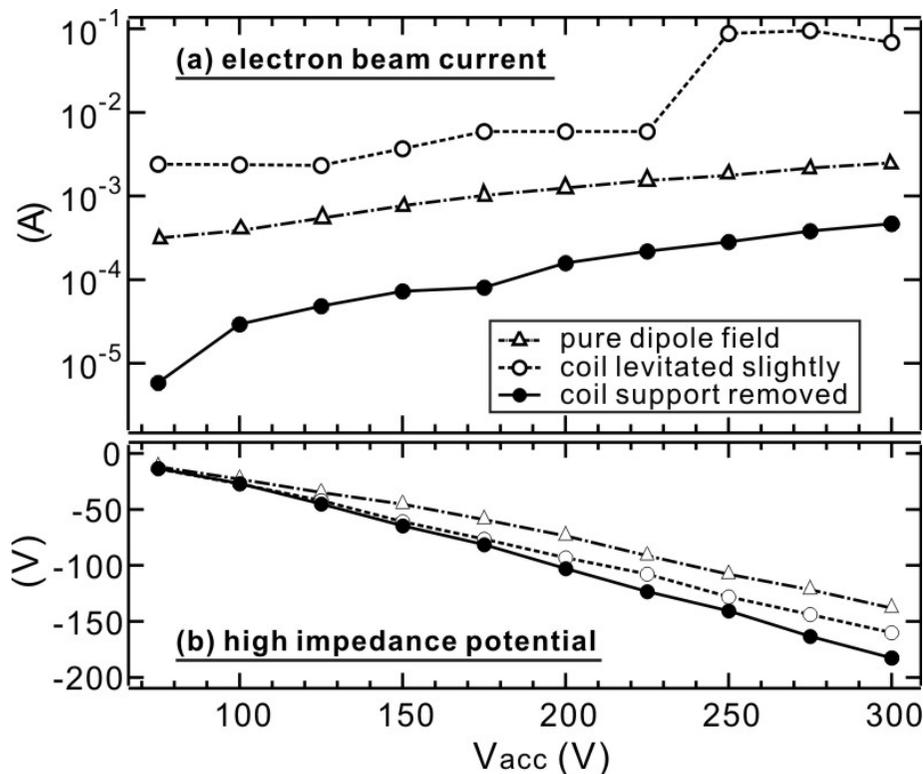
マイクロ波入射電力25kW運転時の典型波形



RFパワー23kW時, peak密度は $7 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$

- ・密度がやや飽和する傾向が見られ, cut off densityに近い比較的高電離度(~30%)のプラズマが得られている.
- ・電場形成/流れ駆動実験が今後の課題.

純電子プラズマ1: 空間電位の形成と径方向分布



電子ビーム電流

コイル磁気浮上時, 電子ビーム電流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 $a=0.25\text{m}$)

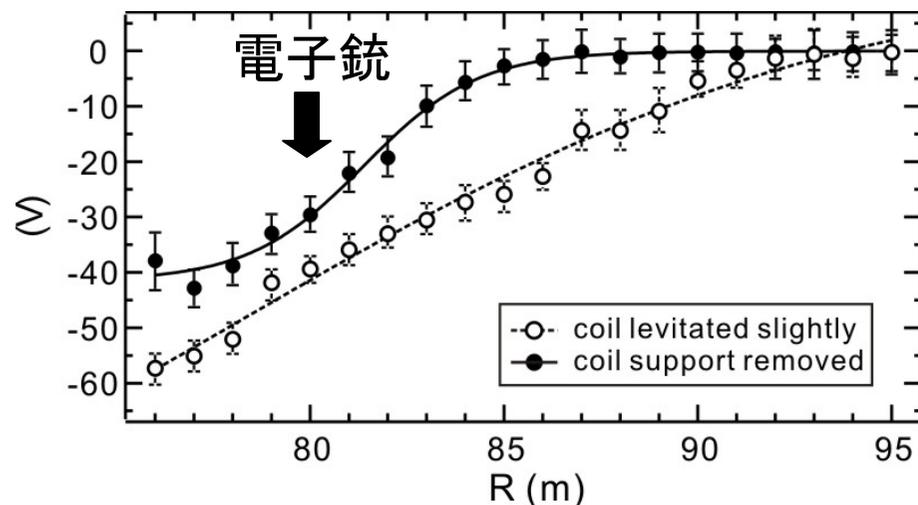
$$Q = 4\pi^2 \varepsilon_0 a R E_r = 2 \times 10^{-8} \text{ C}$$

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

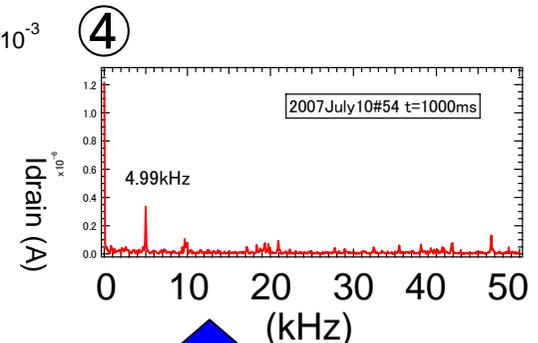
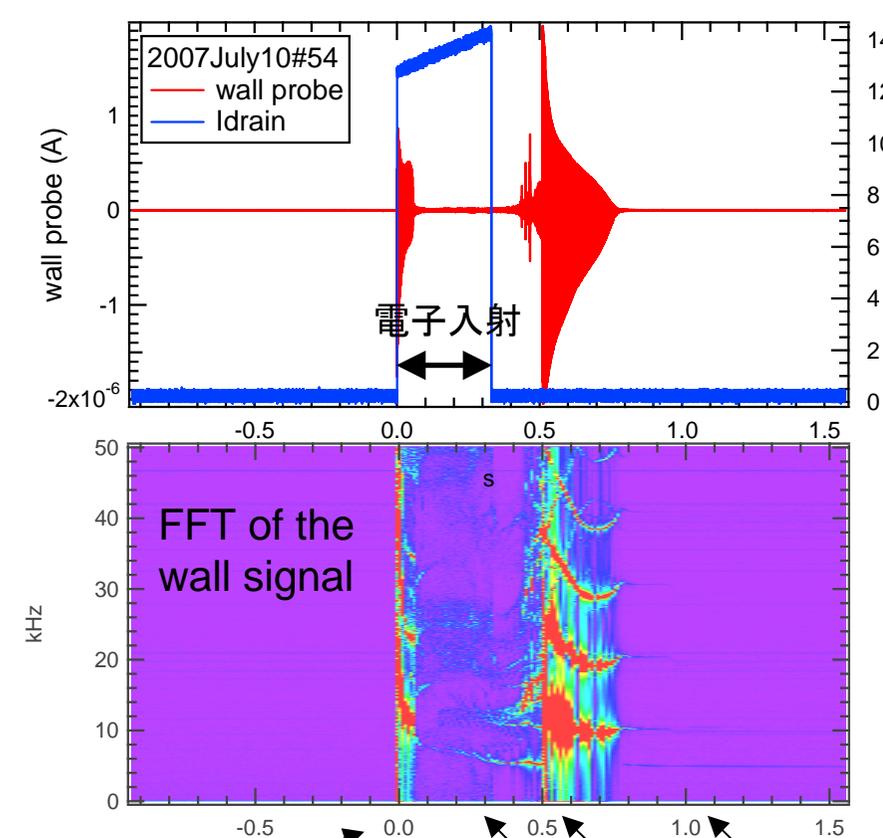
電位分布

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:

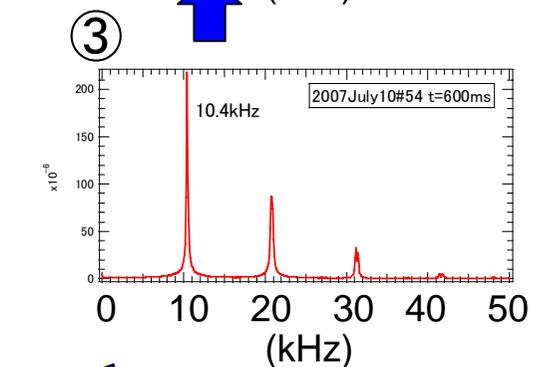
コイル完全浮上時に限り, 電子銃カソード付近で大きな電位勾配を観測.



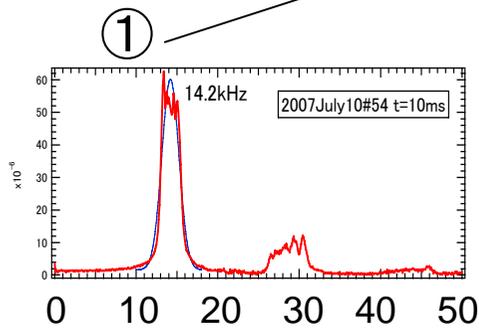
純電子プラズマ2: 静電揺動の典型波形(安定化)



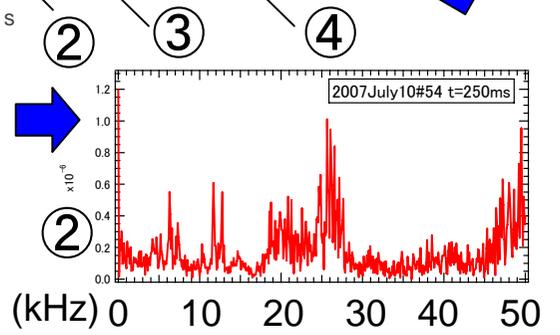
④ t=1s (安定閉じ込め期)
大振幅のpeakが減衰。
周波数は5kHz程度で
非常にゆっくりと下がる。



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。



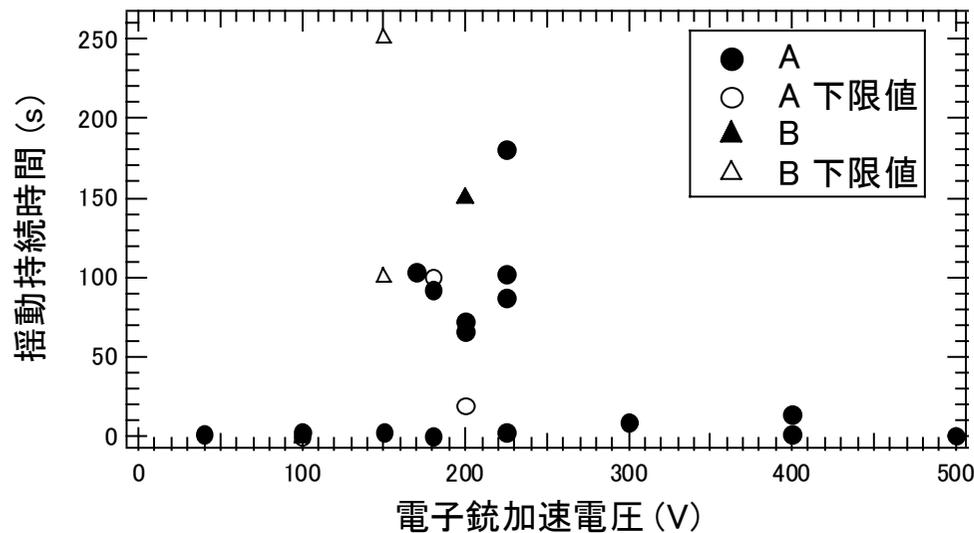
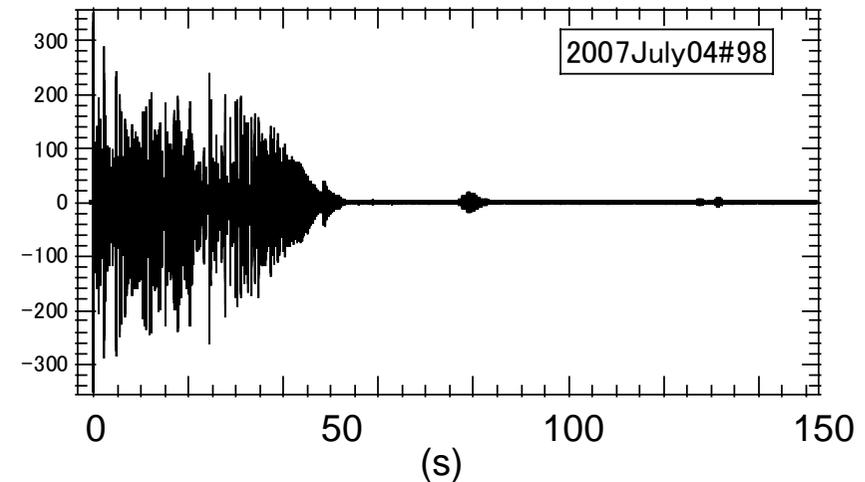
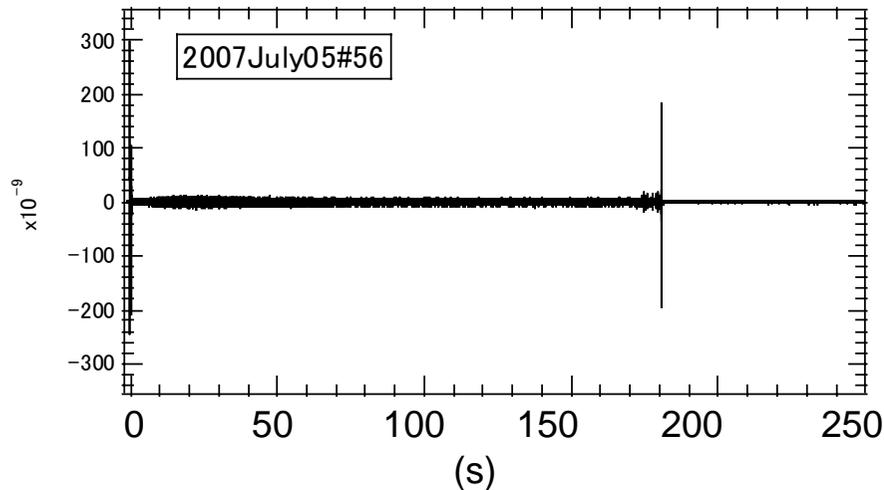
② t=250ms (入射停止直前)
~25,50kHzにbroad peak.
基本波は~6kHz?

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。

純電子プラズマ3: 閉じ込め時間(持続時間)

- ・揺動が安定して持続し, 最後に振幅の急成長を見せ信号が消える例 と,
- ・揺動の振幅が緩やかな成長と減衰を繰り返して長時間持続するケース が存在.



5分程度の揺動持続を観測.

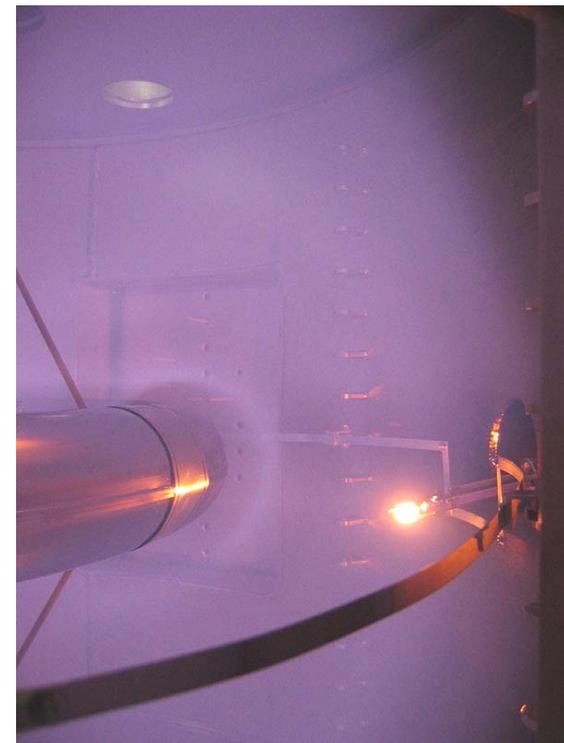
長時間閉じ込めの条件は,

- ・コイルの完全磁気浮上.
- ・プローブ等の構造物を撤去.
- ・ 10^{-6} Pa台前半の高真空.
- ・入射ビーム電流の抑制.

RT-1実験現状のまとめと今後の課題

磁気圏型装置におけるコイル磁気浮上プラズマ実験 (コイル磁気浮上状態で水素プラズマと純電子プラズマを生成)

- マイクロ波放電プラズマ
 - コイル支持状態: $n_e=7 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$, 低ガス圧力領域で密度増大.
 - 高エネルギー電子成分の良好な閉じ込め(1秒程度).
- トロイダル純電子プラズマ
 - コイル磁気浮上による長時間閉じ込め.
- 今後の計画: プラズマ中の流れ形成
 - 径方向電場/トロイダル流の生成.
 - LaB₆カソードによる電子入射.
 - 電極バイアス. を検討中.
 - 純電子実験: プローブ多チャンネル化.
 - 干渉計, SX等による各種パラメータ測定.



Proto-RT装置における
プラズマバイアス実験