

RT-1におけるコイル磁気浮上による プラズマ閉じ込めの改善

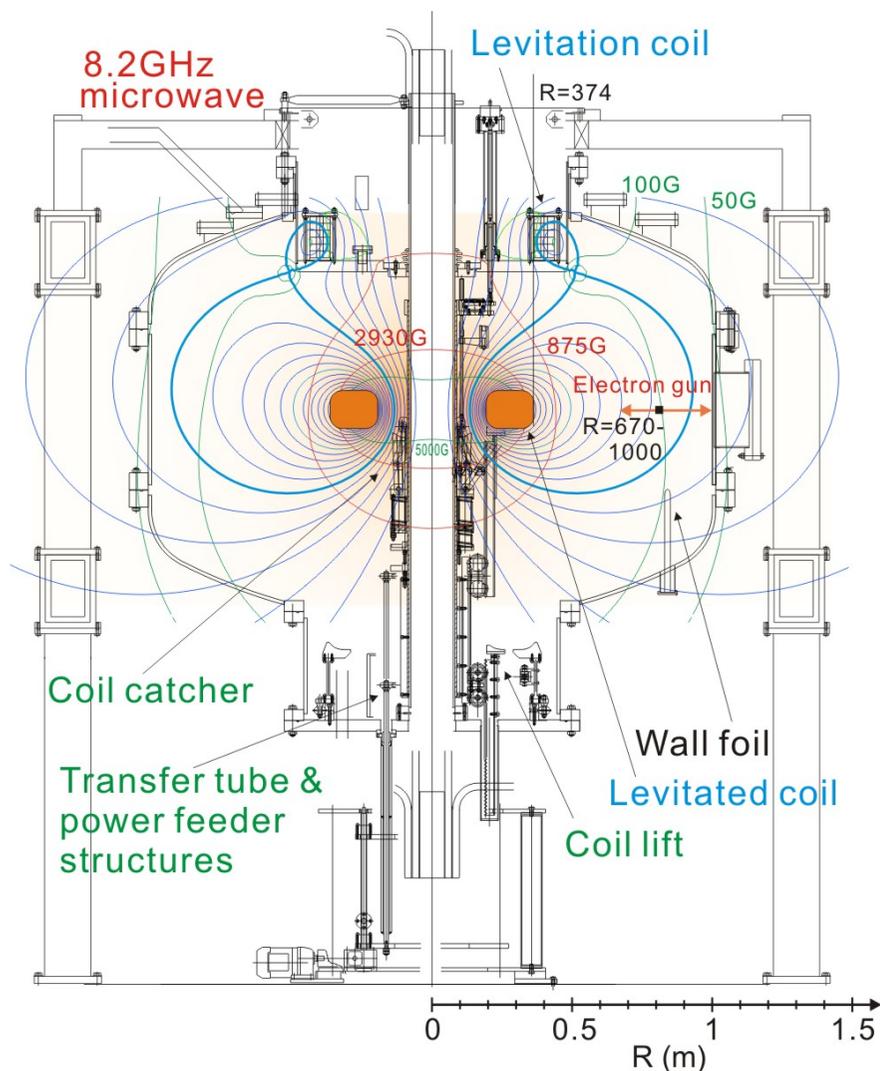
目次

1. 研究背景と発表内容の概要
2. 8.2GHzマイクロ波によるプラズマ生成
3. トロイダル純電子プラズマの閉じ込め
4. まとめと今後の課題

東大新領域, 東大高温プラズマ

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

研究背景と発表内容の概要



超伝導内部導体装置RT-1

Bi-2223高温超電導コイル 116A (250kAT)
マイクロ波源: クライストロン 8.2GHz 100kW

RT-1 (Ring Trap-1):

磁気圏型プラズマ実験装置
超電導コイルを備えた内部導体型装置

- ・流れを持つプラズマの高 β 平衡状態と
- ・反物質を含む各種非中性プラズマ閉じ込め
- ・を目指した基礎研究を進めている。

初期実験の課題は、安定したコイル磁気
浮上運転によるプラズマ性能の向上。

今回の報告内容

- ・RFパワーの上昇($\sim 25\text{kW}$)によりcut off
- ・densityに達したプラズマの各種パラメータ。
(コイル磁気浮上状態でRF入力10kWまで)
- ・磁気浮上の効果によるプラズマ性能改善。
- ・磁気浮上によるトロイダル純電子プラズマ
の閉じ込め改善。

RT-1計測器の配置図

Soft X-ray



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

可視分光

流速, イオン温度
※渡邊将 23pTA-7

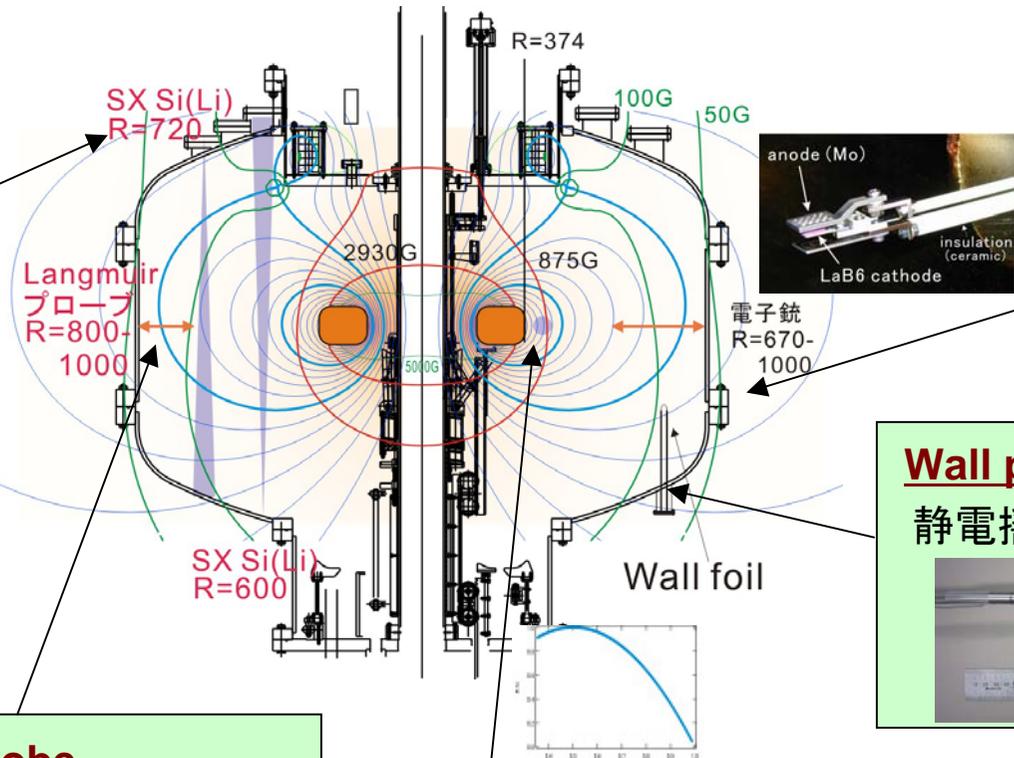
Edge Langmuir probe

- 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

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

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

↓

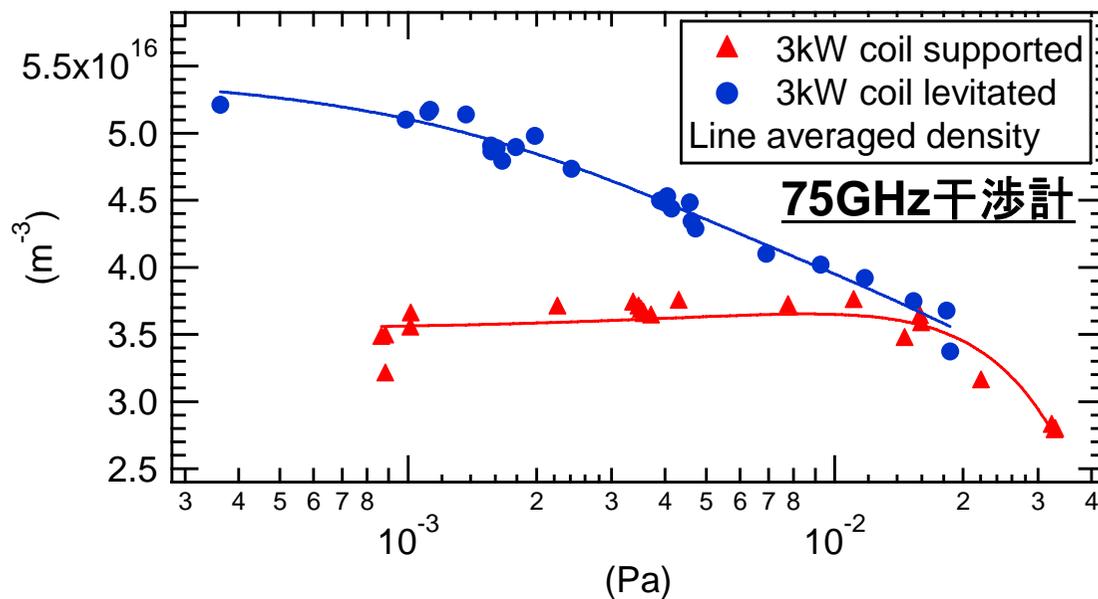
線積分密度とピーク密度は

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

この関係式をピーク電子密度の見積りに使用.



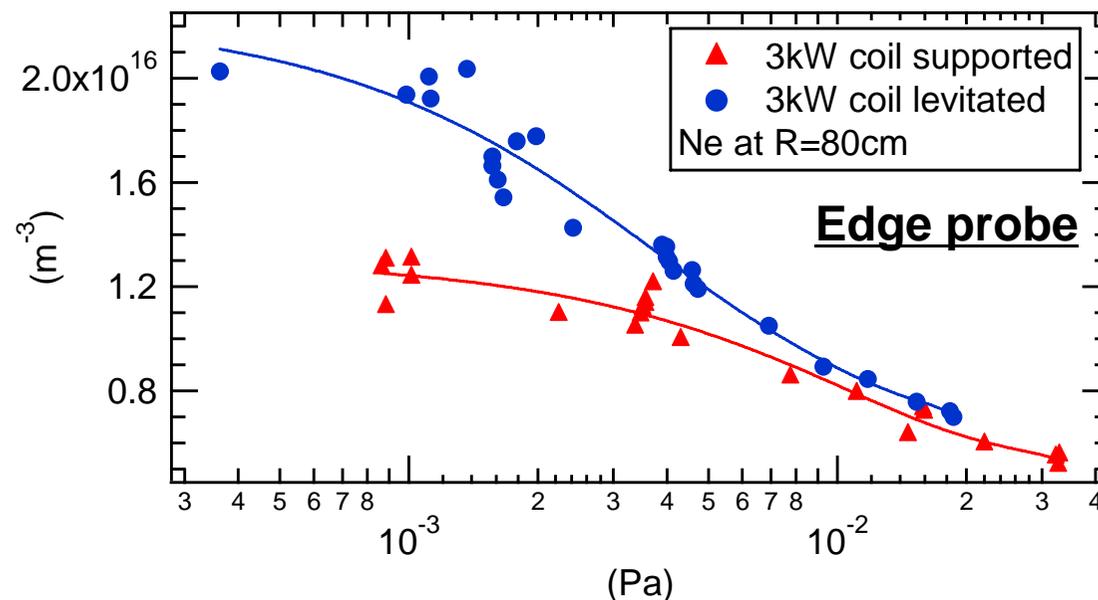
コイル磁気浮上によるプラズマ性能の改善



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。

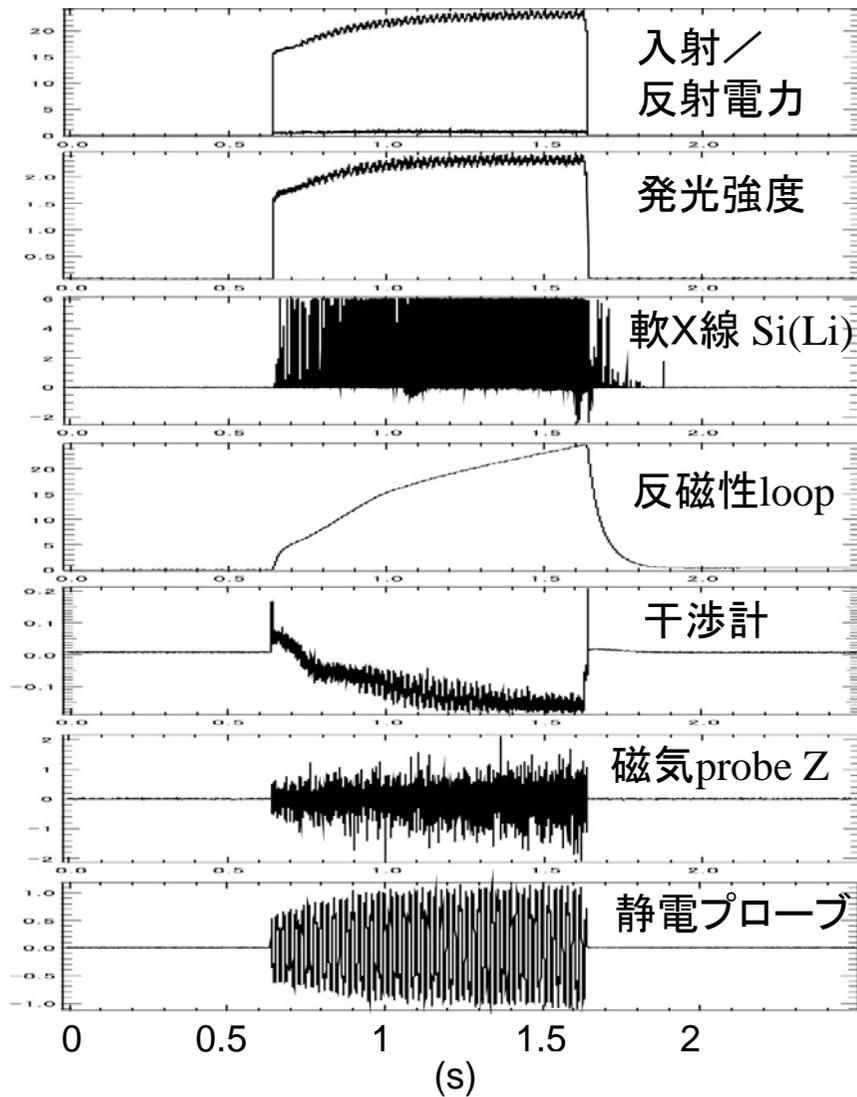
特に、中性粒子との衝突の影響が低減する低ガス低圧域で顕著。(cut off density, $\alpha = 1 \Rightarrow 3.1 \times 10^{-3}$ Pa)



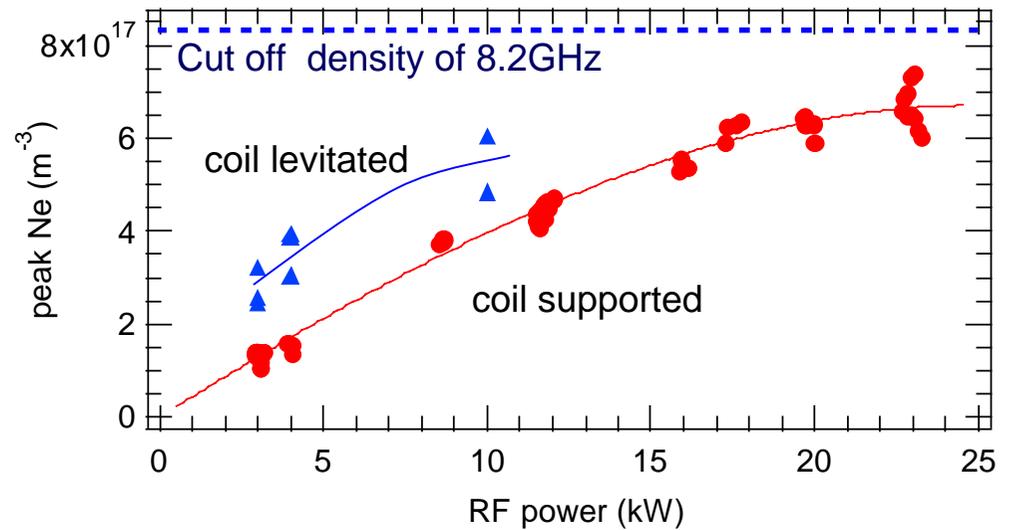
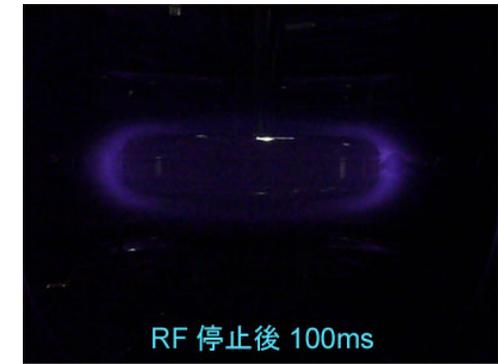
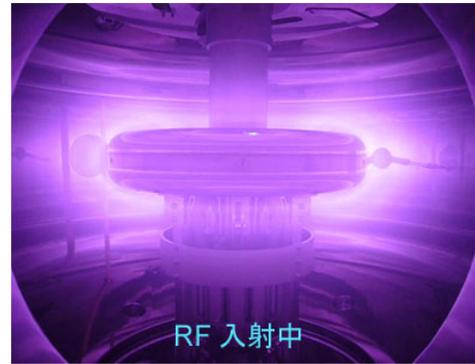
逆に電離度が1%程度以下の弱電離時には、コイル磁気浮上の効果は見られない。

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。

放電典型波形とpeak電子密度



Pf=25kW運転時の典型波形



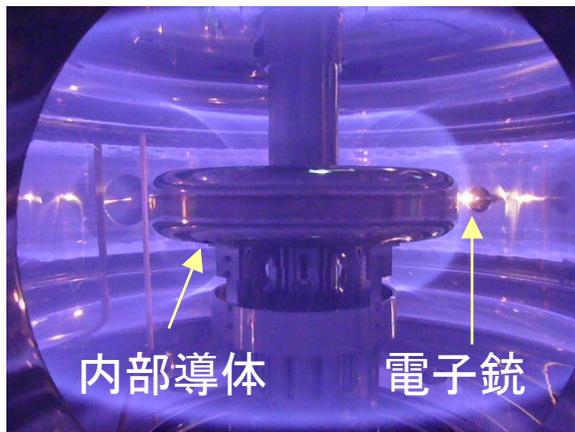
RFパワー23kW時, peak密度は $7 \times 10^{17} \text{m}^{-2}$

密度がやや飽和する傾向が見られ,
8.2GHz cut off densityに近いpeak density
が得られている.

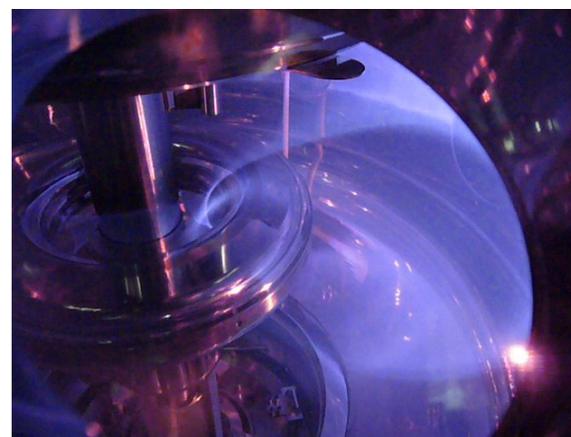
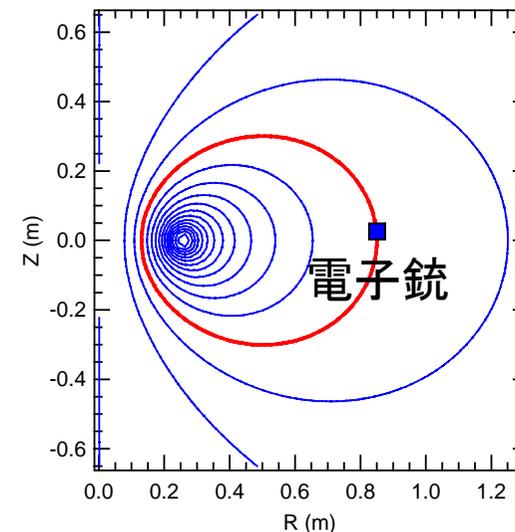
純電子プラズマ： 電子入射による磁気面の可視化

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。
⇒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。

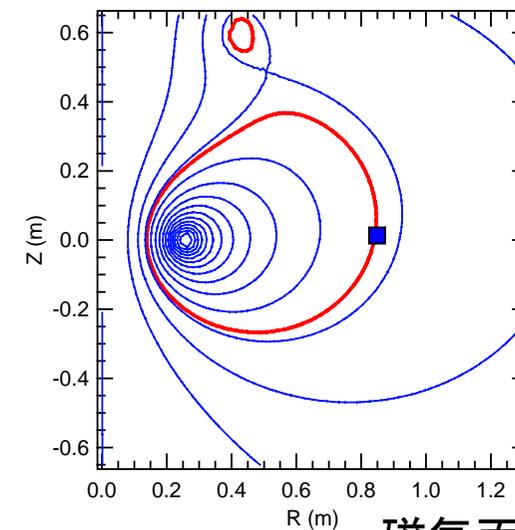
∇B /curvature driftにより電子はトロイダル方向に輸送される。



コイル支持状態(内部導体による純dipole磁場)

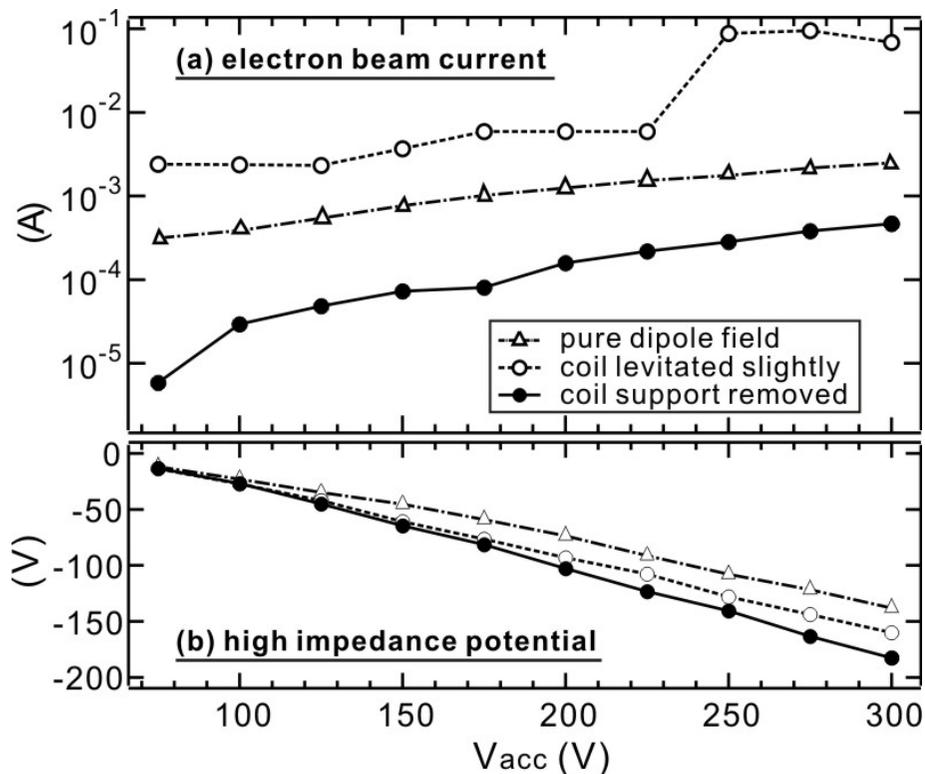


コイル磁気浮上状態(内部導体+浮上コイル磁場)



磁気面計算

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

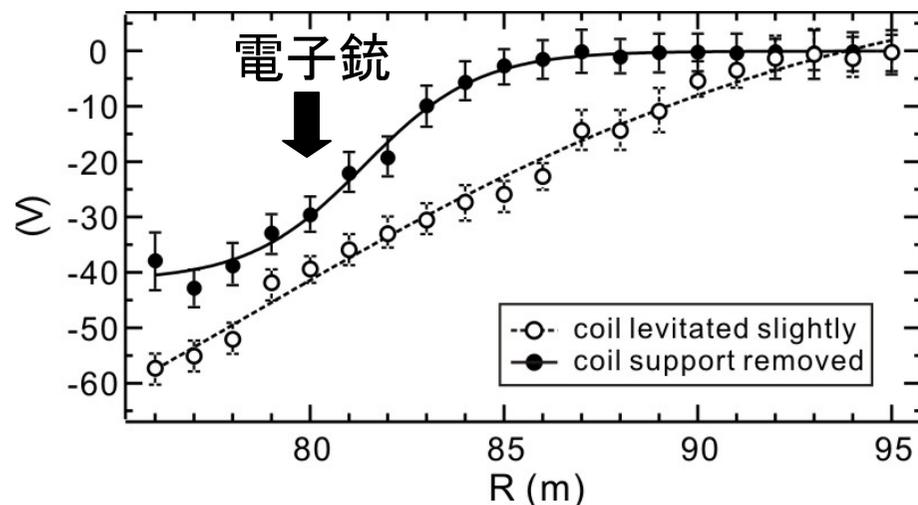
コイル磁気浮上時, 電子ビーム電流はコイル支持状態の1/100に.

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 $a=0.25\text{m}$)

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

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

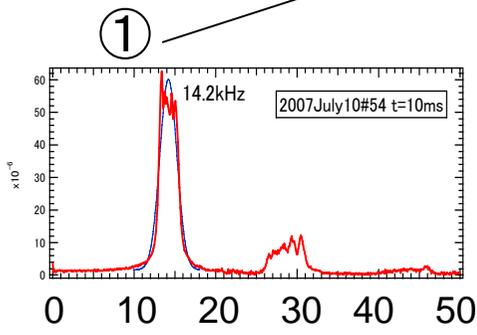
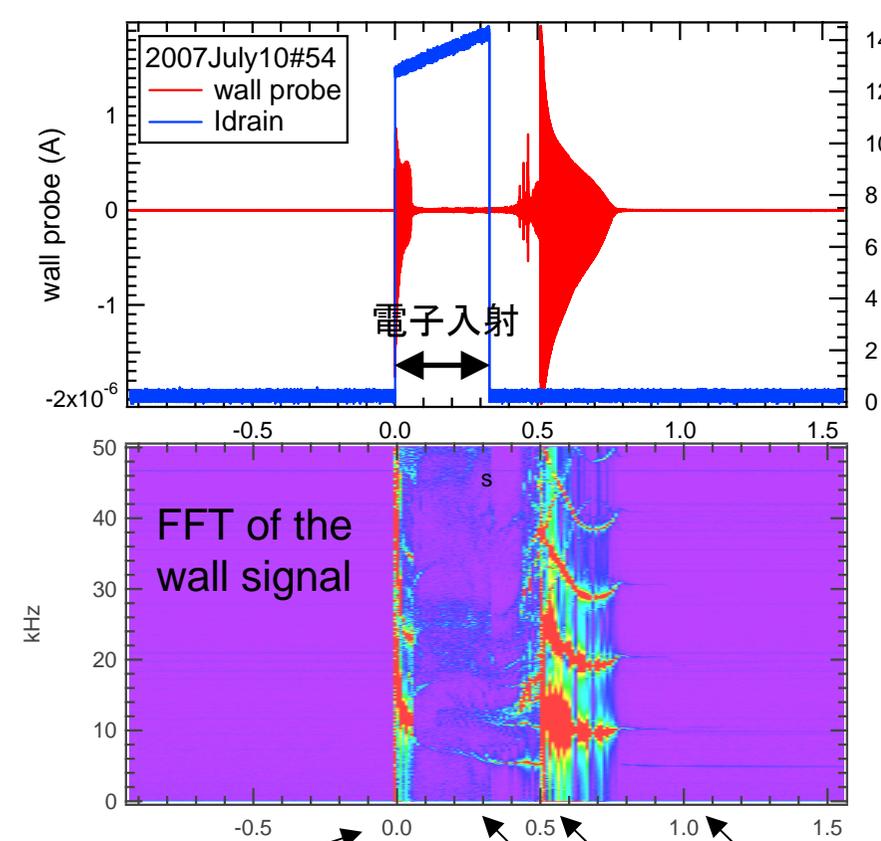


電位分布

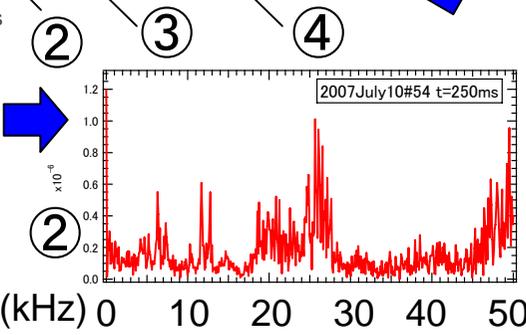
セパトリクス ($R=92\text{cm}$) 内部の閉じ込め領域 ($R=80\text{cm}$) から電子入射:

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.

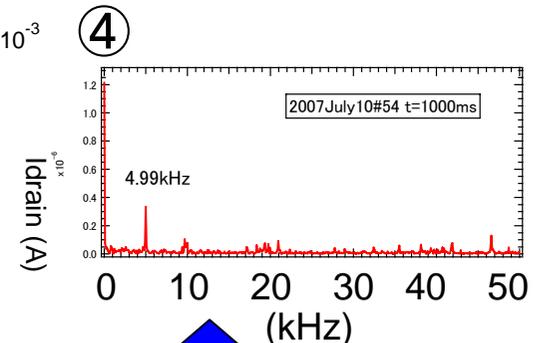
電子入射中～電子銃停止後の静電揺動の典型波形



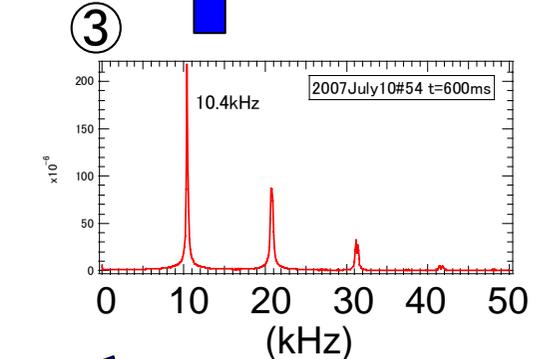
① t=10ms (入射開始直後)
14.2kHzにbroadなpeak.
時間的に減少, 減衰.



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



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.



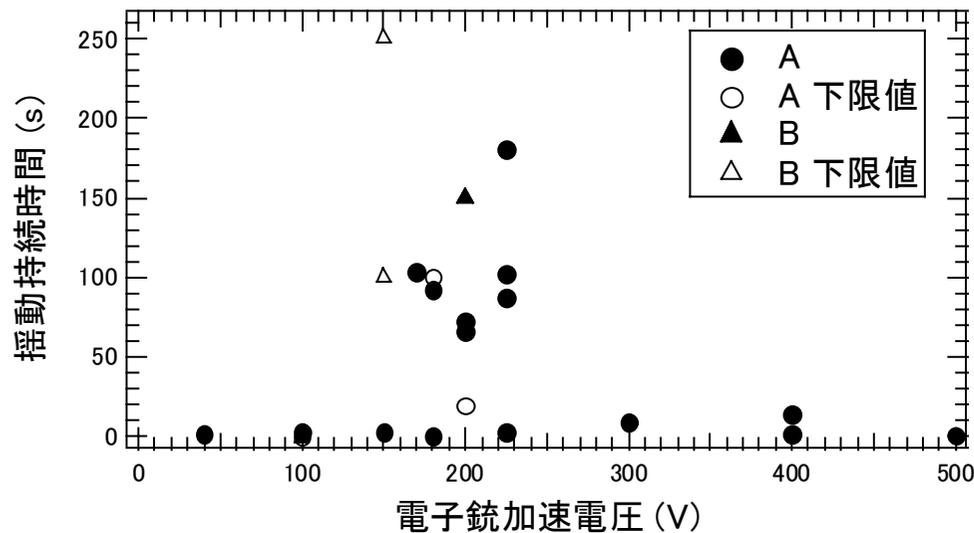
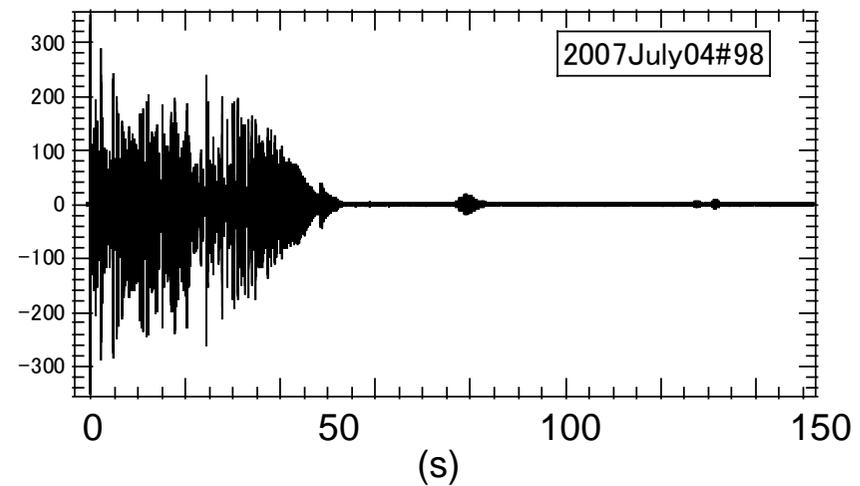
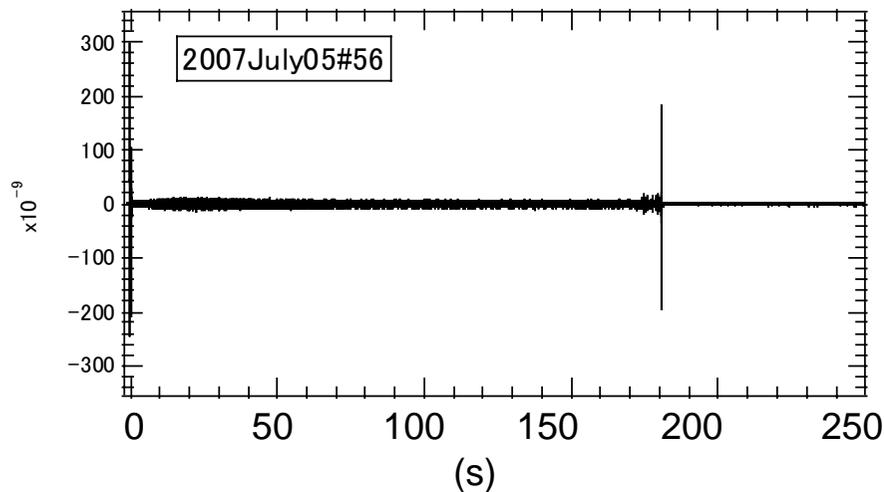
③ t=500ms (不安定性出現)
~6kHzは消え, 周波数が
時間的に減少, 同時に
power低下. 帯域は狭い.

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.

トロイダル電子プラズマの長時間閉じ込め

- ・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.

まとめと今後の課題

RT-1磁気圏型プラズマ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: 入射パワー増大による電子密度の増大.
 - 入射電力の上昇(浮上時10kW, 非浮上時25kWでプラズマ生成)
 - コイル支持状態: $7 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$, 低ガス圧力領域で密度増大.
 - エッジ静電プローブ: $\sim 3 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$, 周辺部では低密度.
 - 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の長時間閉じ込め.
 - コイル磁気浮上による良好な閉じ込めの実現.
- 今後の課題: 高性能プラズマの生成, 流れ場形成
 - 完全浮上状態でのパワー増大, 各種パラメータ取得.
 - 干渉計, probeによる電子密度分布, 新SXによる高Te測定.
 - 電子入射によるプラズマの径電場形成実験.
 - 純電子実験: プローブ多チャンネル化による定量的評価.