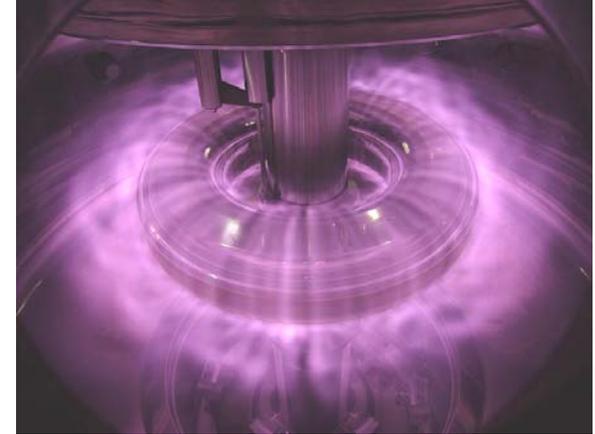


磁気圏型プラズマの超高 β 閉じ込め (反磁性)と内向き輸送(緩和現象)

- 磁気圏型装置RT-1の現状 -

東大新領域

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



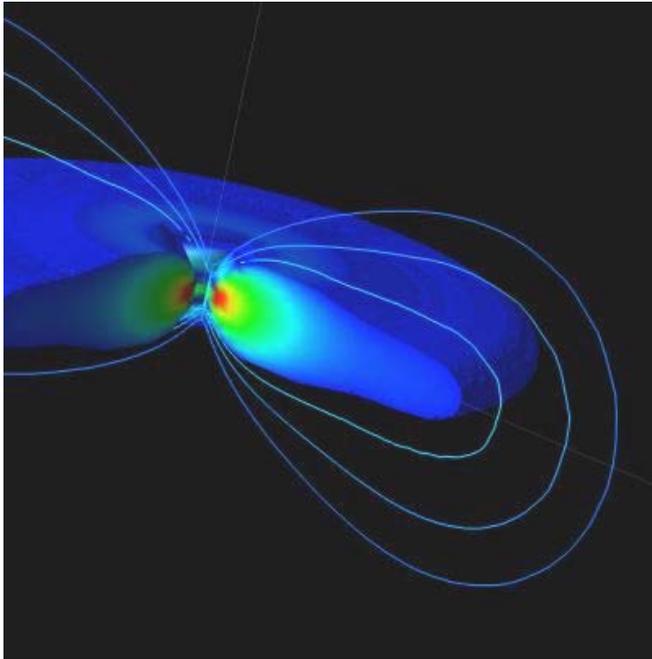
東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

目次

1. はじめに： 磁気圏型配位によるプラズマ閉じ込め
2. 磁気圏型装置RT-1の概要：
超電導磁気浮上コイルシステム，加熱，計測系
3. RT-1プラズマの現状と最近の実験結果
 - コイル磁気浮上によるプラズマの性能向上
 - 高 β プラズマ (local beta~40%) の安定生成
 - 低ガス圧化によるエネルギー閉じ込め時間の増大
 - 高 β 高密度状態への遷移現象
 - 低周波揺動の観測
4. まとめと今後の課題

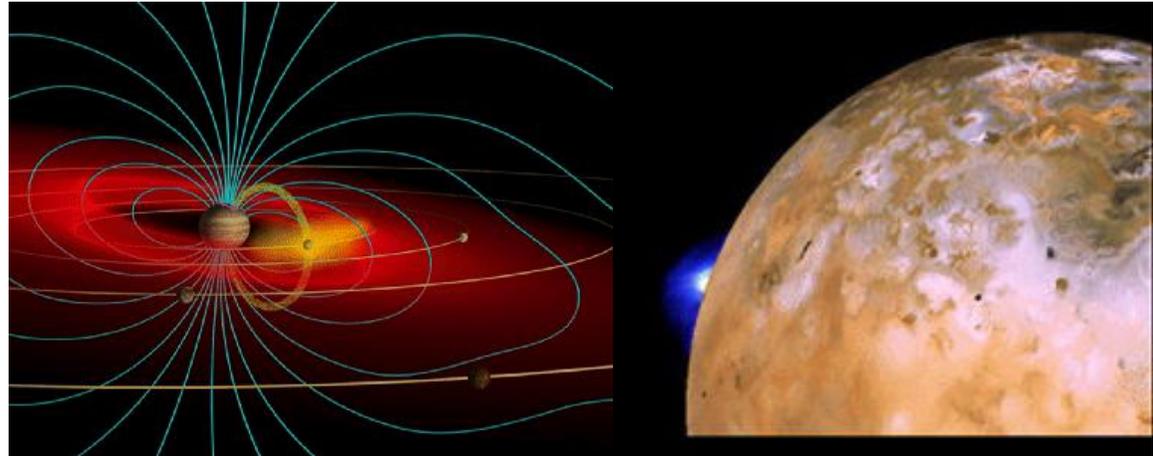
はじめに

木星磁気圏に観測される高速流・高温高密度プラズマ



木星磁気圏に観測される高速流・高 β プラズマの理論シミュレーション例

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



・ 木星磁気圏の高 β プラズマ

- Bad curvatureを含む領域に、 $\beta > 100\%$ の超高 β プラズマが安定に保持されている
- 安定化メカニズム: 圧縮性等の効果が候補
 - A. Hasegawa., *Comm. Plasma Phys. Fusion* 1, 147 (1987).
- 高速流の動圧の効果による高 β の解釈
 - S. M. Mahajan and Z. Yoshida, *PRL* 81, 4863 (1998).
 - Z. Yoshida and S. M. Mahajan, *PRL* 88, 095001 (2002).
- 先進的核融合への応用の可能性

磁気圏型配位によるプラズマ閉じ込め研究

惑星磁気圏を模したdipole磁場配位によるプラズマ実験

- RT (Ring Trap) group 1998- Proto-RT, Mini-RT, RT-1



- 流れの動圧を用いた高 β (double Beltrami平衡)の実現
- 高温超電導コイル, 250kAT
- 2.45, 8.2GHz ECH (25kW)

<研究目的>

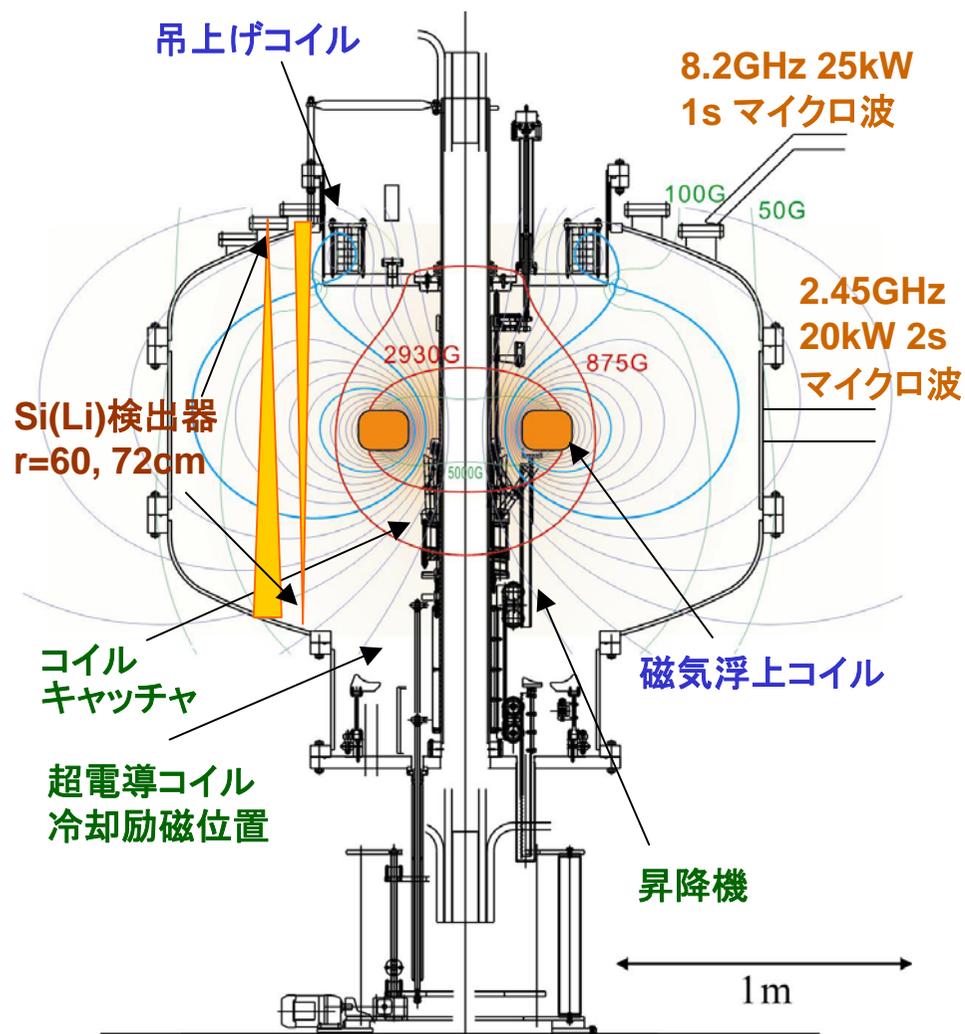
- Advanced-fuel fusionを可能にする高温高 β プラズマの閉じ込め
- 流れを持つプラズマの安定性と動圧による超高 β 平衡状態の探求
- トロイダル非中性プラズマ, 反物質トラップへの応用

- LDX 2004- (Levitated Dipole Experiment), MIT & Columbia Univ.



- 液体He冷却コイル, 1200kAT
- 2.45, 6.4, 10.5GHz ECH (15kW)
- 圧縮性の効果による安定な高 β プラズマ生成を目指している

磁気圏型装置RT-1の超電導コイルシステム



RT-1断面図と超電導コイルの概念図

• 超電導磁気浮上コイル

- Bi-2223高温超電導テープ
- YBCO薄膜による永久電流スイッチ
- 運転温度20-30K, $dT/dt \sim 1K$
- 定格電流250kAT (116A 2160turn)

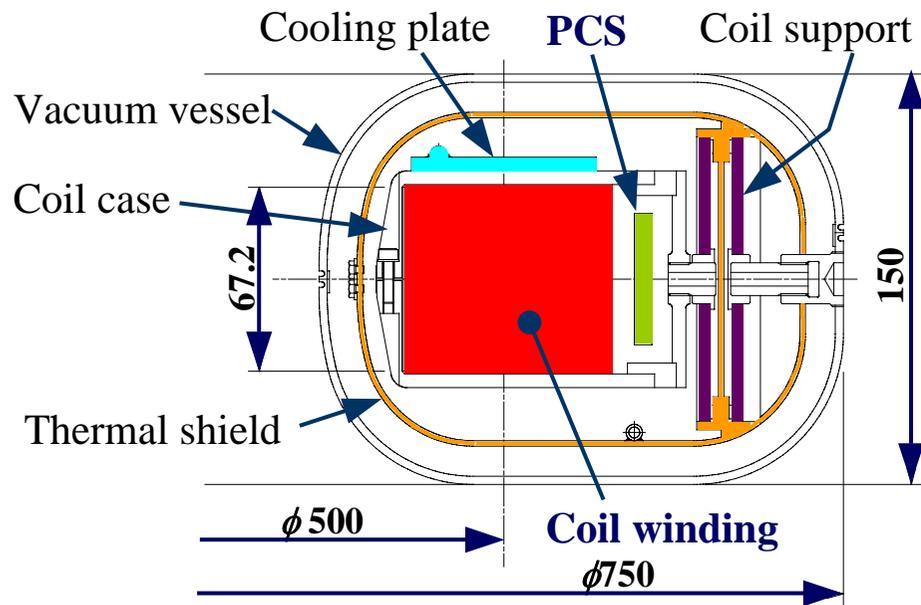
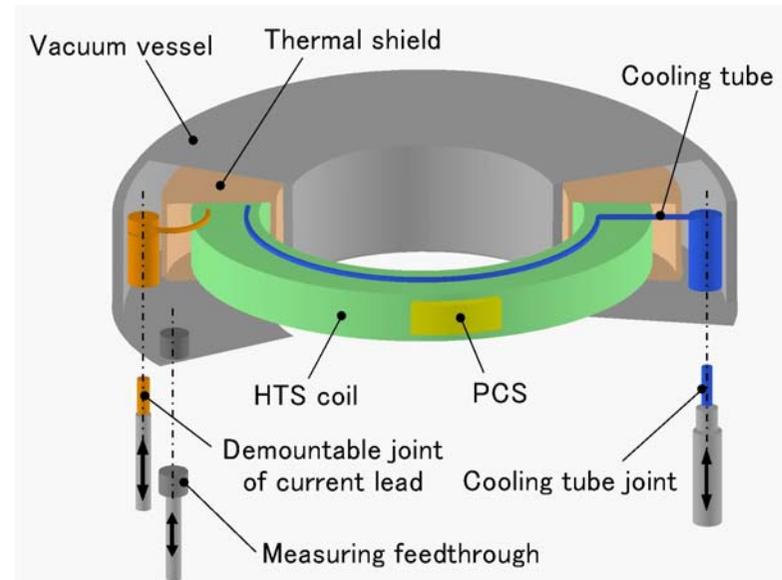
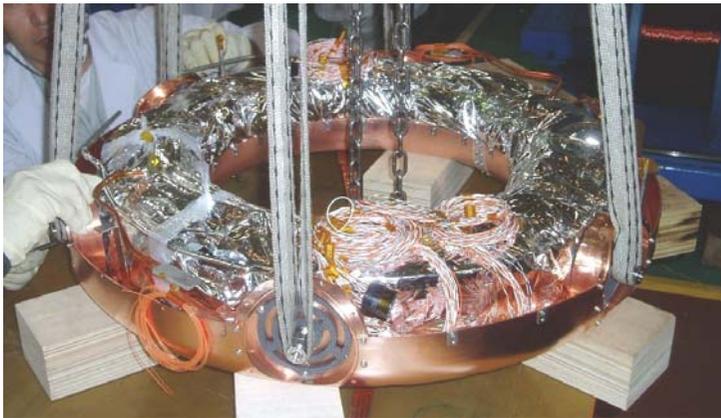
- ・ レーザ変位計による浮上制御
- ・ 地磁気補正コイル
- ・ GM冷凍機(コイル温度15K)
- ・ 真空中で着脱可能な励磁・計測系
- ・ コイル保護機構(キャッチャ)



• 浮上プラズマ実験

- 無冷却での永久電流モード(8時間)
- コイル再冷却5時間(連日運転可能)
- 20 μ m以内のコイル位置制御

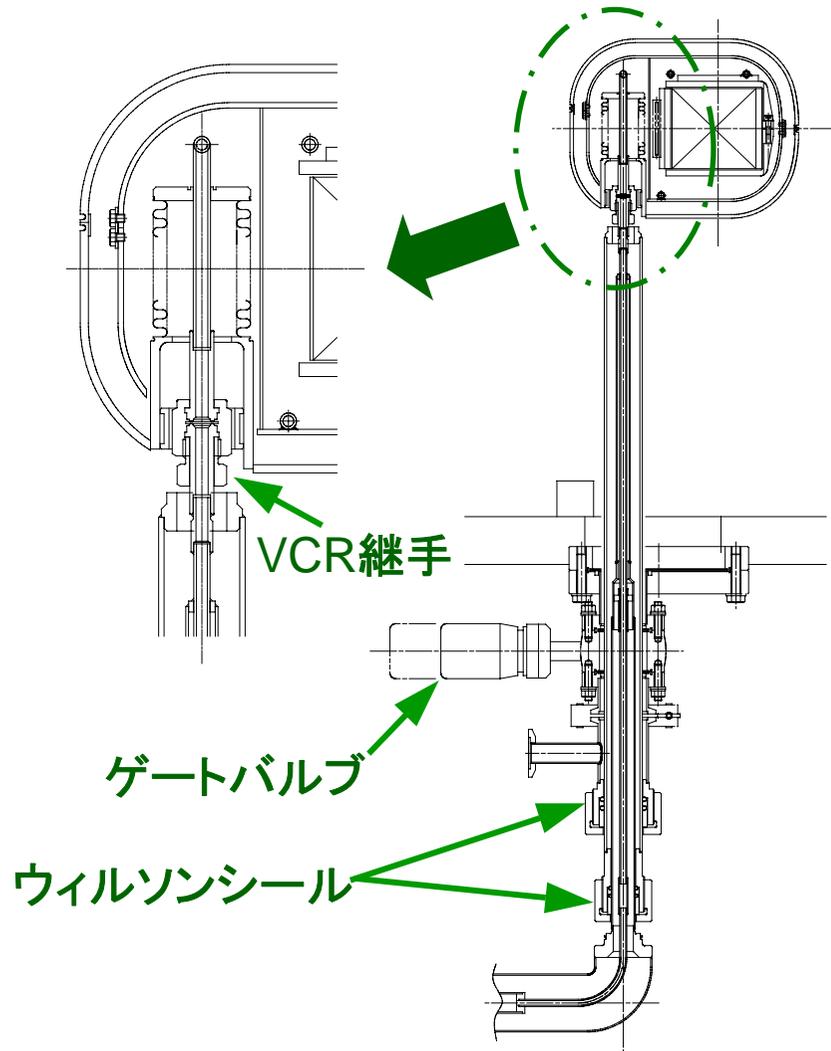
超電導浮上コイルの構造



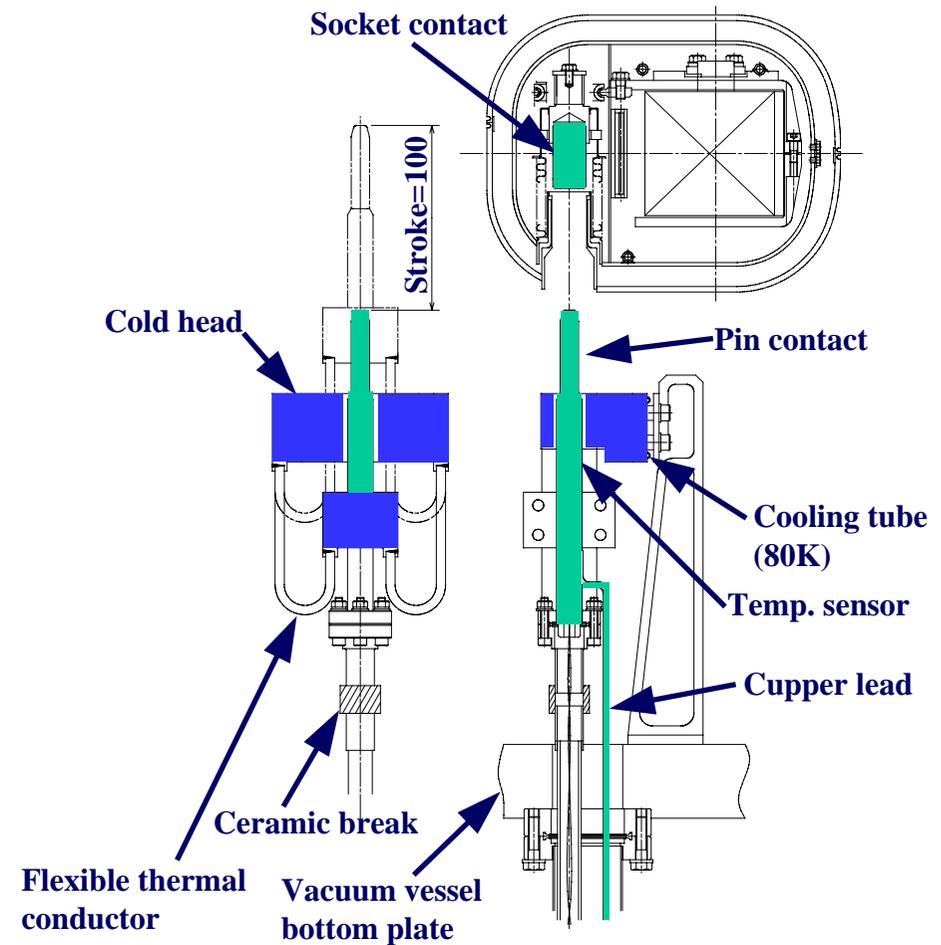
Main Parameters of the Floating HTS Coil

Winding method	Single pancake
Stack number of pancakes	12
Dimension Major diameter	$\phi 500$ mm
Height	67.2 mm
Operating temperature	20~30 K
Magnetomotive force	250 kA
Operating current	115.6 A
Inductance	3.3 H
Stored energy	22 kJ

冷媒導入部と励磁用電流リード部



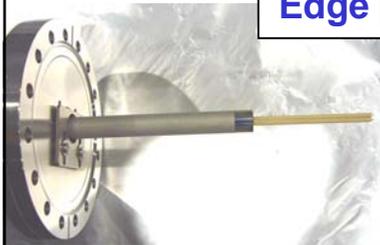
- 着脱式冷媒導入部
 - 金属ガasketを採用し, 真空容器内で着脱を行う.



- 着脱式電流リード
 - ピンコタクトは80Kに冷却し 接触抵抗は0.3mΩ.

RT-1のプラズマ加熱系・計測系

Edge probe



Langmuir probe
R=80cm~100cm
(R=100cm:容器壁)
電子密度, 温度

磁気プローブ

- Flux loops
- magnetic probes

マイクロ波干渉計



75GHz heterodyne方式
電子密度

可視分光

- Ion temperature
- flow velocity (Doppler)
- impurities

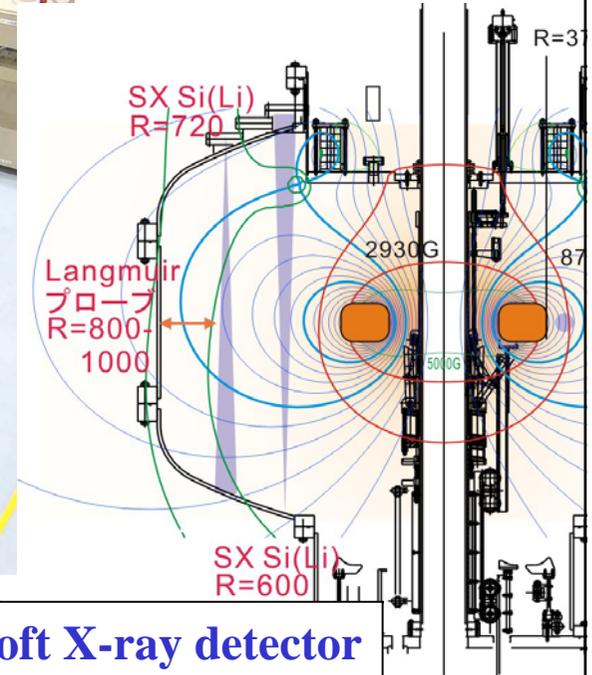
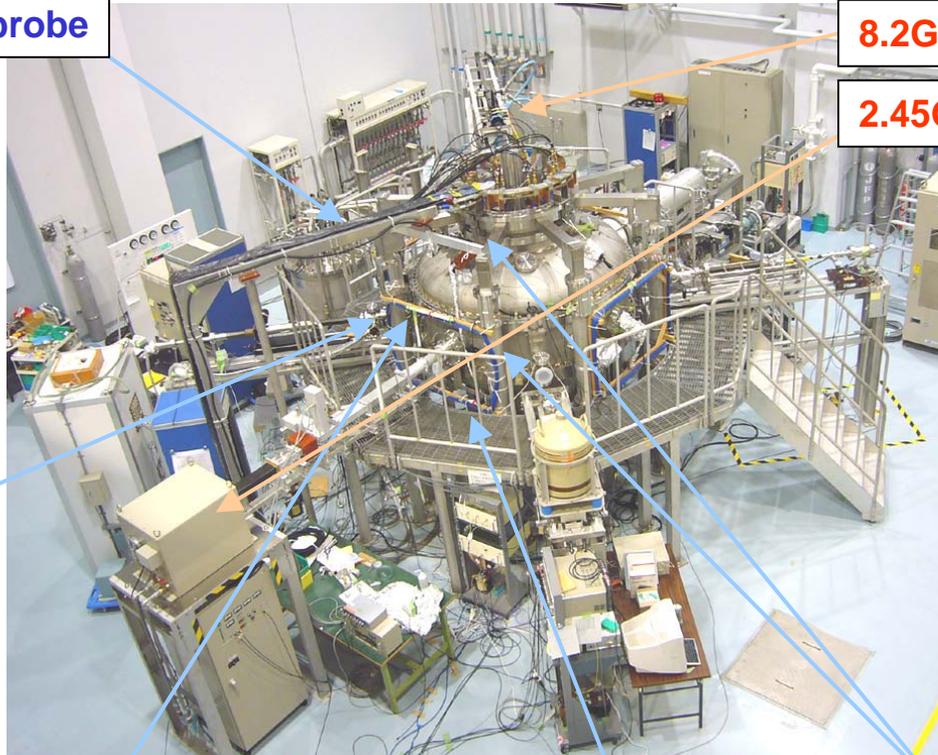
反射計

8.2GHz klystron

100kW(25kW) 1s

2.45GHz magnetron

20kW 2s

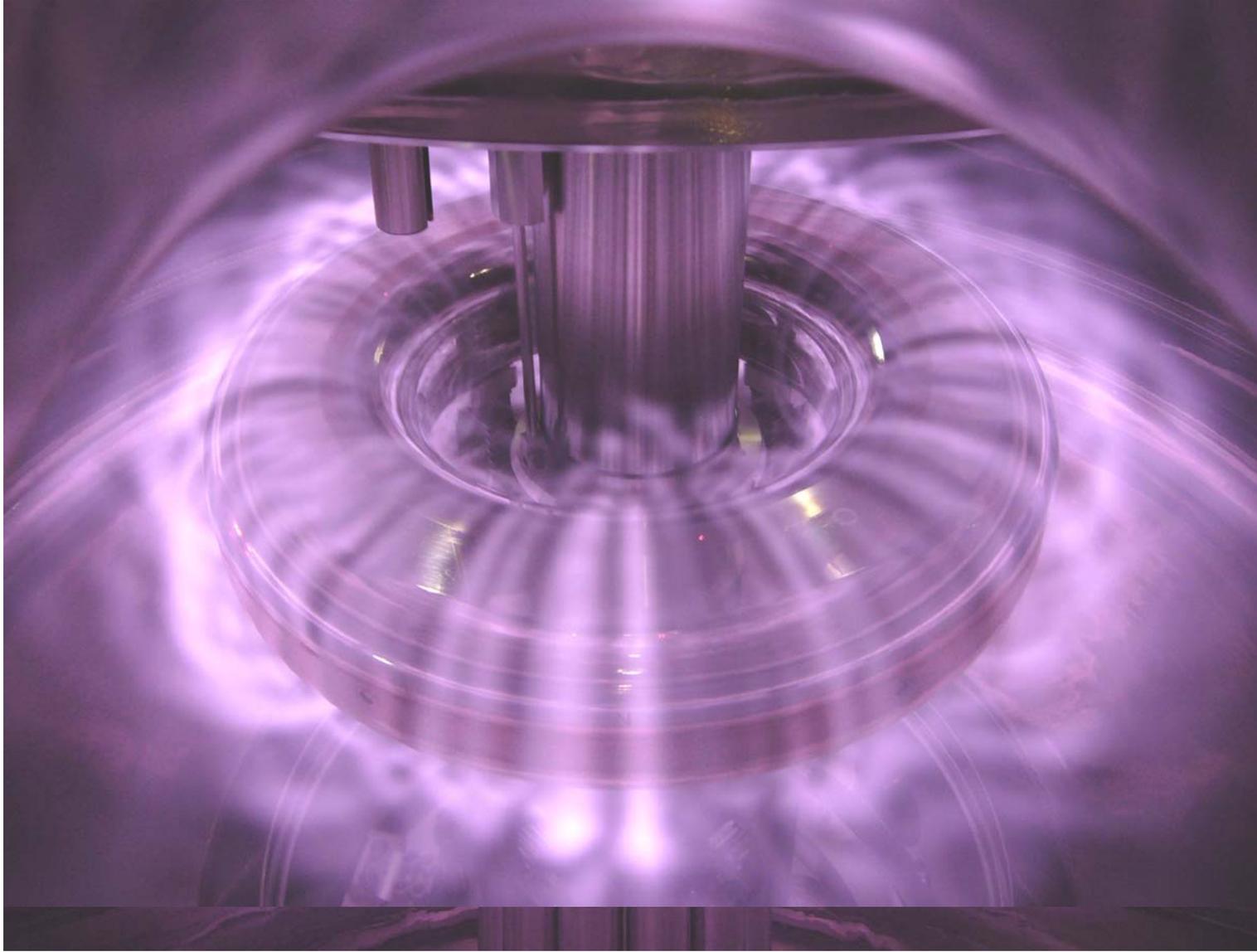


Soft X-ray detector



- cooled Si (Li) detector with 13 μ m Be layer.
- 1-20keV range
- Resolution 165eV.
- pulse height analysis

ECHによる水素プラズマ生成



8.2GHz 1kW 3×10^{-2} Pa

電子入射による磁気面の可視化

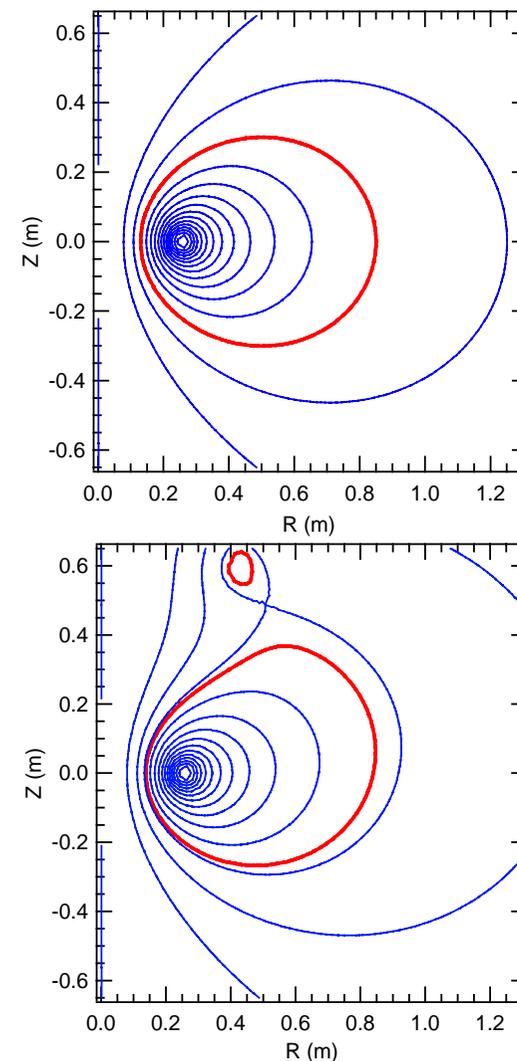
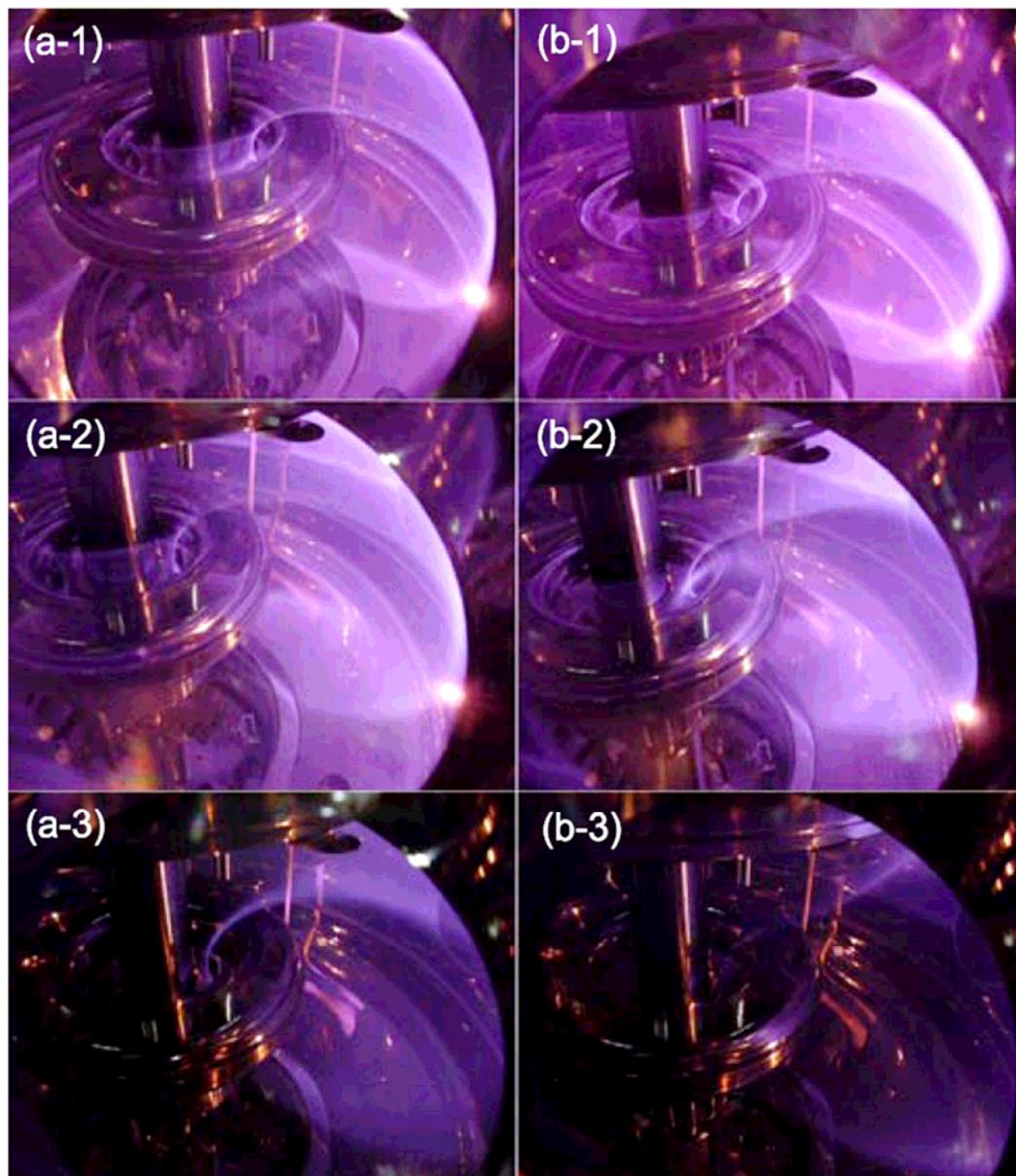
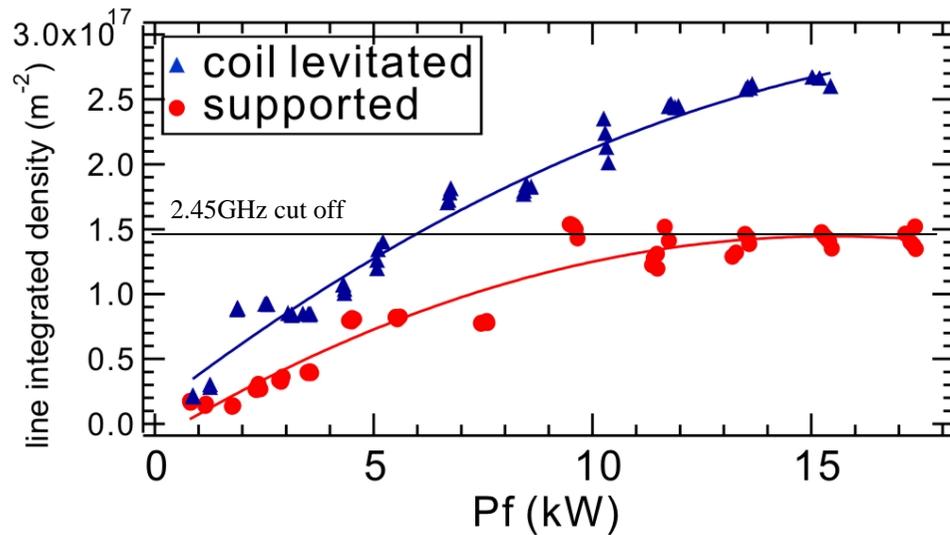


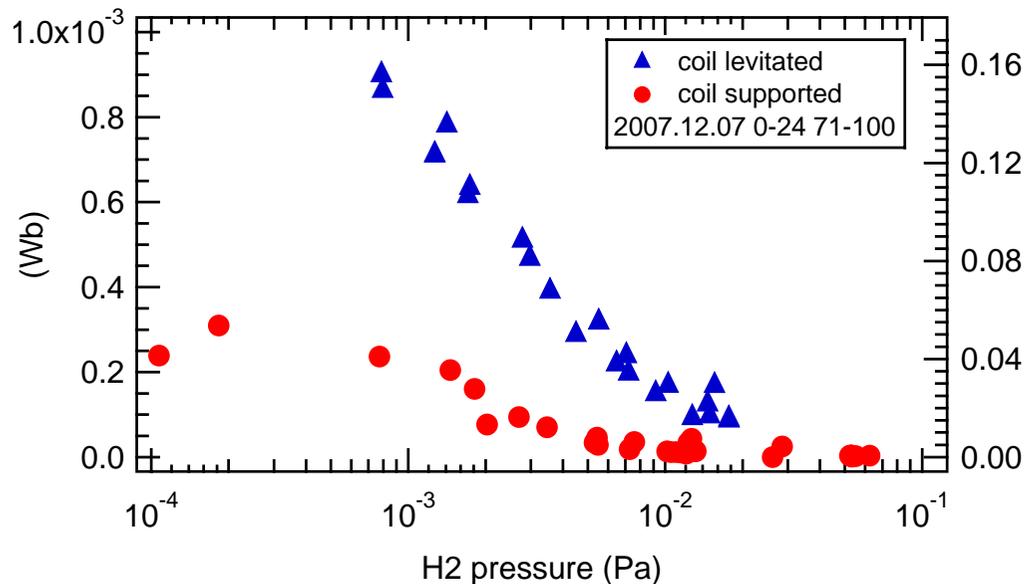
FIG. 3: (Color online) Visualized magnetic surfaces by the injection of electron beam with initial acceleration voltage $V_{\text{acc}} = 500$ V into filled hydrogen gas of pressure 10^{-2} Pa. The coil was (a) mechanically supported (i.e., pure dipole field was applied) and (b) magnetically levitated. Electron gun was located at (1) $r = 70$ cm, (2) $r = 80$ cm, and (3) $r = 90$ cm.

コイル磁気浮上によるプラズマ性能の向上



・電子密度

- 75GHz干渉計による線密度計測.
- コイル磁気浮上の効果により、線密度は2倍程度に増大.
- 最大で、平均密度でO-modeの遮蔽密度を上回る。
(EBWの効果を示唆)

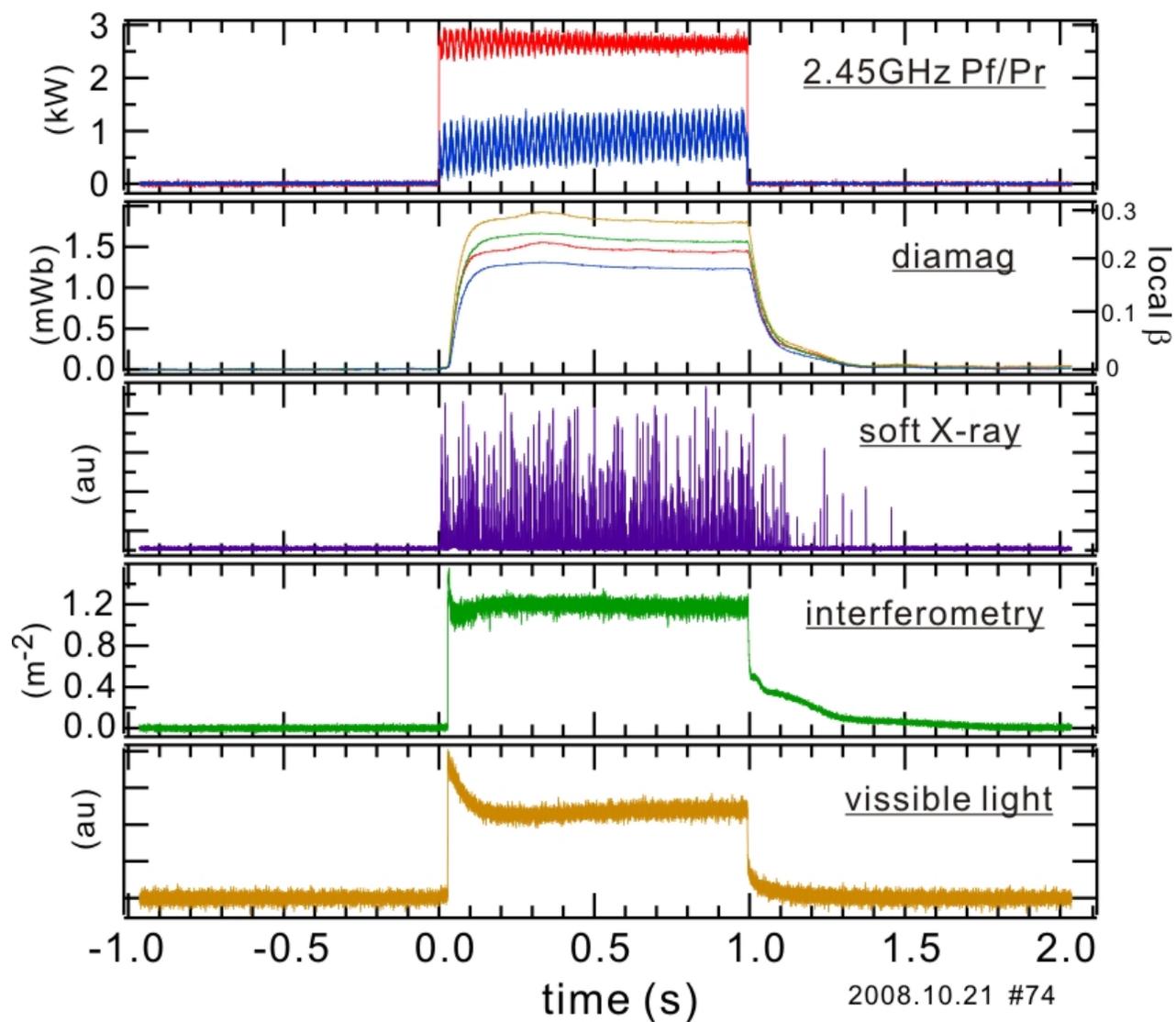


・反磁性信号(β 値)

- 磁気ループ計測.
- 同一条件で3倍程度まで向上.
- プラズマ圧力は、ECHで生成された高エネルギー電子成分が担う。
(軟X線計測結果と矛盾しない)

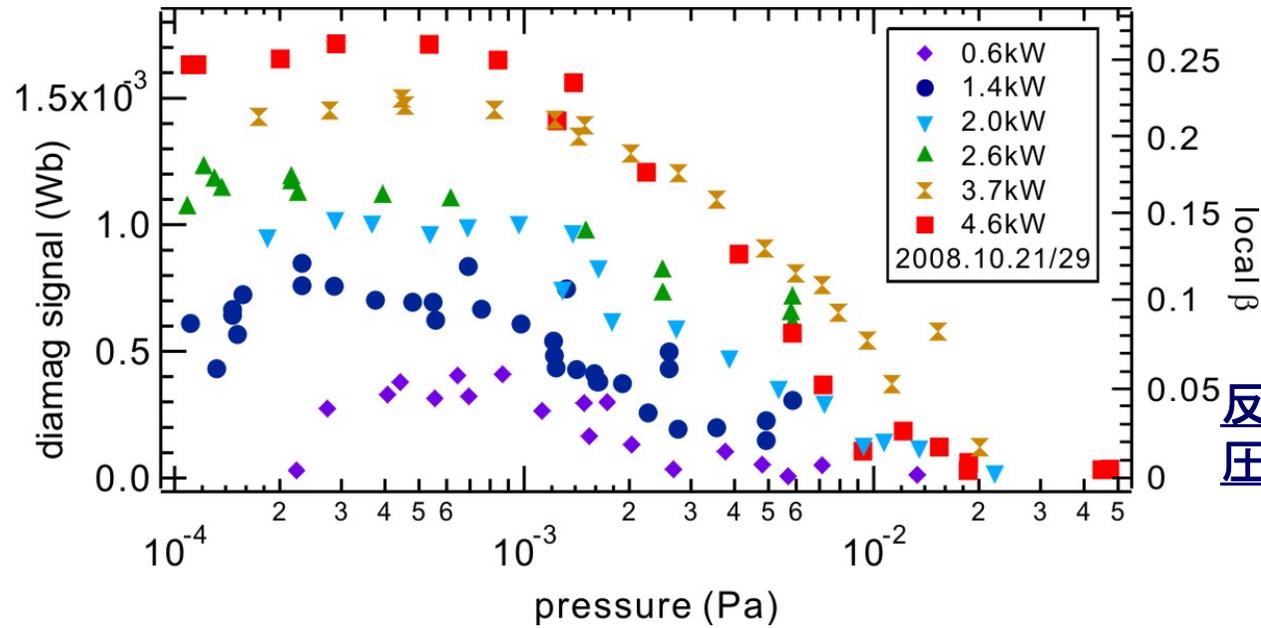
2.45GHz RFによるプラズマ生成時の
電子の線密度と反磁性信号

典型放電波形

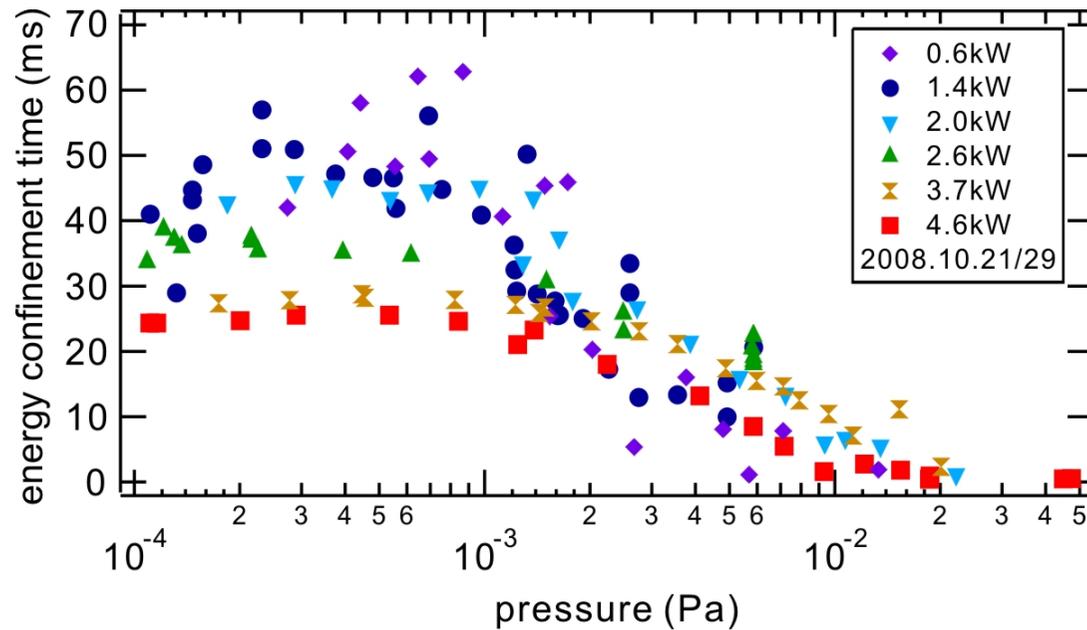


- 封入ガス圧力の低下により、3kW程度のマイクロ波入力により1mWb以上の反磁性信号 ($\beta > 10\%$) が得られる。

エネルギー閉じ込め時間

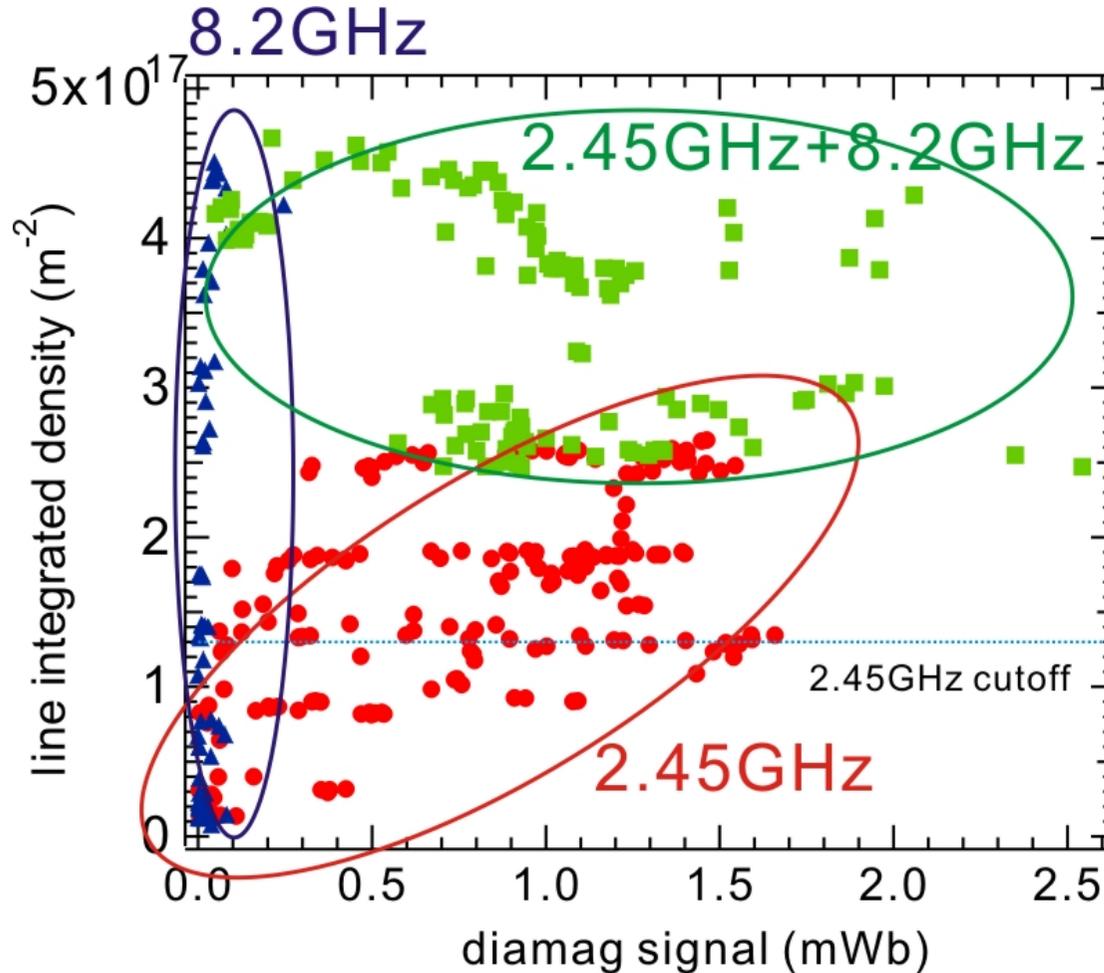


反磁性信号の封入水素ガス
圧力依存性.



プラズマのエネルギー閉じ込め
時間 (stored energy / (Pf - Pr))

RT-1プラズマの典型パラメータ

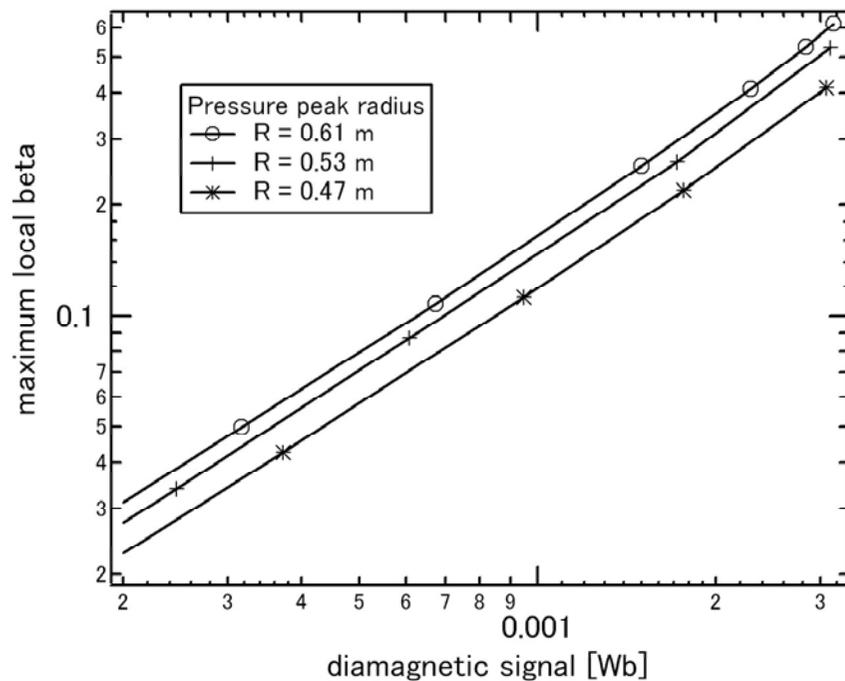


反磁性信号－線密度のプロット

- 遮蔽密度の高い8.2GHzと比較的high- β の得られる2.45GHzの同時入射により, 電子密度 $3 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$, $\beta \sim 30\%$ に達した.

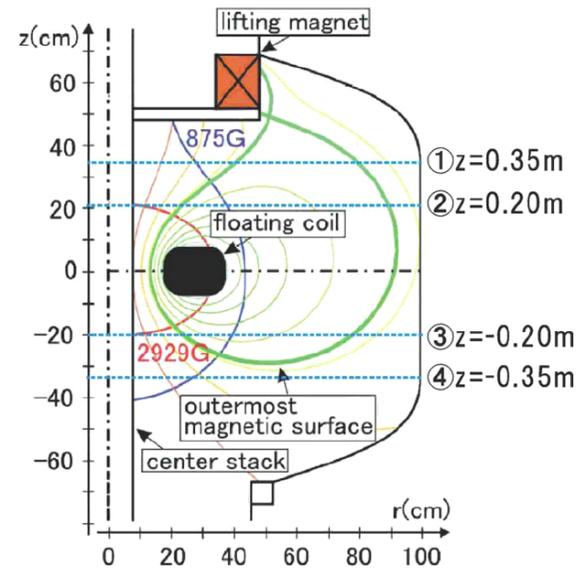
平衡計算：反磁性信号と β 値の対応

Y. Yano, Z. Yoshida, to be published.



反磁性信号と β 値の対応. 3通りの圧力ピーク位置に対する局所 β の値.

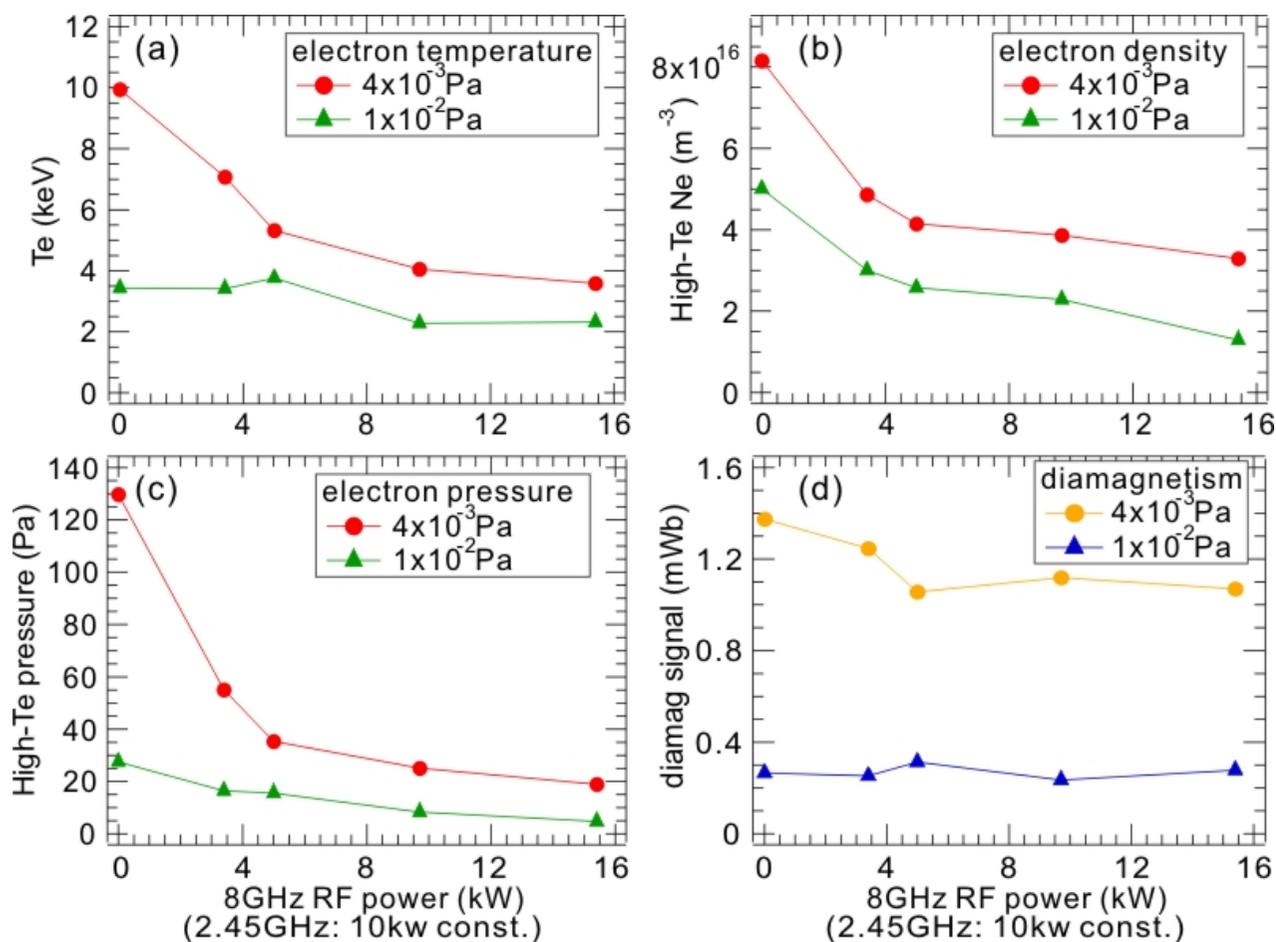
複数ループに対する最も良いフィッティングは, ピーク位置 $r=47\text{cm}$ に対して得られる.



- 磁気ループによるflux計測
- Grad-Shafranov方程式を用いたRT-1プラズマの平衡解析
 - 圧力ピーク位置は $r=50\text{cm}$ 付近
 - 反磁性信号は最大 3mWb
⇒ 局所 $\beta \sim 40\%$ に対応

マイクロ波同時入射時の軟X線と反磁性計測

- 8.2GHzと2.45GHzの同時入射により、比較的高密度 ($\sim 2 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$) かつ大きな反磁性を持つプラズマが生成されている(高エネルギー電子成分による)。
- 軟X線と反磁性信号を比較すると、8.2GHz追加時に、プラズマ密度の上昇に伴い高エネルギー電子成分が減少するが、反磁性信号はほぼ一定を保つ。

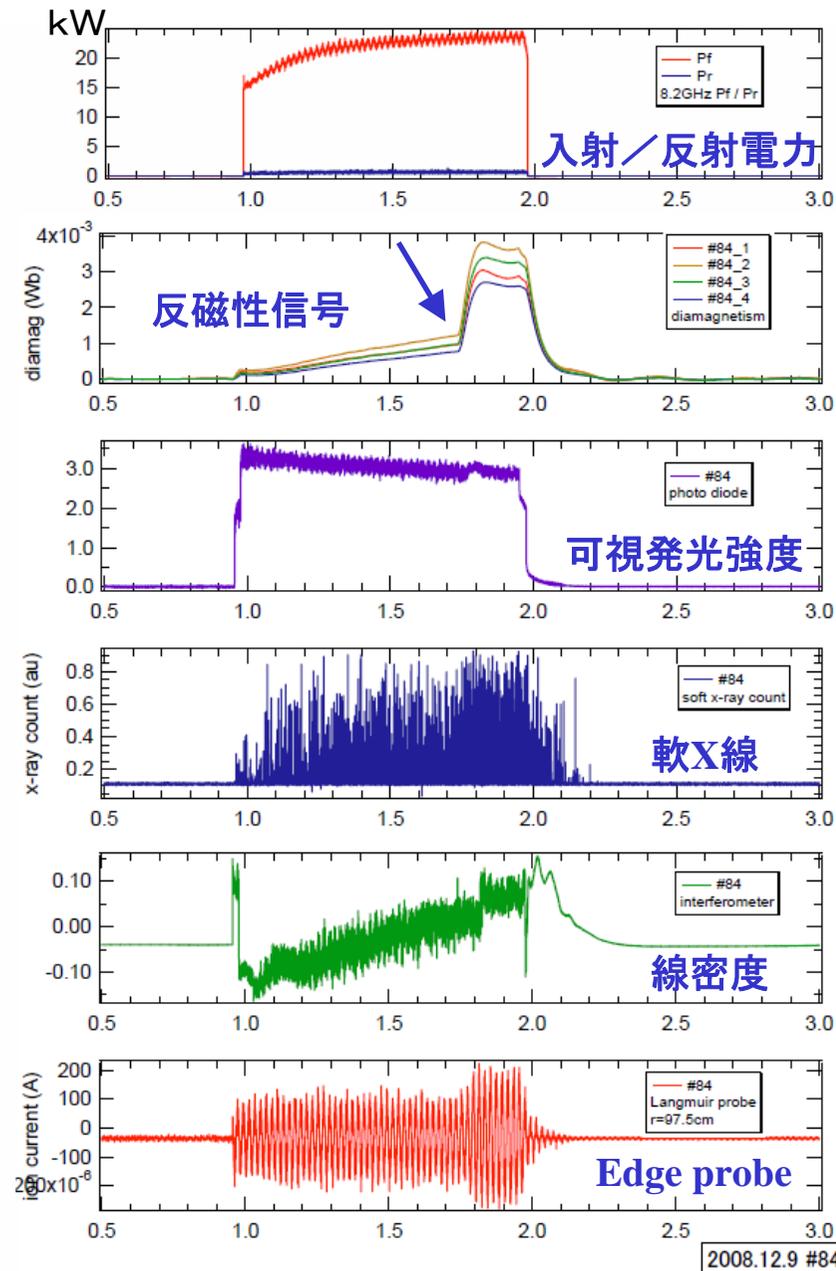


□ ECHにより初期に生成した高エネルギー電子が、より低温成分へと熱化している可能性。

□ 一方で、可視分光計測によれば水素イオン温度は10eV程度以下と放射障壁を超えておらず、バルク成分の加熱には至っていない。

2.45GHz一定で8.2GHz追加。軟X線計測による高エネルギー成分電子の(a)温度, (b)密度 ($Z_{\text{eff}}=1$ とした), (c)圧力と, (d)反磁性計測結果。

高 β 高密度状態への遷移



• 遷移までの経過

- 遷移前, 高ガス圧時にdiamag信号が小さく, 立ち上がりに遅れが生じる.
- この状態でマイクロ波入射を続けると, 反磁性信号が2倍程度に上昇する等のジャンプが観測される.

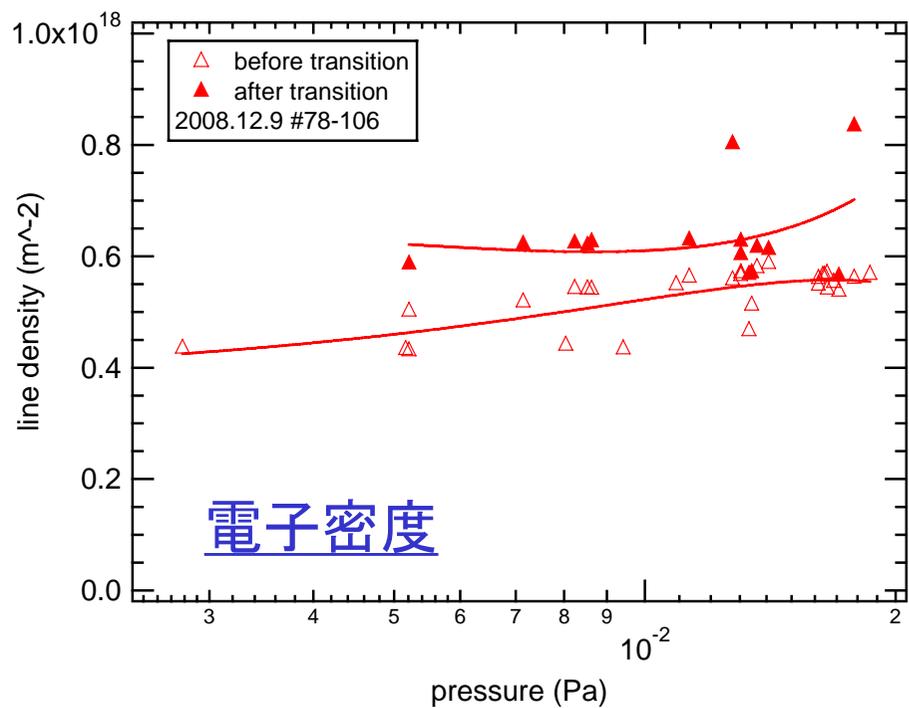
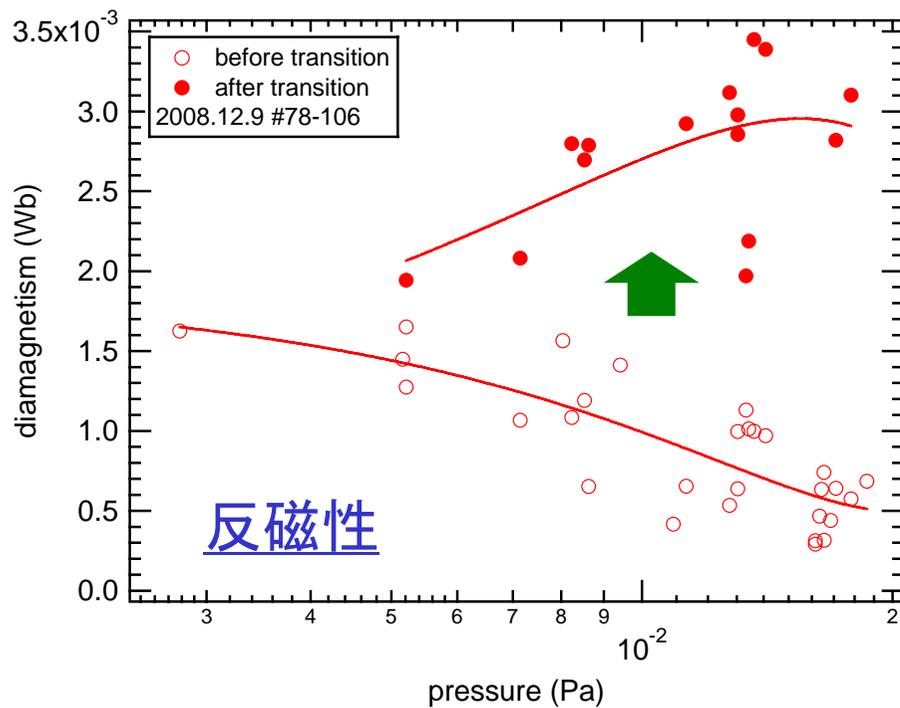
• 遷移の特徴

- diamag信号(\sim local β)が2倍程度増大.
- 電子密度は数割程度増大.
- 発光強度と揺動には大きな変化は観測されない.

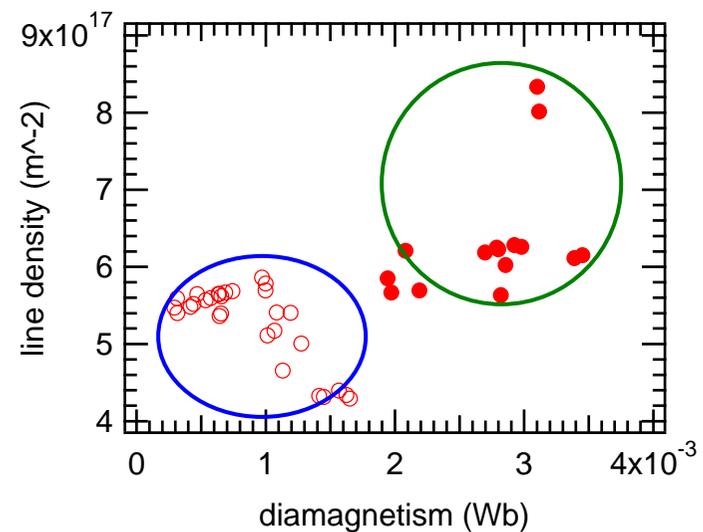
• 遷移の現れる条件

- $P_f > \sim 20$ kW以上 (8.2GHz)
- 5×10^{-3} Pa以上の高い封入ガス圧

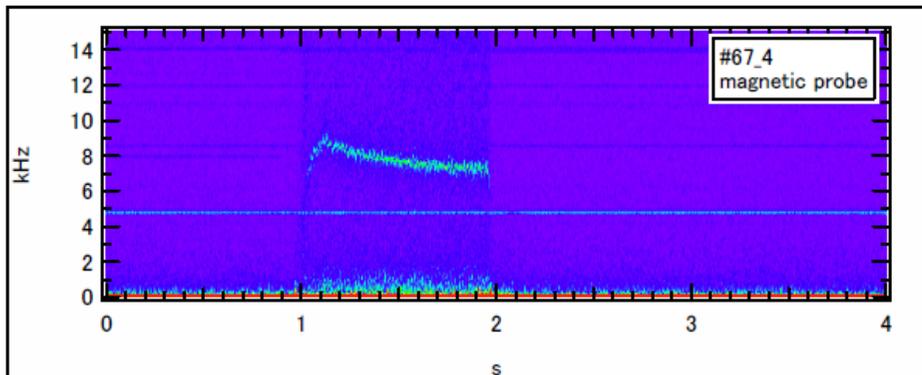
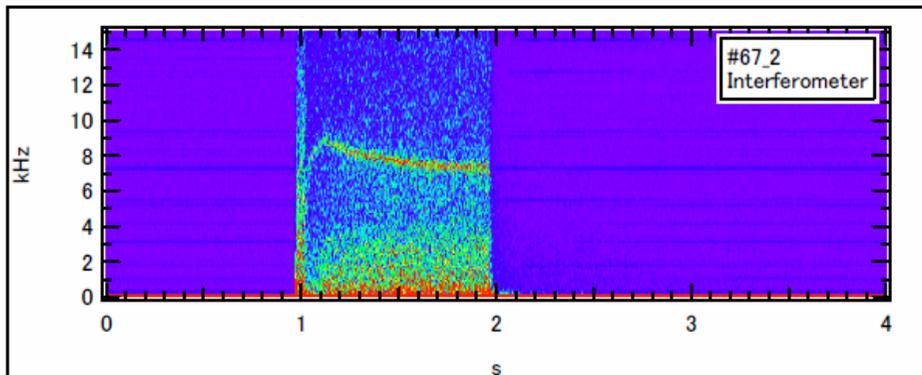
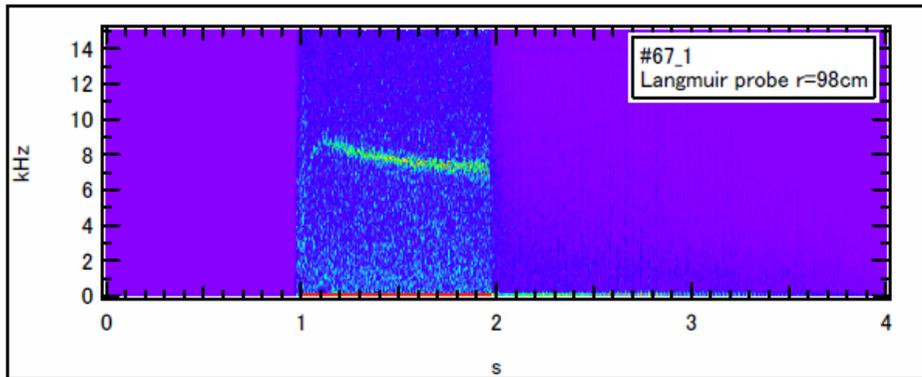
遷移前後の反磁性信号と線密度



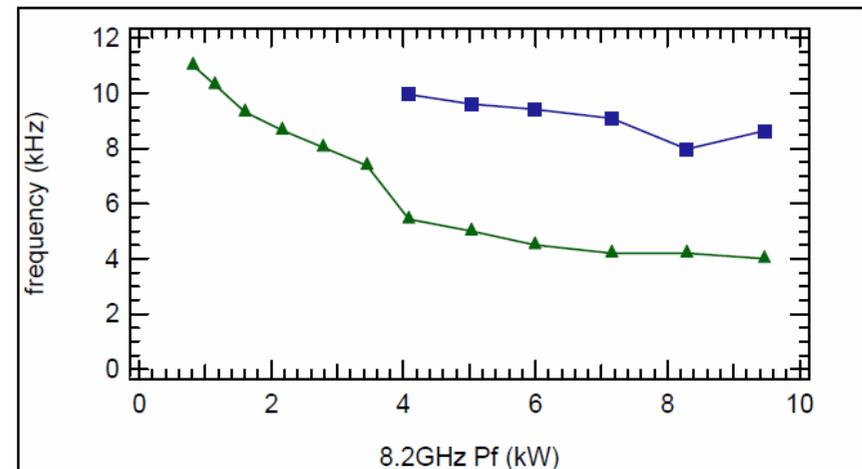
- 高ガス圧側で、高温高密度に分岐を生じる。



低周波揺動の観測

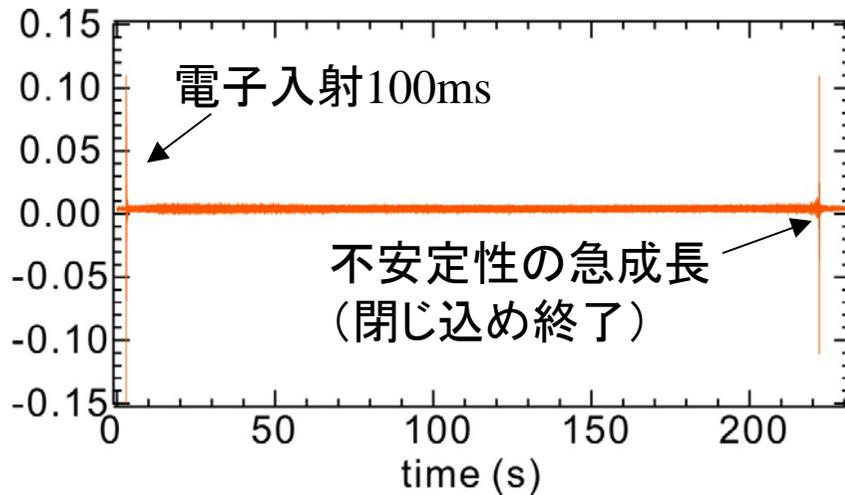
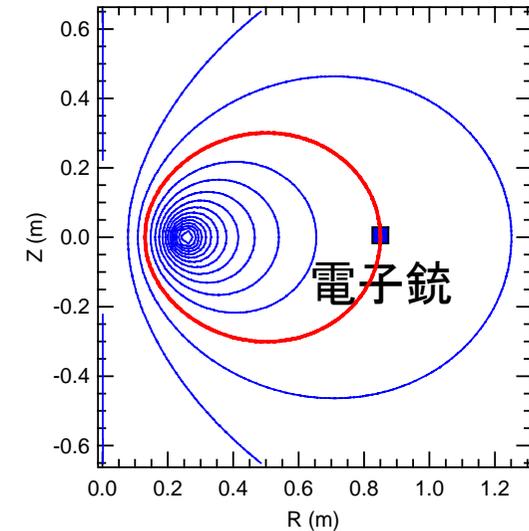
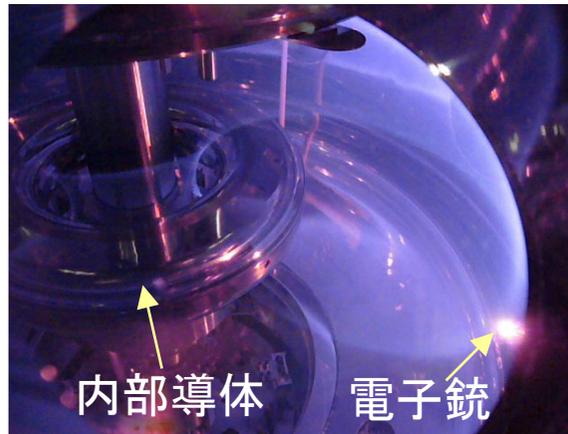
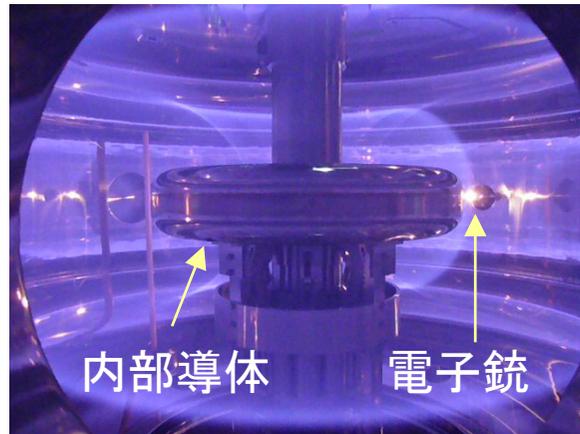


- ・ 低密度時に観測される揺動
 - 静電プローブ, 磁気プローブともに同一周波数の揺動.
 - 電子密度の上昇により周波数は減少し, 強度は低下する.
(高 β 時には観測されない)

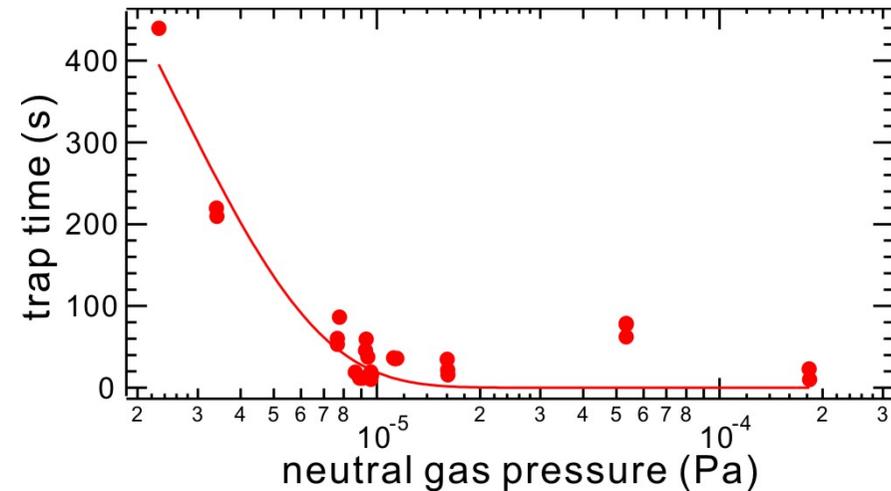


エッジプローブ, 干渉計, 磁気プローブによる揺動と周波数のPf依存

電子プラズマの長時間閉じ込め



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.

- 周辺部からの電子入射にもかかわらず、電子プラズマは電子銃と干渉しない領域まで輸送され、良好な閉じ込めを示す.

まとめと今後の課題

- 磁気圏型装置RT-1では、コイル磁気浮上法や地磁気補正等を含む運転シナリオを確立し、磁気圏型配位で高 β プラズマの安定生成に成功している。
- 生成したプラズマの特性は以下の通り：
 - 電子密度 $5 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$, local β は最大で40%程度に達した。
 - プラズマ圧力を担うのはECHによる高エネルギー電子成分 ($\sim 10^{17} \text{m}^{-3}$, 10keV程度, 割合は向上中)である。
 - プラズマは安定に生成され、高 β 化に伴う揺動モードや顕著な不安定性の増大は観測されていない。
 - 高ガス圧時に、高 β 高密度状態への遷移現象が観測された。
 - 比較的低密度の際、低周波の電磁揺動が観測されている。
- β 上限の検証, イオンの加熱, 流れの駆動が今後の課題。