

# RT-1におけるプラズマ中の 空間電位計測と流れ駆動実験

東大新領域, 高温プラズマ研究センター

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, 林裕之

- 目次
1. 研究の背景と概要
  2. 磁気圏型プラズマ実験装置RT-1
  3. 2.45GHz及び8.2GHz ECHによるプラズマの高性能化
  4. まとめと今後の課題



東京大学  
THE UNIVERSITY OF TOKYO

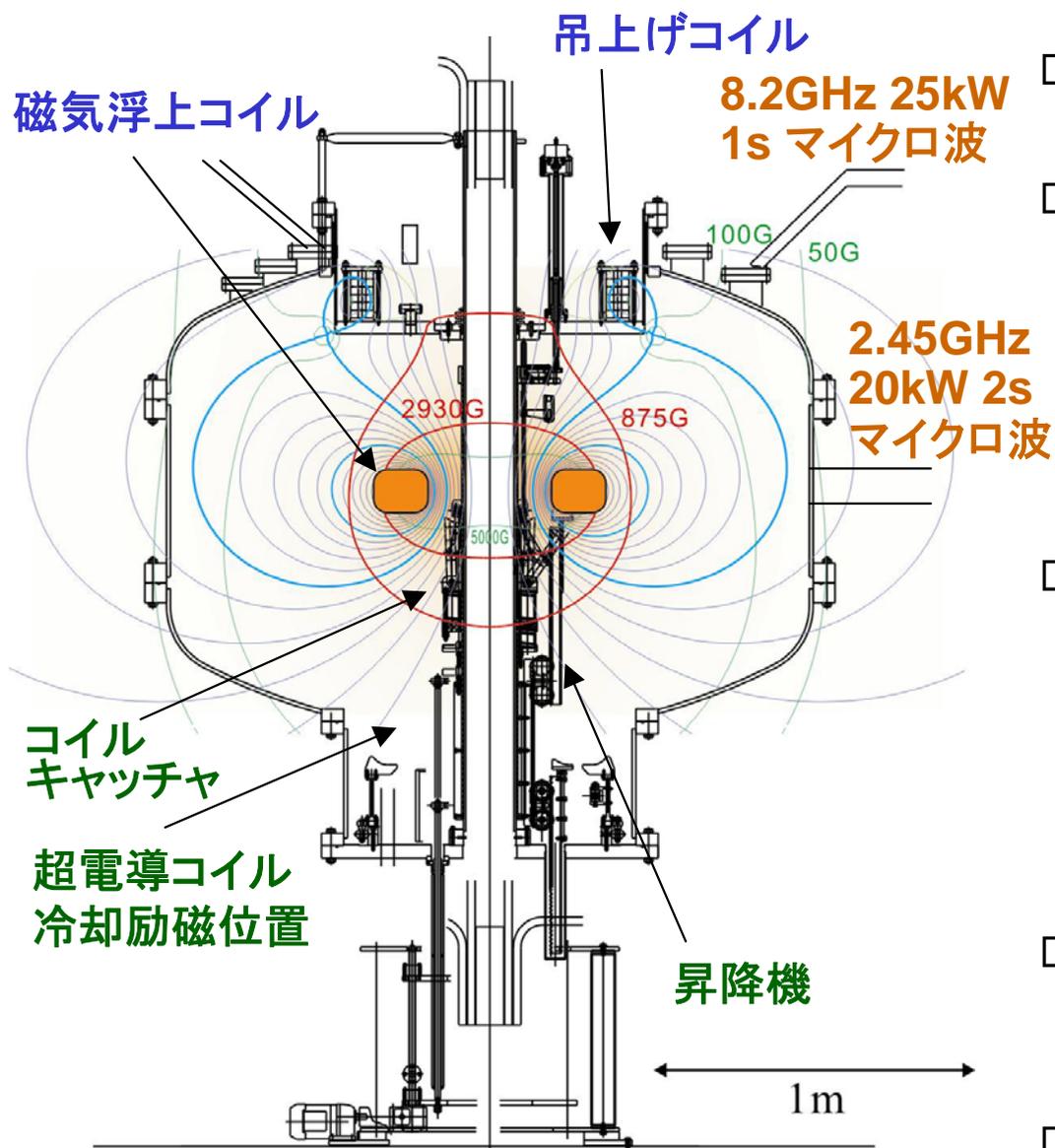
# 研究背景と本研究の概要

- RT-1では、電場形成実験に先立ちコイル磁気浮上状態でのプラズマの高性能化を目指す研究を進めている。従来より行ってきた8.2GHzに加え、2.45GHz 20kWマイクロ波によるプラズマ生成実験を開始した。
- 8.2GHzでは、2930Gの共鳴面が内部導体コイルを横切る位置関係にあり、この時放電中に硬X線が発生し、プラズマパラメータは比較的低密度、低 $\beta$ （線平均密度は $3 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$ 、反磁性信号 $600 \mu\text{Wb}$ )に留まっている。
- 本研究で使用した2.45GHzでは、共鳴層が磁場コイルから分離して存在しており、より効果的なバルクプラズマ生成が期待される。



- RT-1において磁気浮上状態でプラズマの密度、温度上昇を目的とした実験を行い、その際のプラズマパラメータのSi(Li)、干渉計による評価を行った。
- 比較的低温低密度のプラズマ中で電極によるバイアス実験を開始した。

# 磁気圏型閉じ込め装置RT-1 (Ring Trap-1)\*



- Dipole磁場を持つ惑星磁気圏型装置.
- 主要な研究課題は,
  - ・流れを持つプラズマの実験研究
    - 超高 $\beta$ 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 $\times$ 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する事により, プラズマへの擾乱を抑制.
- 水素ガス中にマイクロ波入射を行い, ECHプラズマを生成する.

## Ring Trap 1 (RT1) 装置の断面図

高温超電導コイル 115A (250kAT) Bi-2223  
 吊上げコイル (最大定格90kAT) による制御浮上.

\* 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).

# RT-1の外観とプラズマ生成・計測システム

## マイクロ波干渉計

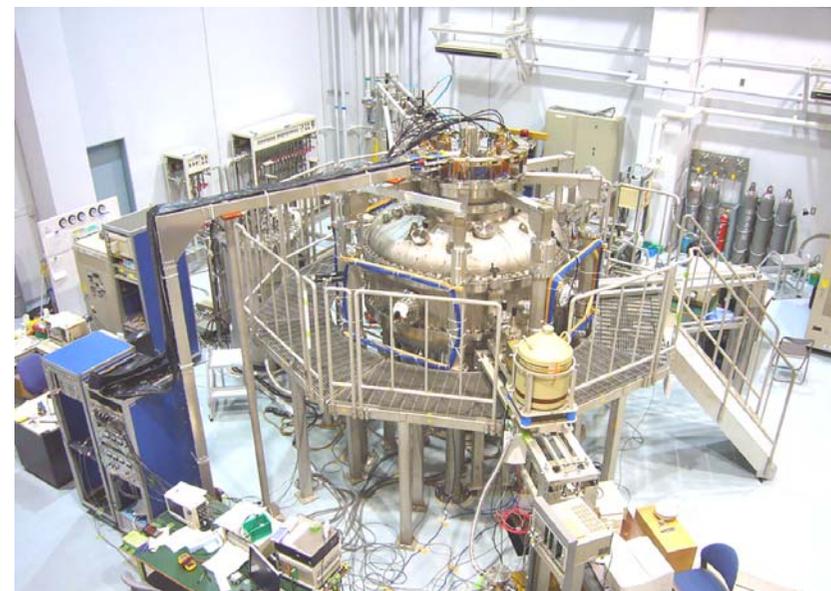
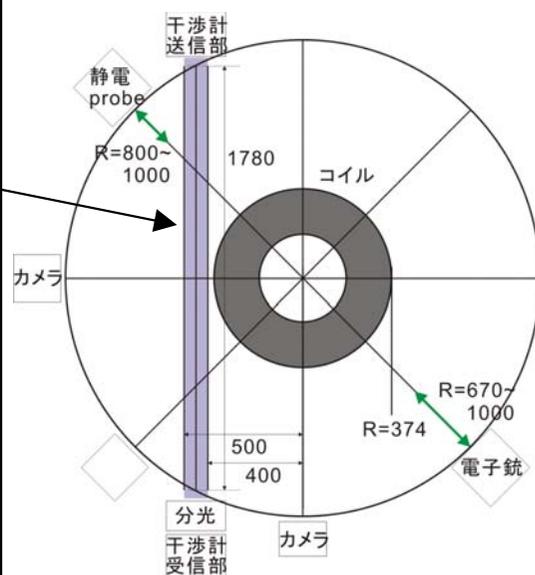


75GHz heterodyne

線積分密度とピーク密度は

$$N_{peak} = 2.1 \times \int_{L1}^{L2} Nedl$$

$$= \int_{0.45}^1 Ne \times (r^2 - 0.45^2)^{-0.5} r dr$$

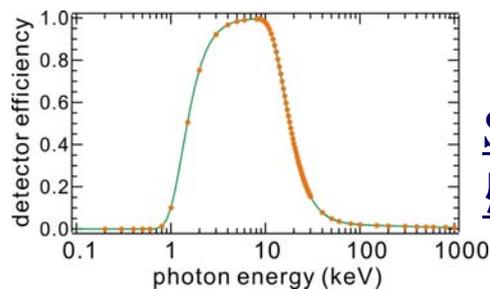


RT-1装置の外観図

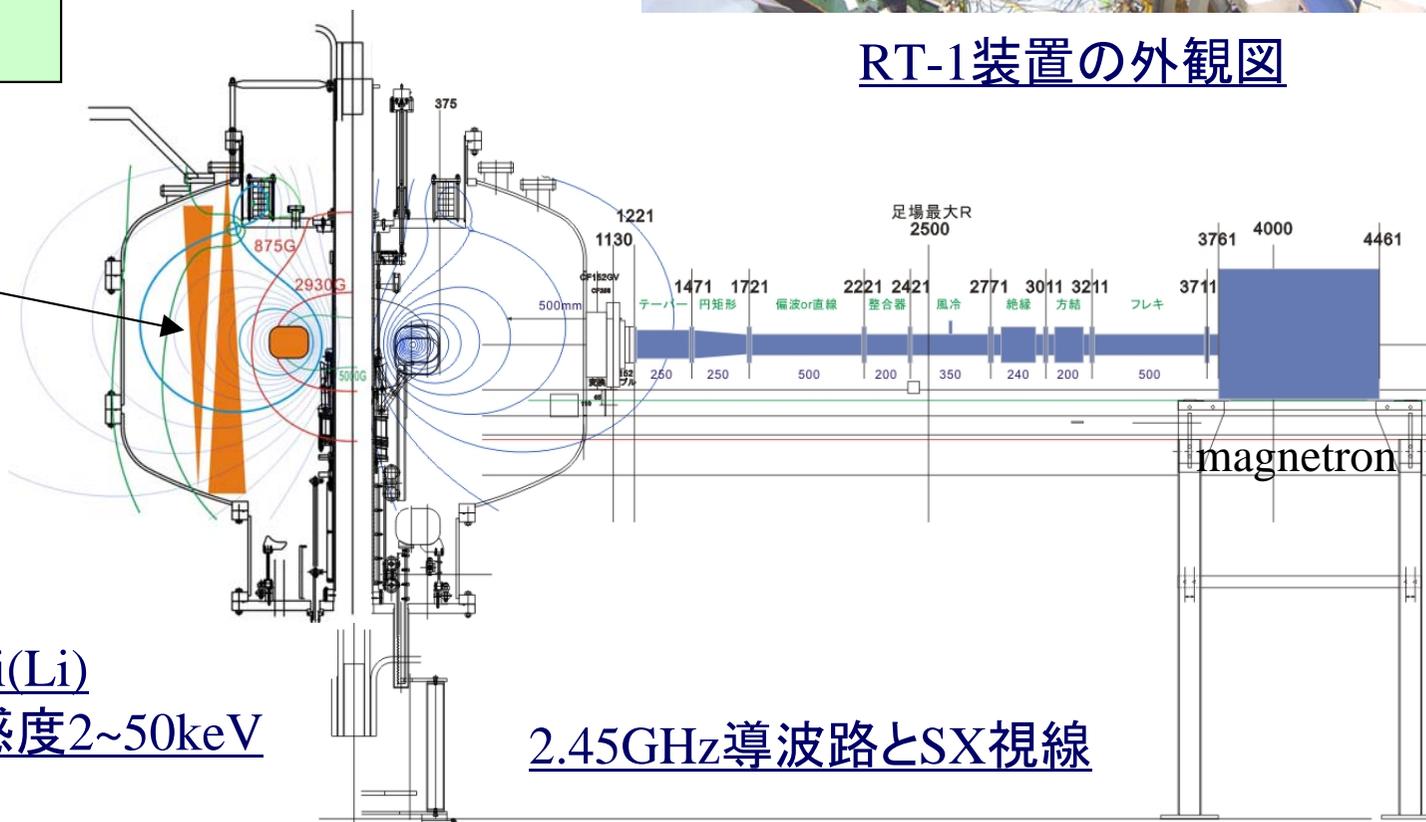
## Soft X-ray



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

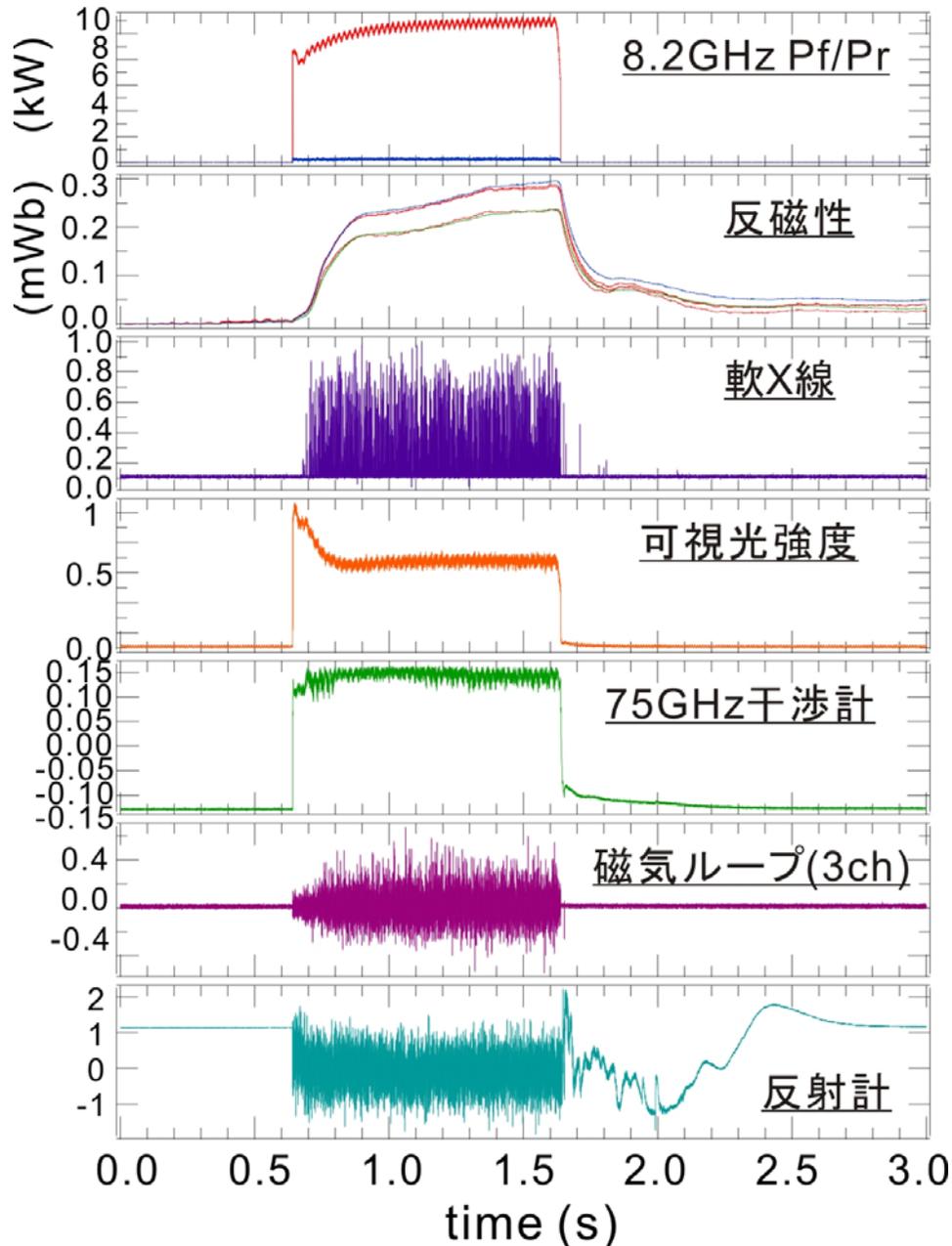


Si(Li)  
感度2~50keV



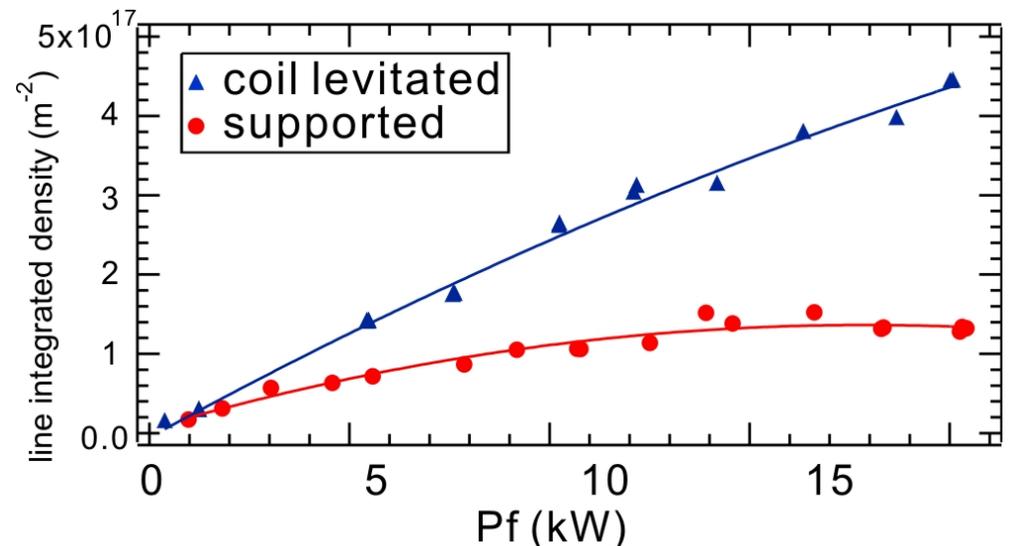
2.45GHz導波路とSX視線

# 8.2GHz RFによるプラズマ生成



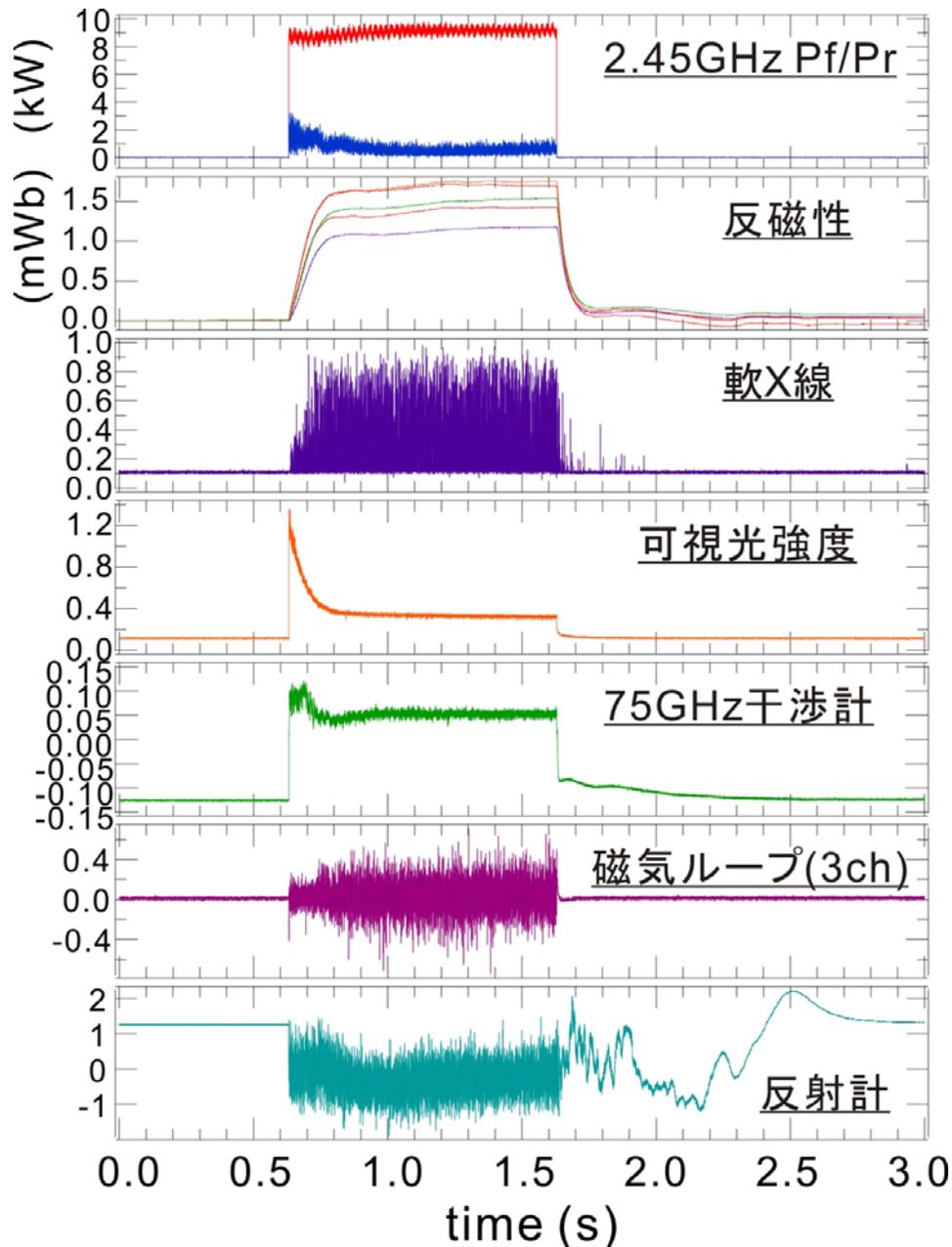
8.2GHz ECHプラズマ放電の典型波形

- 反磁性信号の立ち上がりに合わせて可視光強度が減衰し、軟X線強度が増大.
- 主に高エネルギー電子成分がマイクロ波の停止後に長時間の閉じ込めを示す(粒子閉じ込め時定数は0.3s程度).
- コイル磁気浮上により電子線密度が2倍程度まで増大するが、現在の入射パワーではO-mode cut off密度に達しない。また、特に低ガス圧領域で硬X線の発生により、SX計測が困難.



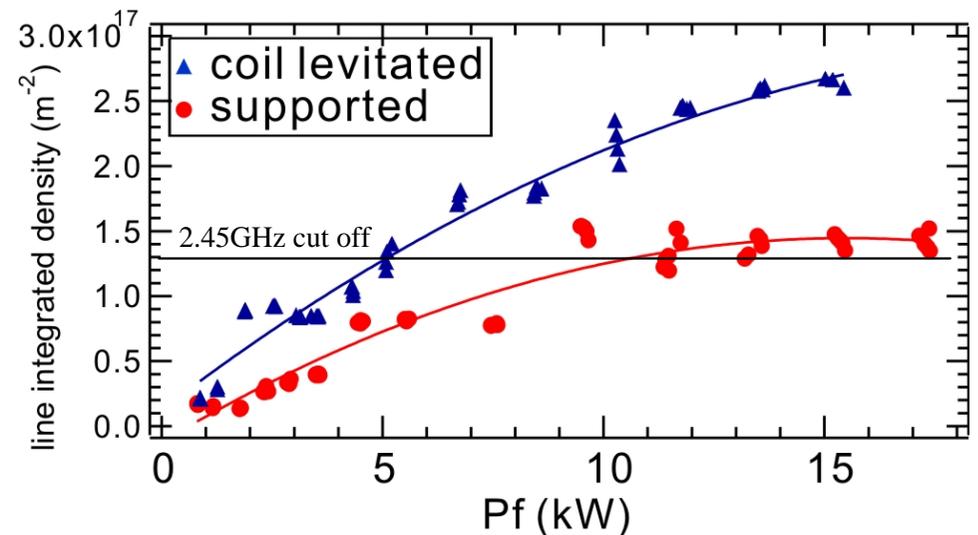
コイル磁気浮上による線密度の増大

# 2.45GHz RFによるプラズマ生成



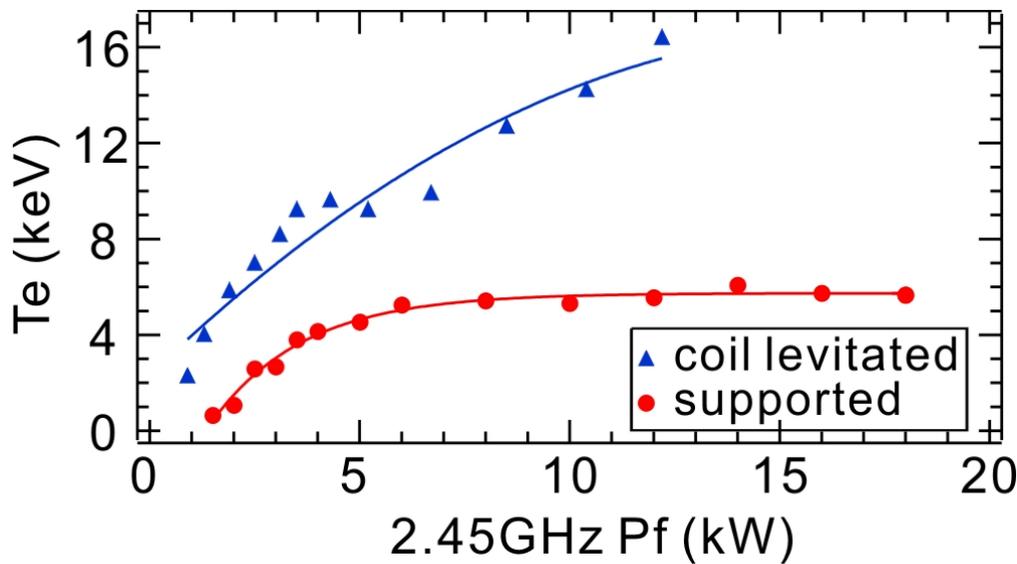
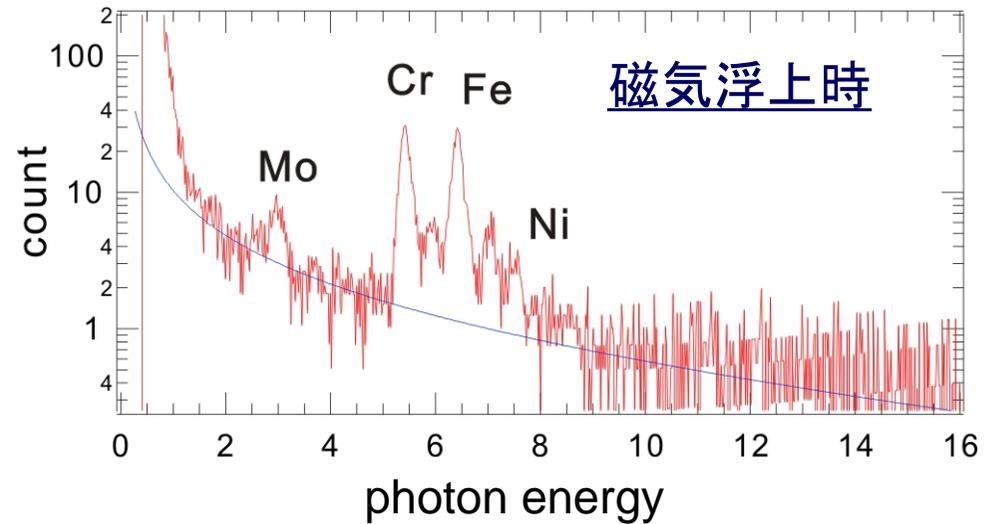
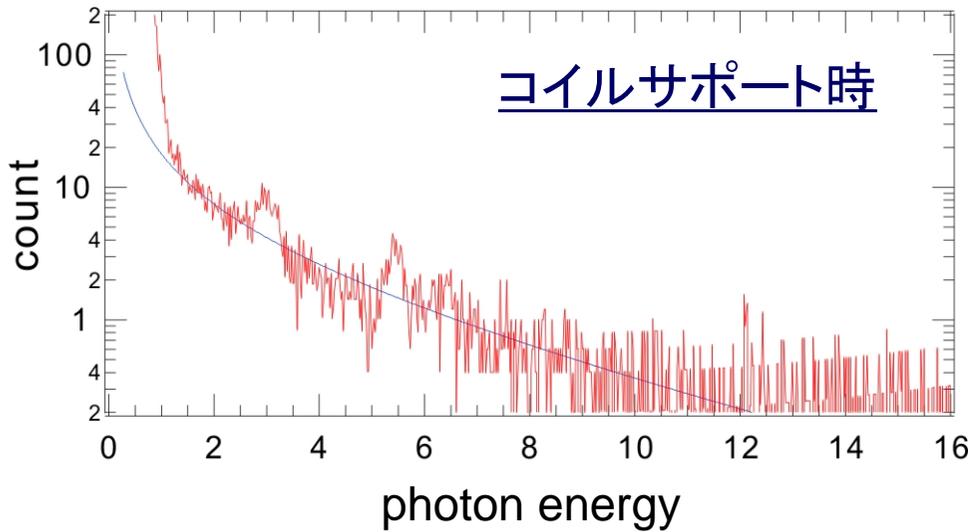
2.45GHz ECHプラズマ放電の典型波形

- 反磁性信号の立ち上がり時に可視光強度及び電子密度が減衰し, 同入力パワーに対して~mWbの反磁性信号が得られる.
- コイル磁気浮上時に電子線密度が2倍程度まで増大し, 平均密度でO-mode cut off密度を上回る. EBWの効果を示唆.
- マイクロ波エネルギーが効率的にプラズマに吸収され, ~MeV電子成分でなく,  $\beta$ に寄与出来る軟X線領域の電子が存在する事を示している.



コイル磁気浮上による線密度の増大

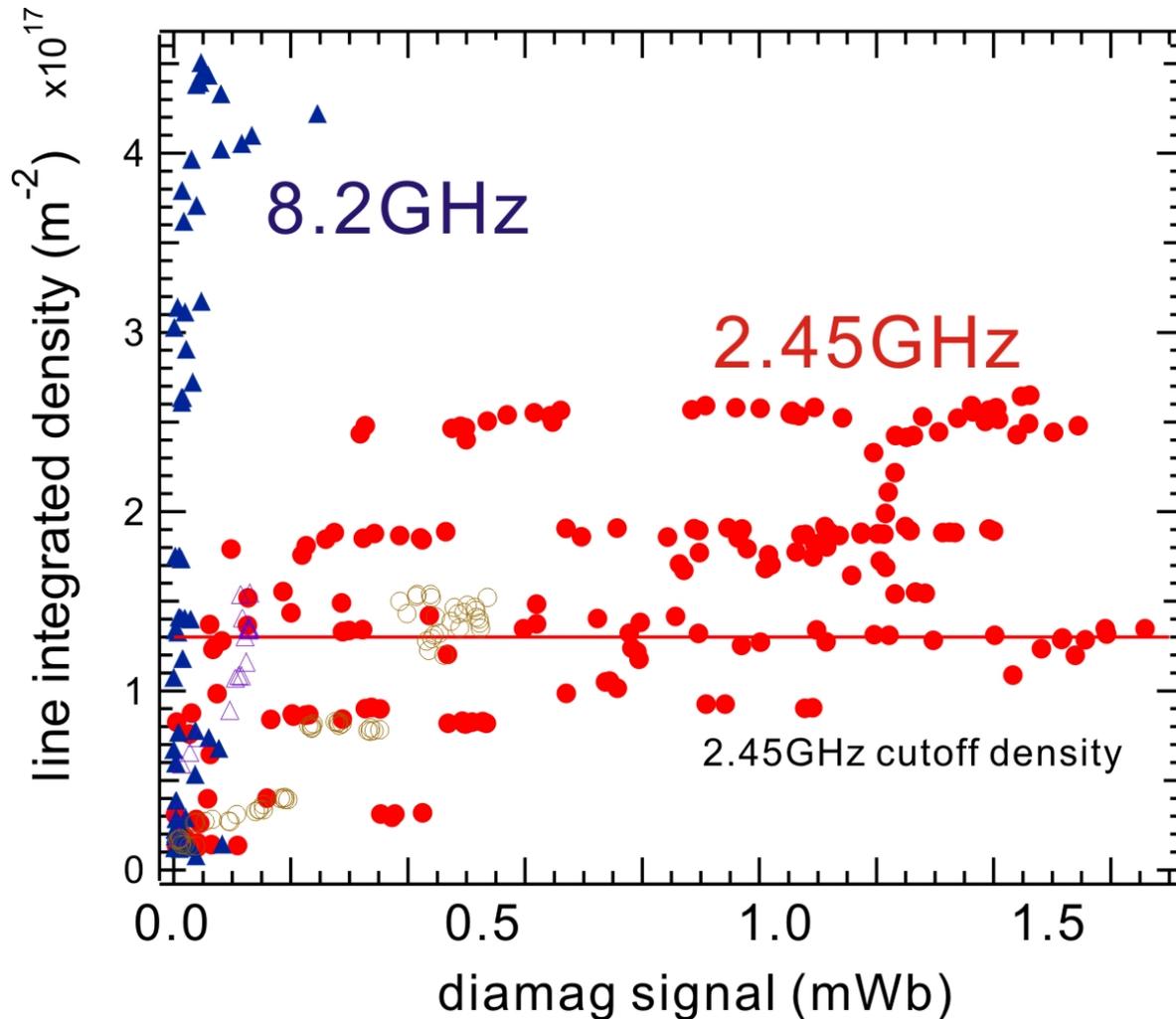
# コイル浮上の効果と電子温度 (2.45GHz RF)



## 高エネルギー成分の電子温度

- 2.45GHz ECHプラズマの高エネルギー成分電子温度を内側ポート( $r=62\text{cm}$ )で測定した.
- 光子カウントから見積もった電子成分は  $5\text{keV}$ ,  $\sim 10^{16}\text{m}^{-3}$ であり,  $\beta$  値にほぼ等しい.  
⇒ 高エネルギー成分がプラズマ圧力の主体.
- コイル磁気浮上時に, ステンレス由来の金属輝線が著しく増大する(低パワー時も).
- コイル支持状態で飽和する電子温度が磁気浮上時に飽和しない( $\beta$  の傾向と一致).
- 8.2GHz実験での電子温度計測は今後の課題(硬X線及びpile up対策).

# 8.2GHz/2.45GHz実験の傾向(磁気浮上の効果を含む)



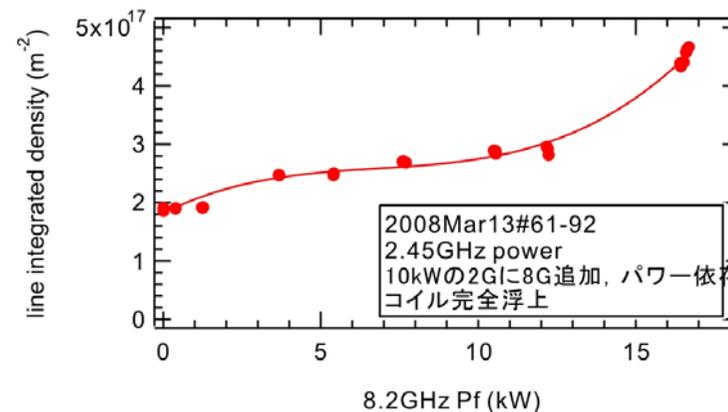
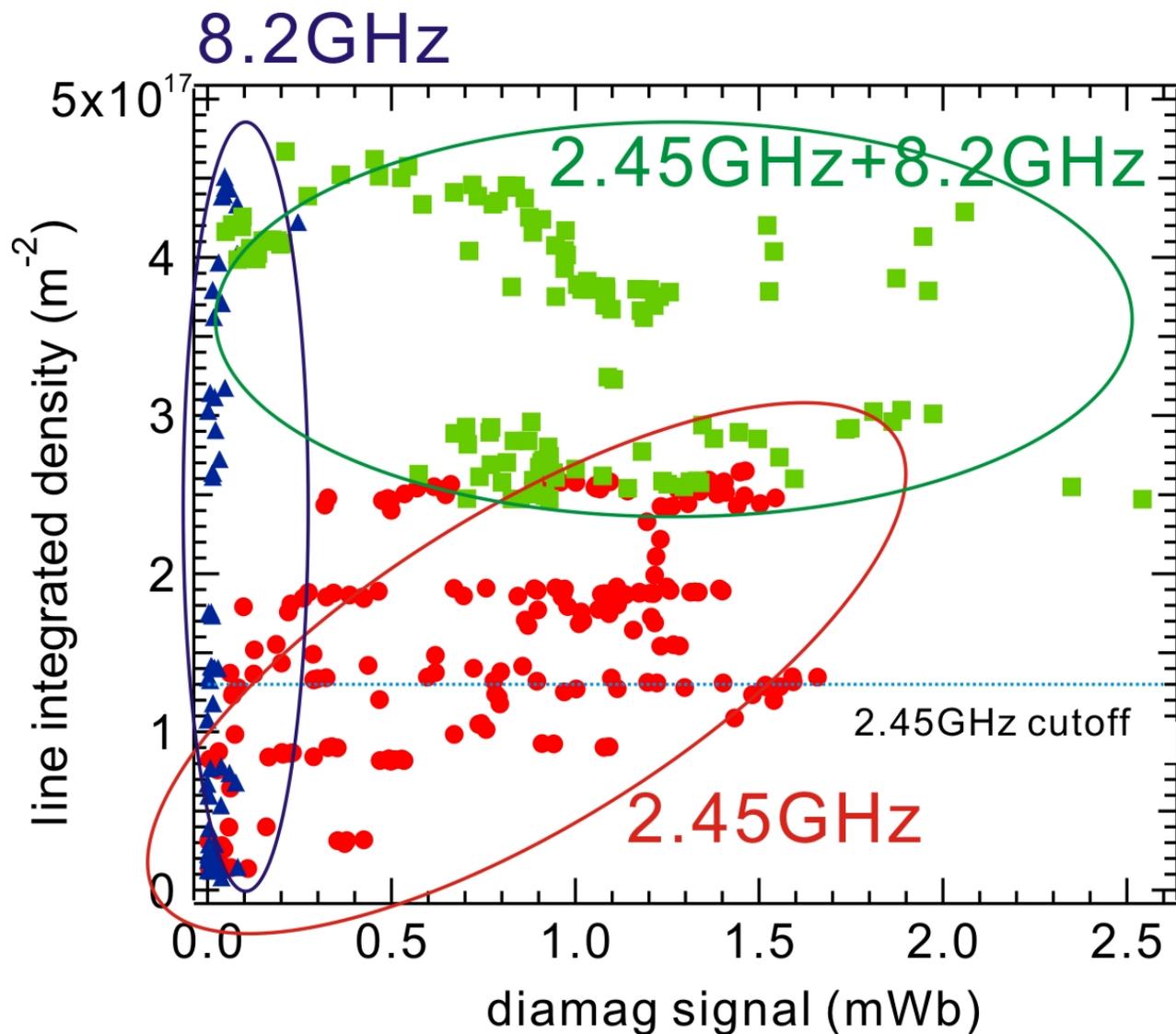
- 2.45GHz ECHプラズマでは高い  $\beta$  が得られるが比較的低密度.
- 8.2GHz実験では, 比較的高密度 (但しcut off密度の半分程度)だが低  $\beta$  (ごく少数の電子が加熱).
- いずれの場合にも, コイル磁気浮上による密度増大効果が顕著.
- 逆に, 8.2GHz放電の際には,  $\beta$  については磁気浮上による大きな改善は見られない.  
⇒ ミラートラップされた高エネルギー電子の存在を示唆?

## ECHプラズマ各ショットの反磁性信号-線密度プロット

白抜き記号はコイル支持, 塗り記号は磁気浮上時の放電を指す. 2.45GHzの複数の曲線上に見える系列は実験日が異なるショット群であり, 放電を続ける事によりプラズマ性能が徐々に改善する傾向を示している.

- 高密度と高  $\beta$  を同時に実現するために, 8.2GHzと2.45GHzの同時入射実験を行った.

# 8.2GHz及び2.45GHzの同時入射



8GHz追加による線密度増大

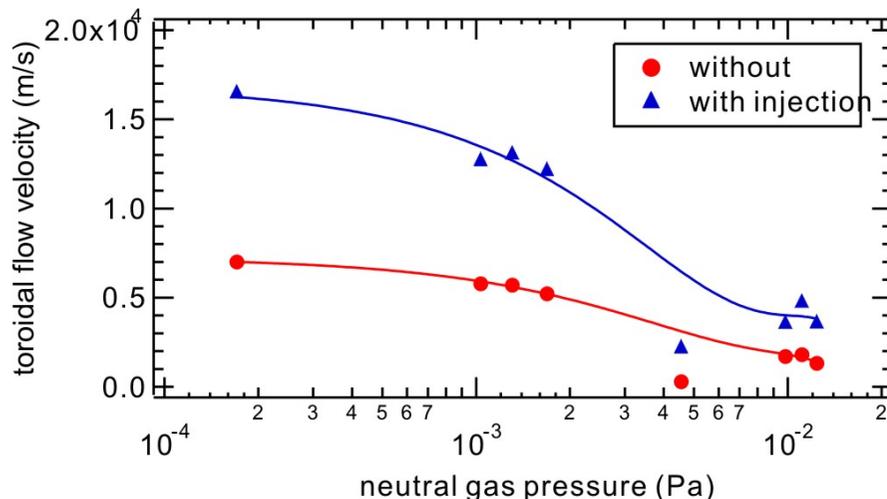
- 2.45GHzと8.2GHzの併用により高い電子密度と $\beta$ を両立.

ECHプラズマ各ショットの反磁性信号-線密度プロット

各ショットはいずれも磁気浮上時のデータ.

# まとめと今後の課題

- RT-1において8.2GHz 25kW及び2.45GHz 20kWマイクロ波によるECHプラズマ実験を行い, 高い $\beta$ が得られる2.45GHzと高密度が得られる8.2GHzを併用する事で, 2.45GHz cut off密度を超える線平均電子密度を有し, かつ数十%の局所 $\beta$ を持つプラズマを生成した.
- ECHにより温度~10keV, バルクの10%程度の成分の高エネルギー電子が生成され主としてプラズマの $\beta$ を担っている(2.45GHz放電時のSi(Li)計測).
- 8.2GHz実験時にSi(Li)計測にノイズ対策が必要となっており, 上記の際の電子温度計測と $\beta$ 値との比較は今後の課題である.
- 比較的低温低密度のプラズマ中で電極によるバイアス実験を開始しており, 今後は詳細な流れ分布と径方向電流分布の計測実験を実施する計画.



$$E + v \times B - \frac{1}{en_i} \nabla p_i = \eta \mathbf{j}$$

$$n_i e \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{j} \times \mathbf{B} - \nabla \cdot \mathbf{\Pi} - \nabla(p_i + p_e) - m_i n_i \mathbf{v}_{in} \mathbf{v}$$

$$E_r - \frac{1}{en_i} \frac{dp_i}{dr} = \frac{j_r B_z^2}{m_i n_i v_{in}} + \frac{B_z}{m_i n_i v_{in}} (\nabla \cdot \mathbf{\Pi}) \cdot \hat{\theta} + \eta j_r$$