

磁気圏型配位RT-1における 高エネルギー電子の分布・閉じ込め特性

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, 小林真也

- 目次
1. 研究背景と本研究の目的
 2. RT-1の装置概要とプラズマ実験の現状
 3. 軟X線撮像用CCDカメラ
 4. 高温電子の空間分布とエネルギー分析
 5. まとめと今後の課題



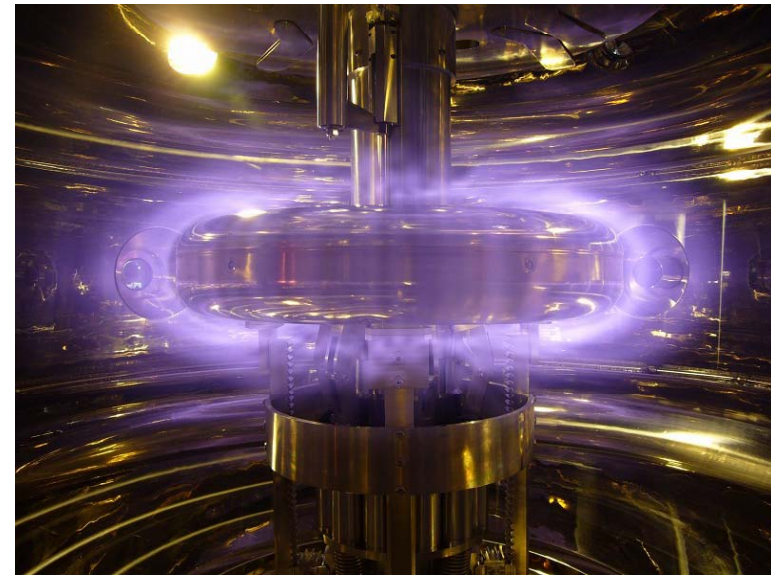
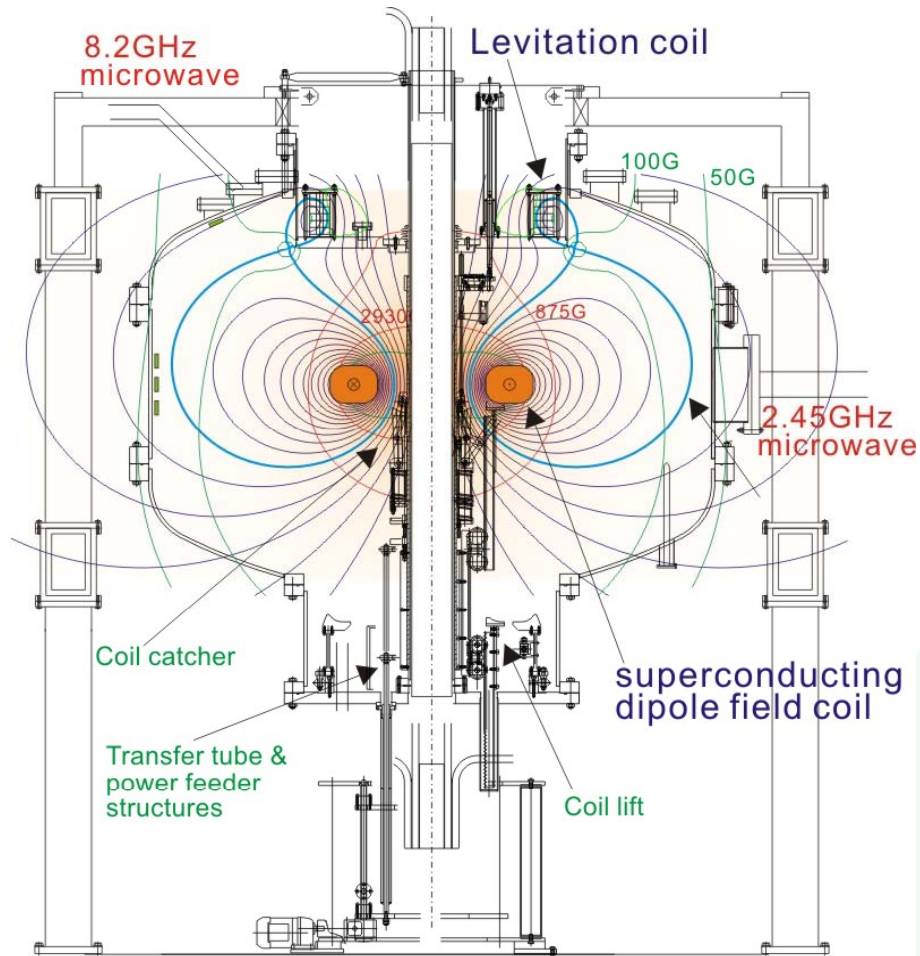
東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

- 磁気圏型配位RT-1(Ring Trap-1)では、磁気浮上させた超電導コイルによる dipole磁場中で、超高 β プラズマの閉じ込め原理確立を目指している。
- これまでの磁気計測と平衡解析によれば、RT-1では40%に達するlocal β が観測され、1s以上の安定な閉じ込めが実現されている*。
- RT-1では、8.2GHzと2.45GHzによるECHによりプラズマ生成／加熱を実施しており、高 β のプラズマ圧力を担うのは主として高エネルギー電子である。実際、SiLi及びCdTe検出器を用いた測定によれば、高 β 運転時に10keV程度までのX線が観測されている。（エネルギー閉じ込め時間は~0.1s.）
- こうした高エネルギー電子分布から推定出来るプラズマ圧力分布は、磁気圏型配位におけるプラズマの平衡や安定性を議論する上で重要なパラメータである一方で、これまで高エネルギー電子の直接分布計測は行われていない。
- 本研究では、RT-1の高エネルギー電子の空間分布を明らかにする事を目的として、X線CCDカメラ**を導入した。コイル支持状態で測定したECHプラズマ中の高温電子分布の特性と、電子温度計測の初期結果を報告する。

* Y. Yano, Z. Yoshida, J. Morikawa *et. al.*, Plasma Fusion Res. **4**, 039 (2009).

** Y. Liang, K. Ida, S. Kado *et. al.*, Rev. Sci. Instrum. **72**, 717 (2001).

実験装置：惑星磁気圏型装置RT-1の概要と現状 3/11



RT-1装置の断面図と生成したECHプラズマ

測定系： 1m可視分光器, 反磁性ループ, 磁気プローブ,
75GHz干渉計, 軟X線検出器(SiLi及びCdTe),
可視光カメラ, 軟X線カメラ, エッジ静電プローブ

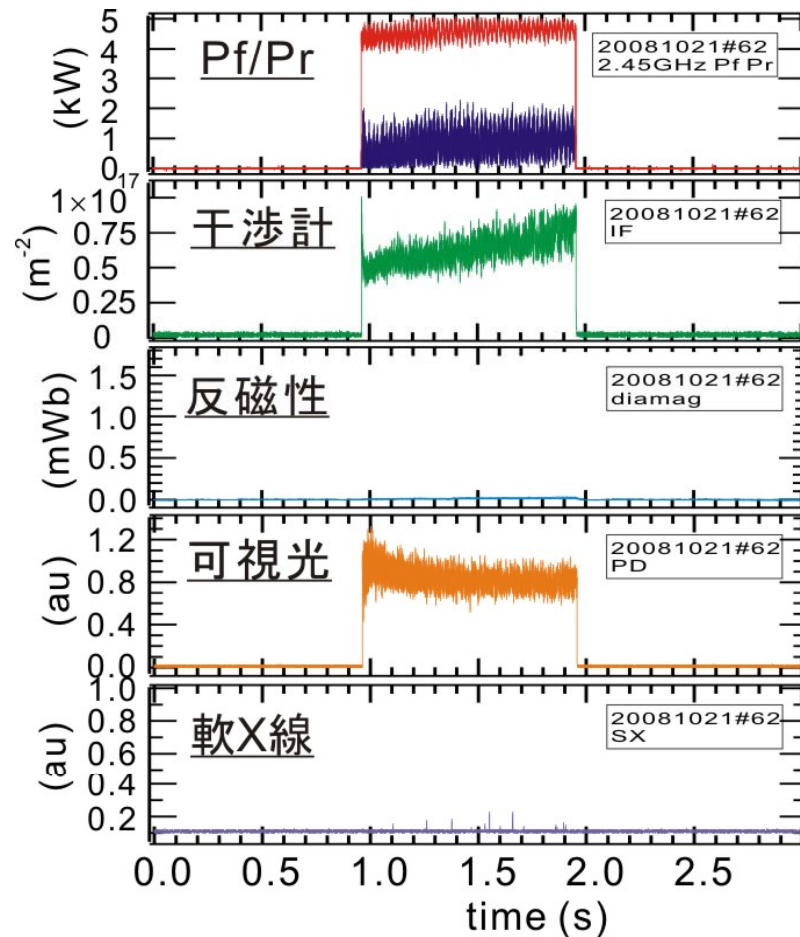
磁気計測と高 β 平衡： 矢野 26aYP-6

イオンの温度計測と加熱計画： 水島 28aYL-9

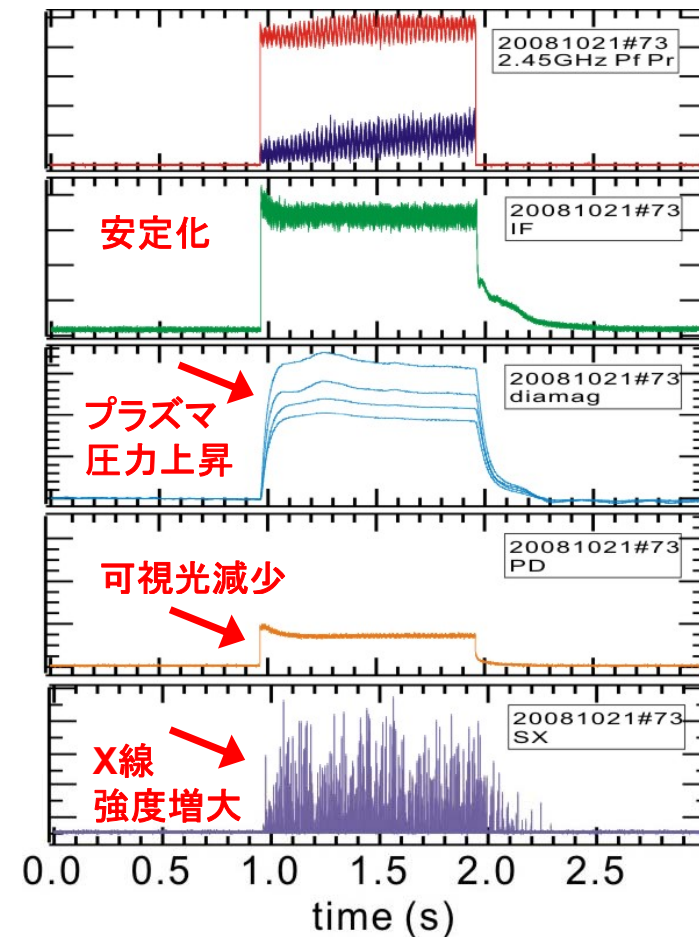
- 磁気浮上させたdipole磁場コイルにより生成する惑星磁気圏型配位.
 - 主な研究課題は,
 - ・流れを持つ超高 β プラズマの研究
現在は高温電子, イオン加熱を計画中
 - ・トロイダル非中性プラズマの閉じ込め
純電子プラズマの400s以上の閉じ込め
- (現在, コイルキャッチャの不具合によりコイル支持状態で実験を行っている)

ECHによる高 β ・高温電子プラズマの生成

4/11



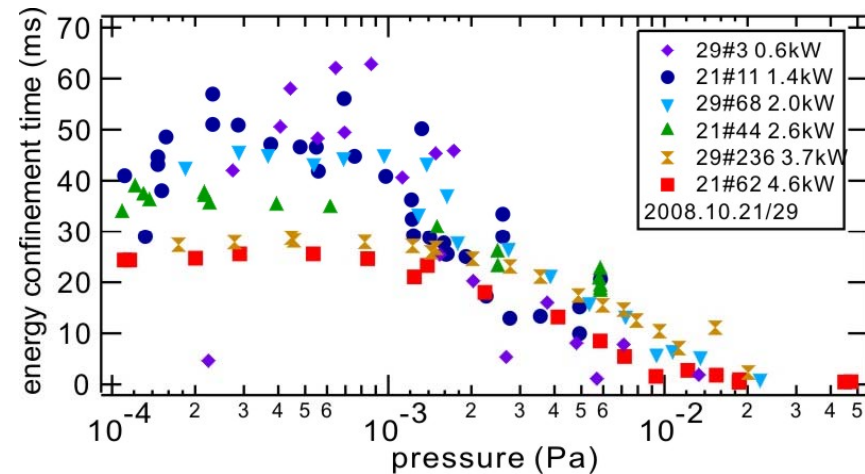
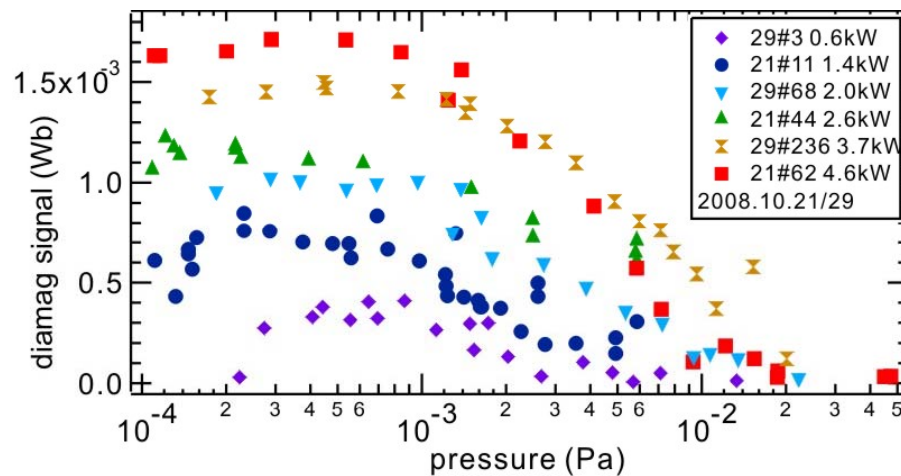
(a) 高ガス圧 $P_{H_2} = 4.5 \times 10^{-2} \text{ Pa}$



(b) 低ガス圧 $P_{H_2} = 1.3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$

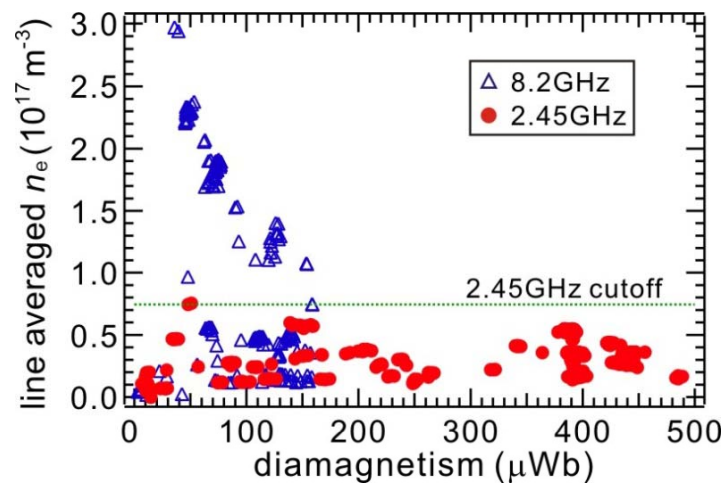
RT-1における2.45GHz ECHプラズマの典型波形. (a)高ガス圧の場合と(b)低ガス圧の場合.

プラズマ中には, 低温(10eV)と高温(10keV)の二成分の電子が存在する. 生成条件の最適化により, 高 β のプラズマ圧力を担う高温電子が主成分となる.



反磁性信号の封入ガス圧力依存性とエネルギー閉じ込め時間

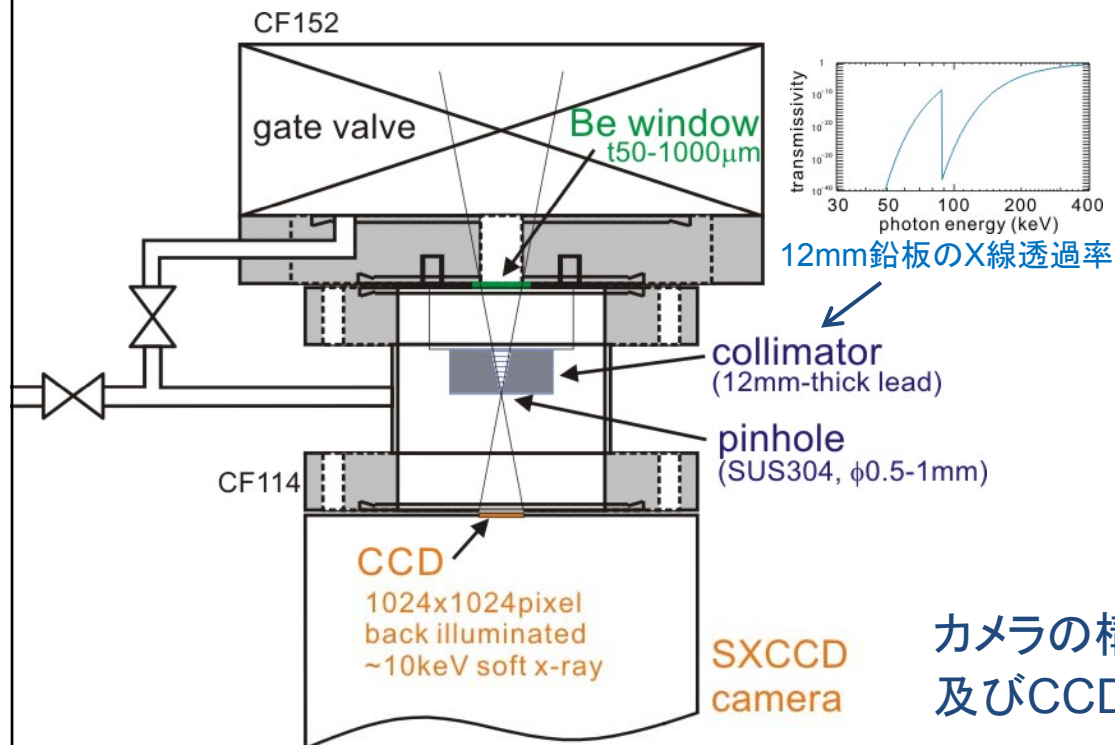
低ガス圧時に高エネルギー成分が電子の主成分となり、プラズマ圧力は増大する。



8.2/2.45GHz ECHのプラズマパラメータ

□ 放電中の入射パワーとstored energyから評価したエネルギー閉じ込め時間は最大60ms程度であり、磁気計測結果(stored energyのdecay time)による100msとほぼ一致している。 **矢野 26aYP-6**

□ 2.45GHz及び8.2GHz実験の差異：
8.2GHzでは、反磁性信号の大きな上昇は難しく、不純物の増大が見られる。



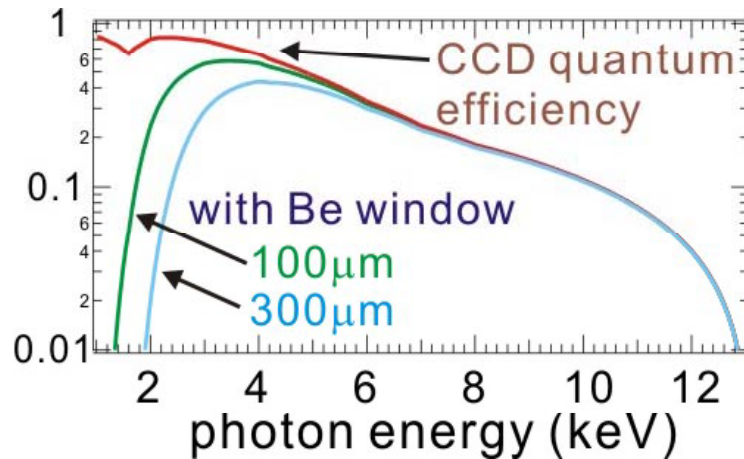
カメラの構造と外観図: ピンホール, コリメータ*, 及びCCDから構成され, Be窓を介して観測する.

- ・ CCDのピクセル数とサイズは1024 × 1024pixel, 13mm × 13mm.
- ・ 背面照射型CCD(受光部と回路構造が別面のため受光感度に優れる).
- ・ photon energyに対する感度領域は, 2eV-10keV.
- ・ 16bitのdynamic rangeを持ち, エネルギー分解能に優れる.

* Y. Liang, K. Ida, S. Kado *et. al.*, Rev. Sci. Instrum. **72**, 717 (2001).

空間・エネルギー分解に優れたCCDの特性を生かして、

- ・X線の強度(全エネルギー)分布を測定するイメージングモードと、
- ・個々の光子のエネルギー分析を行うフォトンカウンティングモードによる観測を行う事が出来る*。



カメラ感度のX線エネルギー依存

プラズマ中の電子の制動放射による連続X線スペクトル

$$\frac{dN}{dE} = \alpha n_e n_i \frac{gZ^2 \exp(-E/T_e)}{E\sqrt{T_e}} V\sigma$$

(1sあたり1eVあたりのphoton数)

RT-1のパラメータ $n_e = 10^{17} [\text{m}^{-3}]$,
 カメラが見込むプラズマ体積 $V \sim 3 \times 10^{-3} [\text{m}^{-3}]$,
 立体角 $\sigma \sim 0.25 \times d^2 [\text{sr}]$, $T_e = 10 \text{keV}$

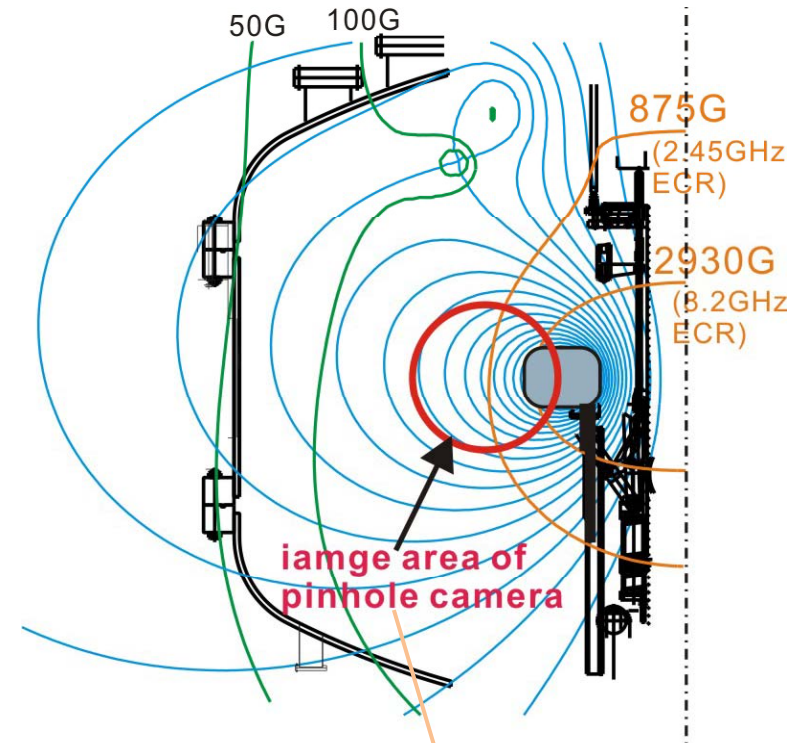
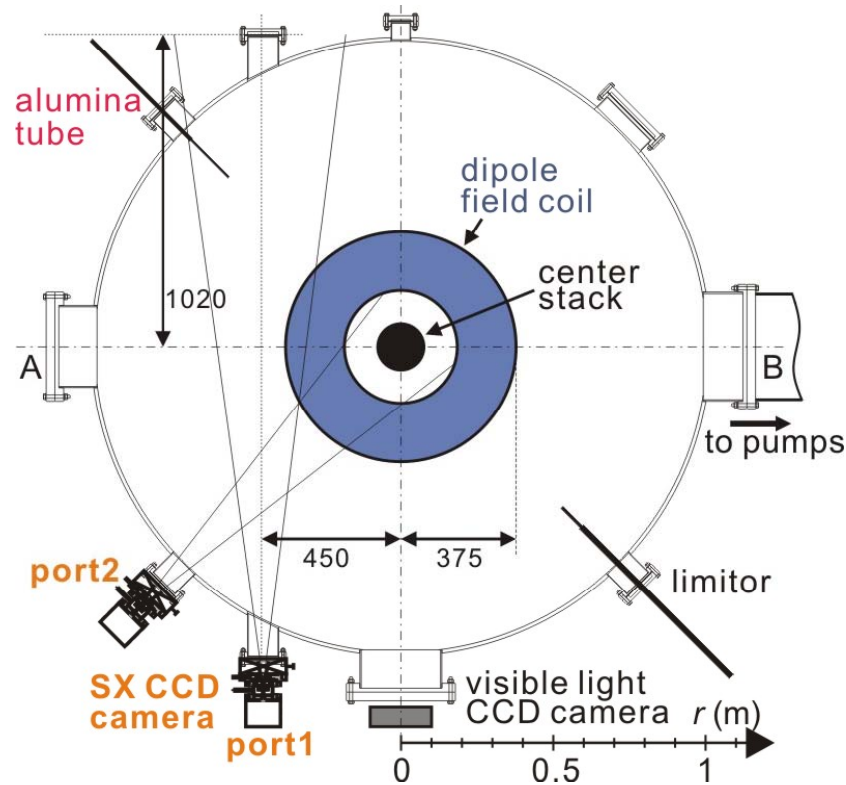
⇒ total photon数: $\sim 10^3 \text{count/s}$

1shot(1s放電)でイメージングモードでのX線強度分布撮像が可能であり、さらに、光量を絞る事でshot数の蓄積によるフォトンカウンティングモードの電子エネルギー分布を行った。

* Y. Liang, K. Ida, S. Kado et. al., Rev. Sci. Instrum. **72**, 717 (2001).

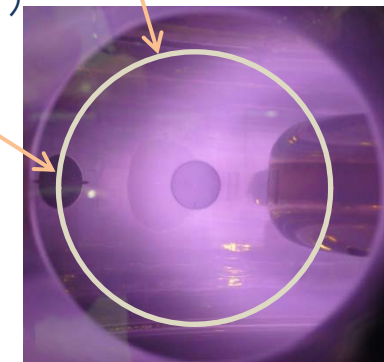
RT-1へのX線カメラの導入と撮像範囲

8/11



RT-1 (top view) のカメラ導入ポート配置

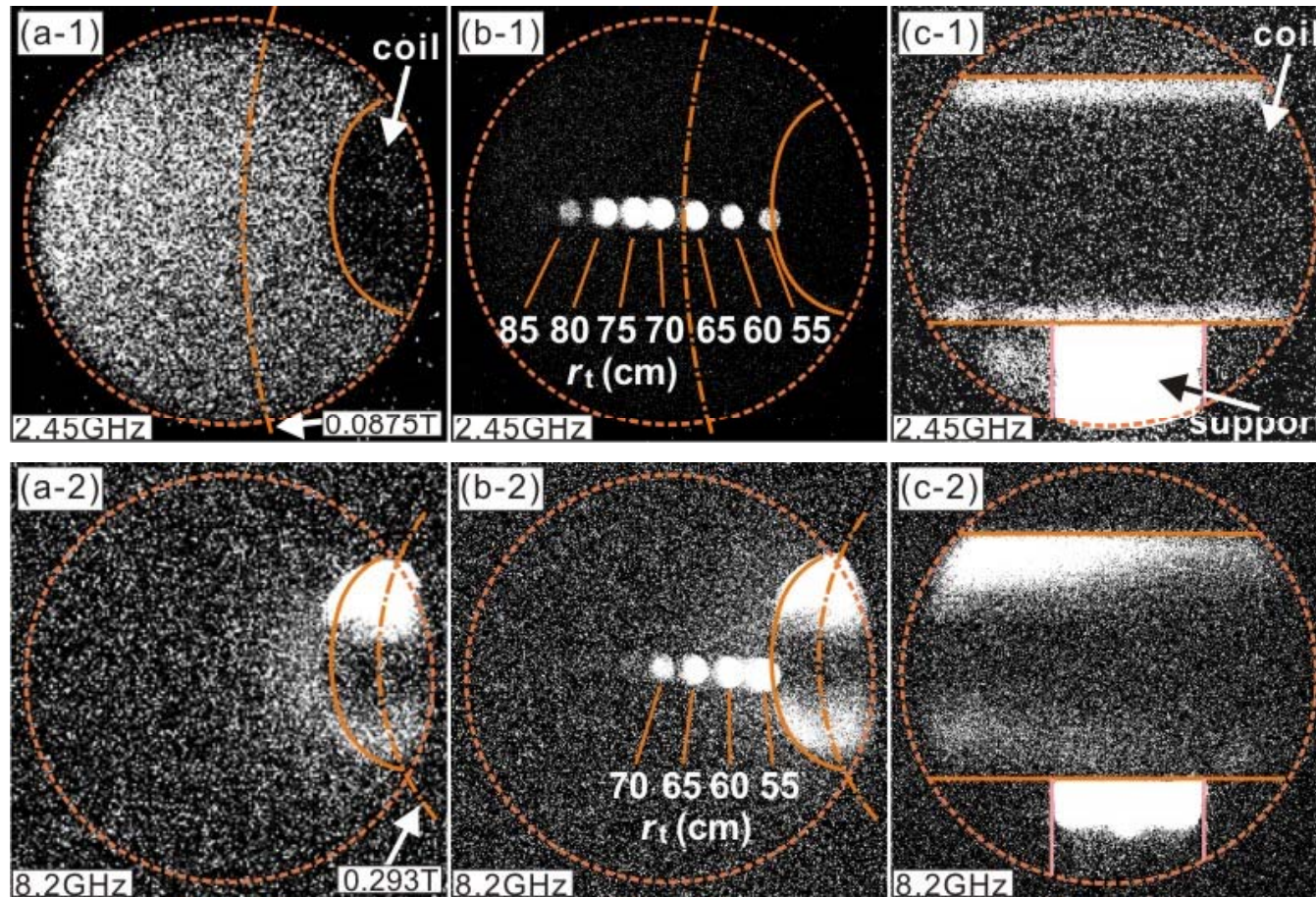
セラミック(アルミナ) チューブ



port1: ECH共鳴層 (2.45GHzの875Gと8.2GHzの2930G)を含む比較的コイル近傍を撮像.

port2: コイルとコイル支持構造を正面から撮像.

port1からの撮像範囲と可視光カメラによる映像

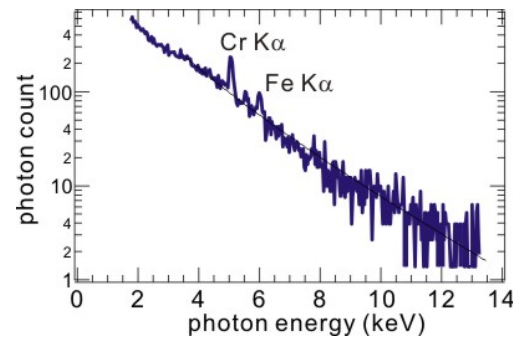
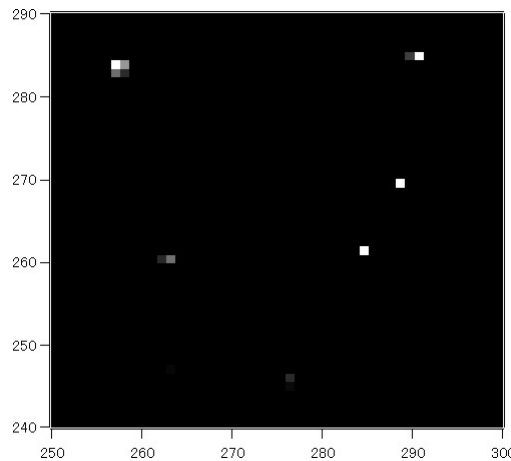


(a)上段は2.45GHz, (b)下段は8.2GHz ECHの(1) port1からのX線撮像, (2) 制動放射のtargetとしてセラミックチューブを導入して多重撮影, (3) port2からの撮像.

2.45GHzでは閉じ込め範囲のほぼ全域で一様に近いX線強度が観測される. 一方、共鳴層がコイルと交差する8.2GHzでは、高温電子はコイル近傍に局在化している. いずれの場合も、コイル支持構造が大きな損失源となっている.

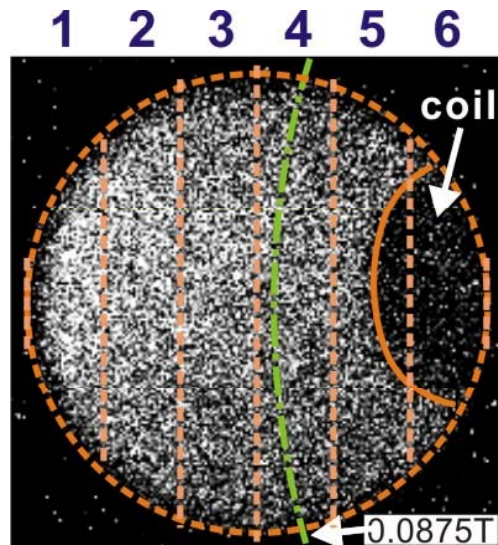
フォトンカウンティングモード*によるTe評価

10/11

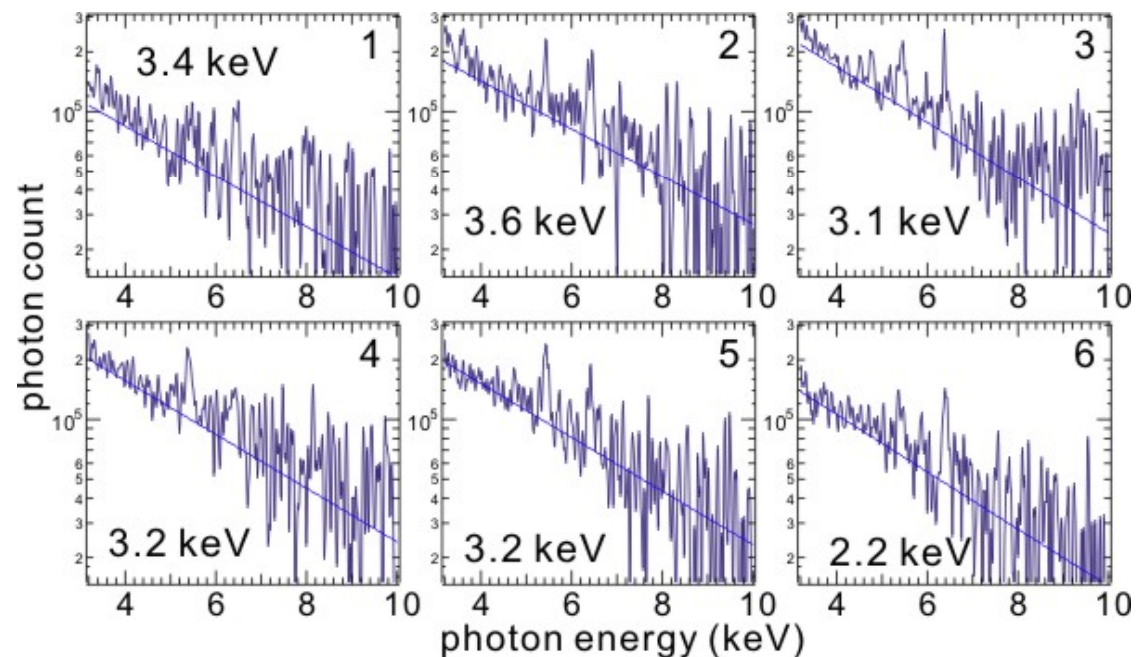


CCDイメージの拡大図と波高分析(全領域)

- ・個々のX線光子のエネルギー分析により電子温度を計測した。(エネルギー校正は不純物金属ライン、強度校正は透過率と量子効率を使用)
- ・コイル支持時, Te~3-4keV。(SiLi及びCdTe計測結果と一致)
- ・観測領域内の全ての磁気面は共鳴層と交差しており, 明確な温度差は観測されなかった。



分割した撮像領域と各領域のエネルギースペクトル



* Y. Liang, K. Ida, S. Kado *et. al.*, Rev. Sci. Instrum. **72**, 717 (2001).

- 磁気圏型配位RT-1において、**CCDを用いた軟X線カメラ**を導入し、ECHにより生成された**高温電子プラズマの撮像及びエネルギー分析**を開始した。
- 高エネルギー電子分布の特性は、
 - ・2.45GHz (ECH共鳴層がコイルと分離)： 閉じ込め領域のほぼ全域で一様に近い分布を示し、観測領域内で明確な温度差異は存在しない。
 - ・8.2GHz (共鳴層がコイルと交差)： コイル付近に局在しており、閉じ込め領域を満たすには至っていない。また、コイル表面での損失が大きい。
- これらの結果は、反磁性計測 (2.45GHz実験の際に比較的高 β のプラズマが生成される) やX線計測 (8.2GHz実験で不純物増大) の傾向と合致する。
- **コイル支持構造は高温電子の主要な損失源**である (コイルの磁気浮上により、反磁性信号は5倍以上へと増大し、40%を越える局所 β が得られる)。
- 本研究では、コイル支持状態で比較的低 β のプラズマに対してX線計測を行い、初期実験結果について報告した。今後は、コイル磁気浮上による、より高性能のプラズマに対して撮像及びエネルギー分析を行い、高 β プラズマ中の電子の空間分布計測を進める事が課題である。