

宇宙関連プラズマ研究会2009年12月16日@JAXA

磁気圏型配位RT-1におけるプラズマ 閉じ込め実験の進展

東大新領域

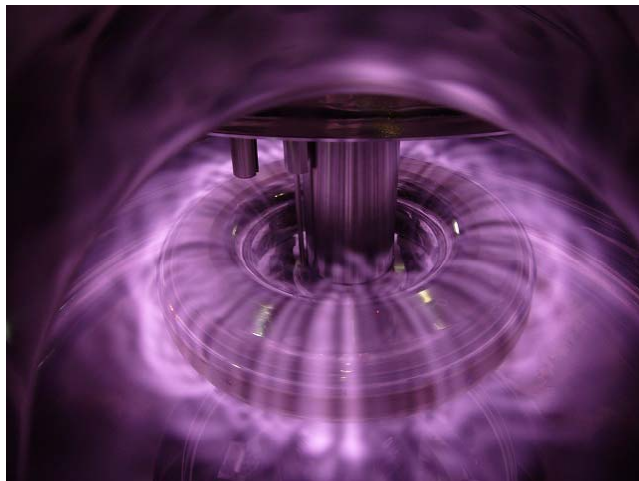
齋藤晴彦, 吉田善章, 小川雄一, 森川惇二, 矢野善久, 水島龍徳

- 目次
1. 研究動機: 磁気圏型配位によるプラズマ閉じ込め
 2. ECHによる高 β プラズマ生成実験の現状
 3. 非中性(純電子)プラズマの長時間閉じ込め
 4. 現状のまとめと今後の課題

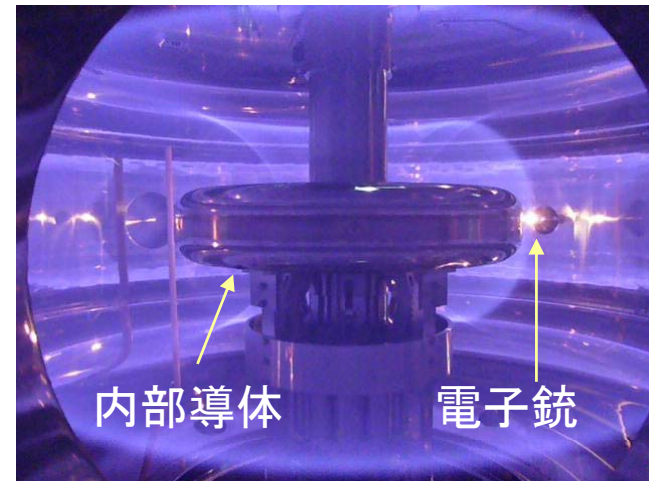


研究動機：磁気圏型配位によるプラズマ閉じ込め

- Ring Trap-1 (RT-1)では、高温超伝導・磁気浮上コイルの作り出す**磁気圏型配位**において、高性能プラズマ閉じ込めを目指す研究を進めている。
- RT-1では、**先進核融合に適した超高 β プラズマ**の安定生成と、**反物質捕獲に適したトロイダル非中性プラズマ**閉じ込めの原理確立を目指している*。



2.45GHzマイクロ波によるECHプラズマ



電子ビーム入射による磁気面の可視化

マイクロ波によるECHプラズマ実験

- ・コイル磁気浮上によるプラズマ性能向上.
- ・局所値が40%を上回る高 β の実現.
- ・CCDカメラによる電子温度の分布計測.

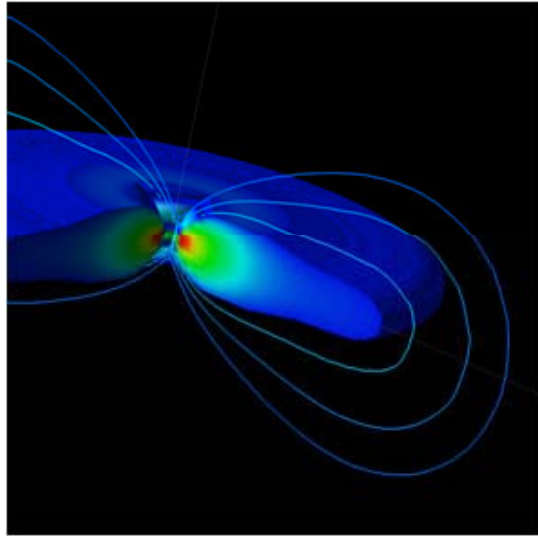
非中性(純電子)プラズマ実験

- ・300秒を上回る長時間閉じ込め.
- ・内向き(強磁場側)への粒子の径方向輸送.
- ・剛体回転平衡を示唆する安定な静電揺動.

*Yoshida, Ogawa *et al.*, in *Non-neutral Plasma Physics III* (AIP 1999); Ogawa *et al.*, PFR 4, 020 (2009).

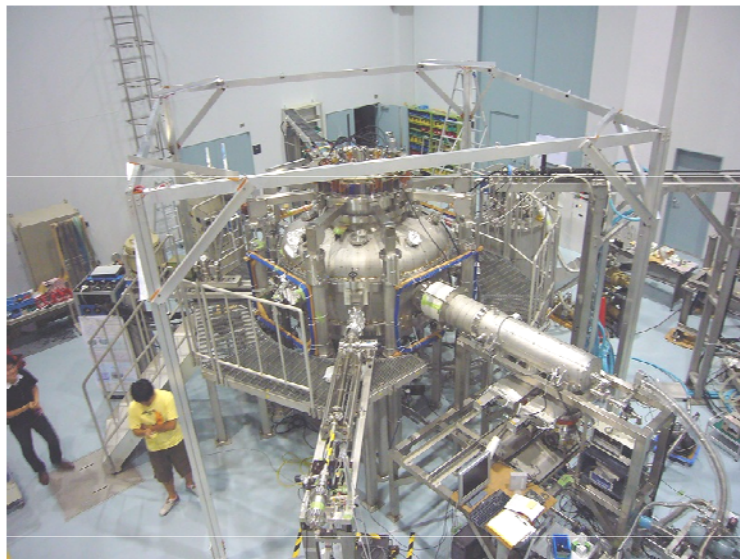
2. ECHによる高 β プラズマ生成実験の現状

磁気圏型配位における先進的核融合の研究



木星磁気圏の高速流高 β プラズマ

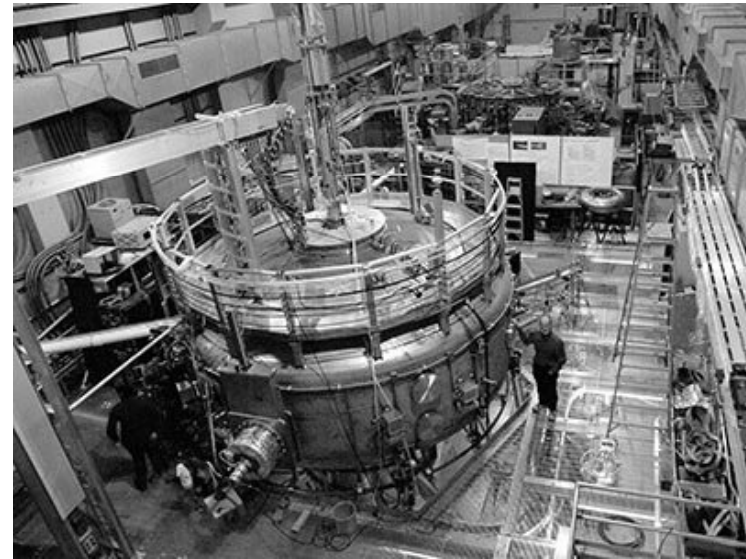
- D-³HeやD-D炉の先進核融合を実現する為には、高 β の安定プラズマ閉じ込め配位を確立する必要がある*.
- 木星磁気圏では、高速流(~Alfvén速度)を持つ超高 β プラズマが安定に存在する事が観測されている.
- 高速流を持つプラズマでは、流れの動圧の効果により1を上回る超高 β を実現可能と理論予測されている**.
- 近年、磁気圏を模擬した実験装置が相次いで建設され、高 β 閉じ込めの原理検証を目指す実験が開始された.



東大RT-1 (Proto-RT->Mini-RT->...)**

*Hasegawa *et al.*, Nucl. Fusion **30**, 2405 (1990).

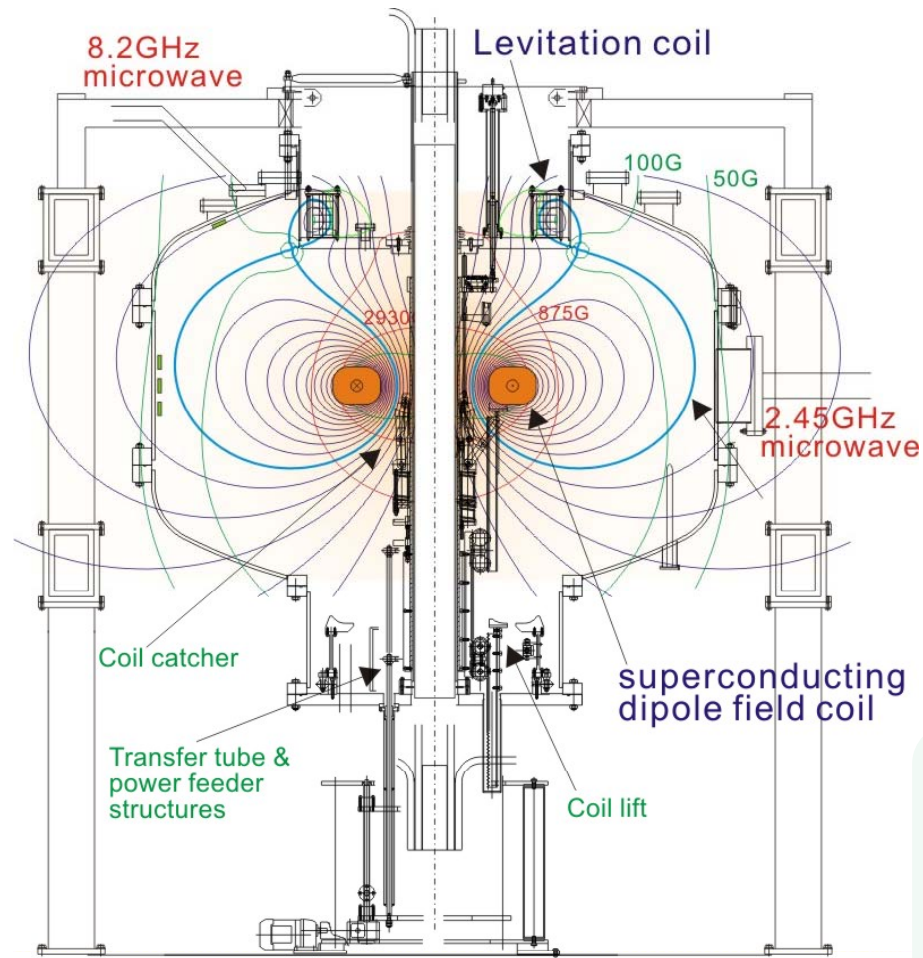
Yoshida *et al.*, PRL **88, 095001 (2002); PFR **1**, 008 (2006).



MIT/Columbia: Levitated Dipole eXperiment***

***Garnier *et al.*, Phys. Plasmas **13**, 056111 (2006).

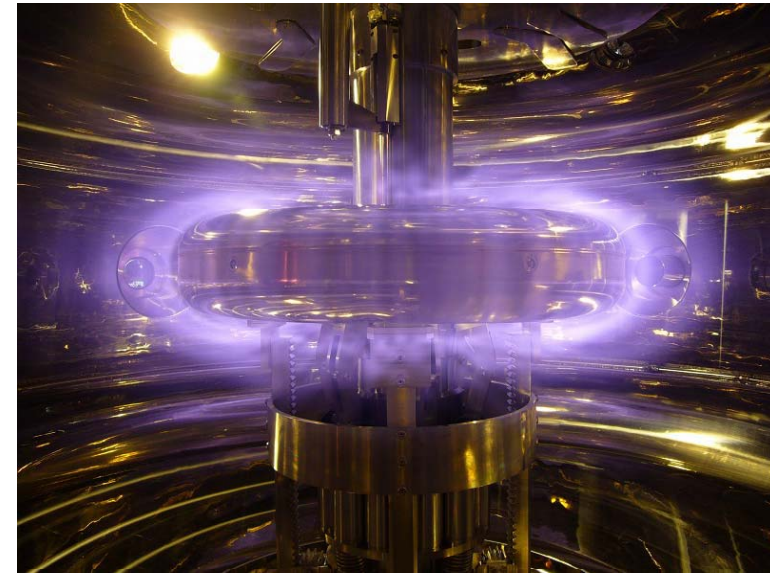
磁気圏型プラズマ閉じ込め装置 Ring Trap 1 (RT-1)



RT-1装置の断面図と計測器等の配置

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

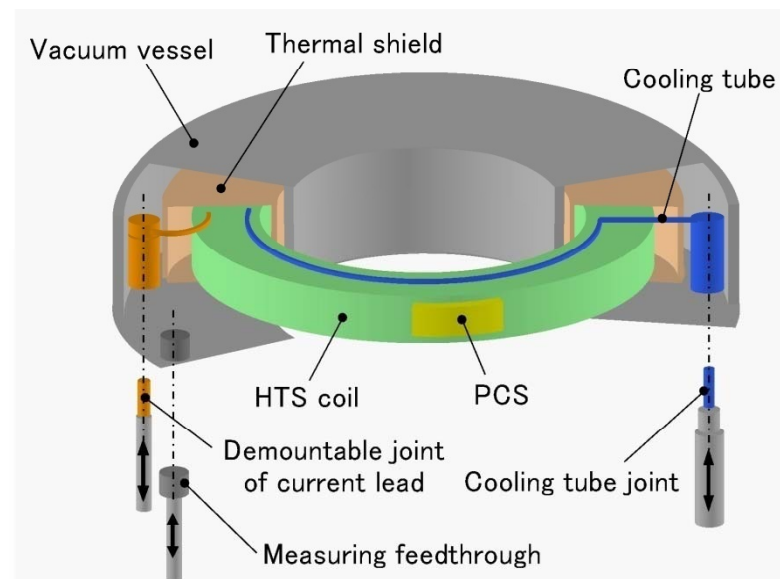
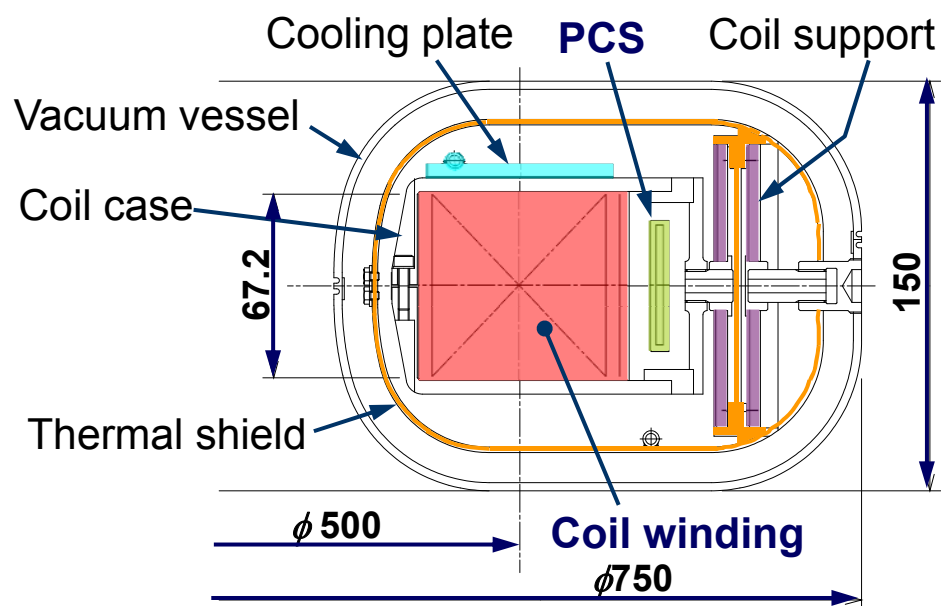
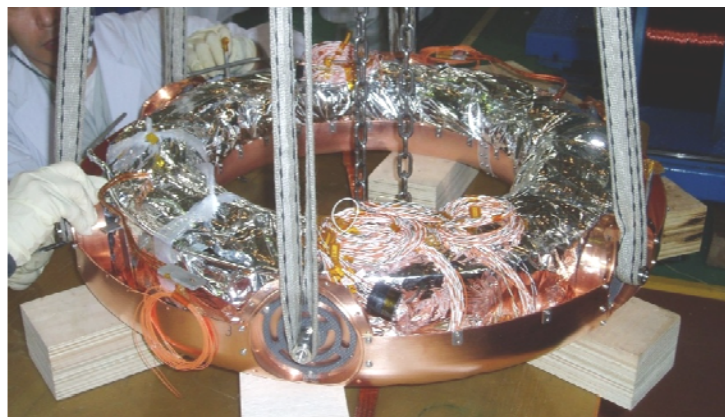
(現在, コイルキャッチャ等の機械的不具合により
コイル支持状態で実験を行っている)



2.45GHzマイクロ波によるECHプラズマ

- 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.
- 現在の装置状況は,
 - ・ECHによる高 β プラズマの基礎研究段階.
 - ・高温電子により, 局所 β 値 $>\sim 40\%$.
 - ・積極的な流れの駆動は未実施.
 - ・イオン加熱を実験準備中.
 - ・コイル昇降機等の不具合の修理中.

RT-1の高温超伝導コイル

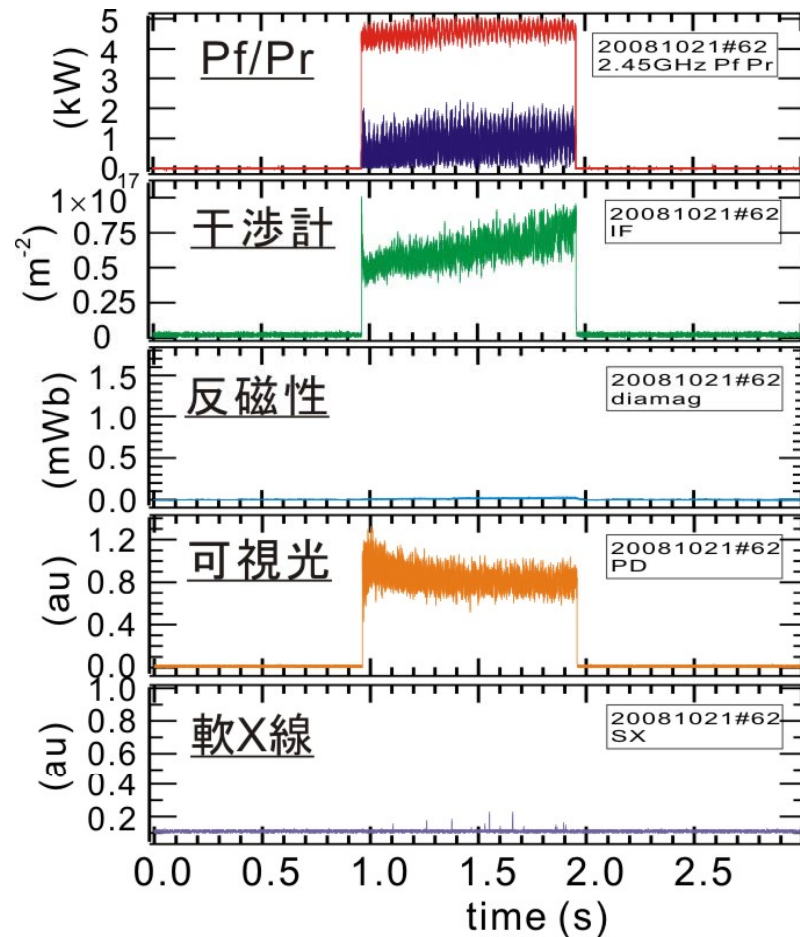


Main Parameters of the Floating HTS Coil

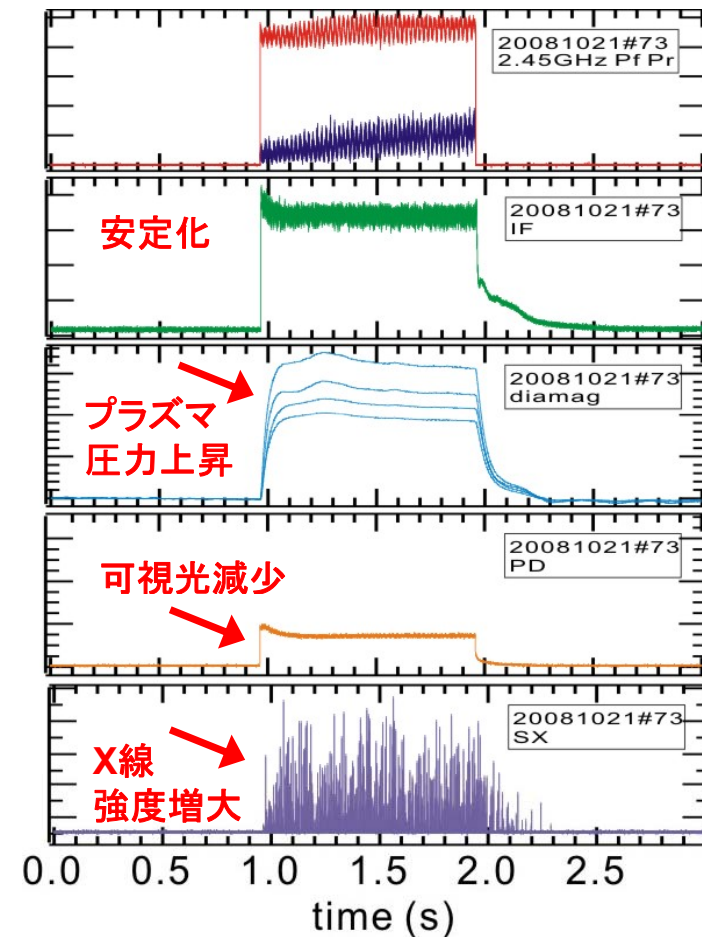
Winding method	Single pancake
Stack number of pancakes	12
Dimension Major diameter	$\phi 500$ mm
Height	67.2 mm
Operating temperature	20~30 K
Magnetomotive force	250 kA
Operating current	115.6 A
Inductance	3.3 H
Stored energy	22 kJ

- Bi-2223高温超伝導線材(PCSはYBCO)を使用した, 重量約120kgのdipole磁場コイル.
- GM冷凍機による冷却, 励磁後, 制御磁気浮上を行い, 8時間の無冷却運転が可能.

ECHによる高 β ・高温電子プラズマの生成



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

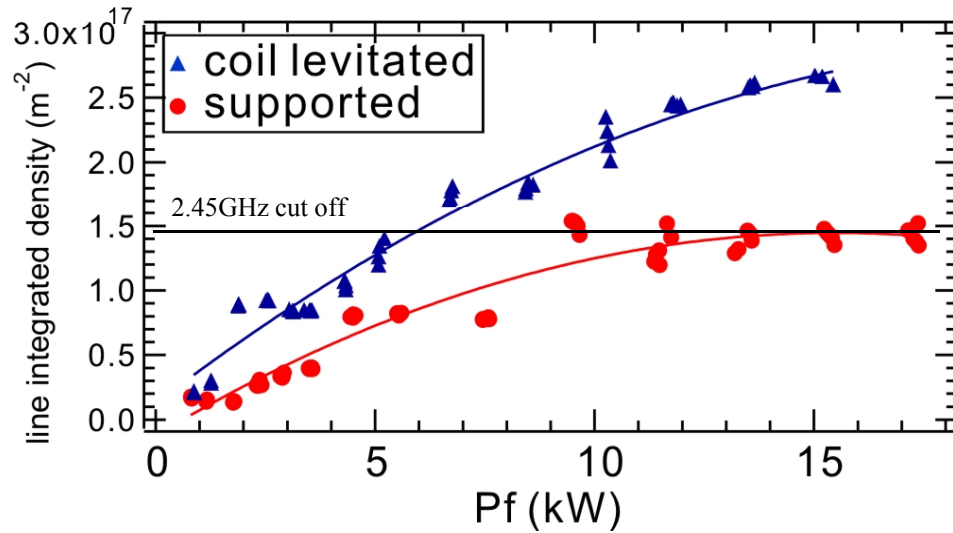


(b) 低ガス圧 $P_{H_2} = 1.3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$

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 ($\sim 10 \text{ eV}$) と高温 ($\sim 10 \text{ keV}$) 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増大する.

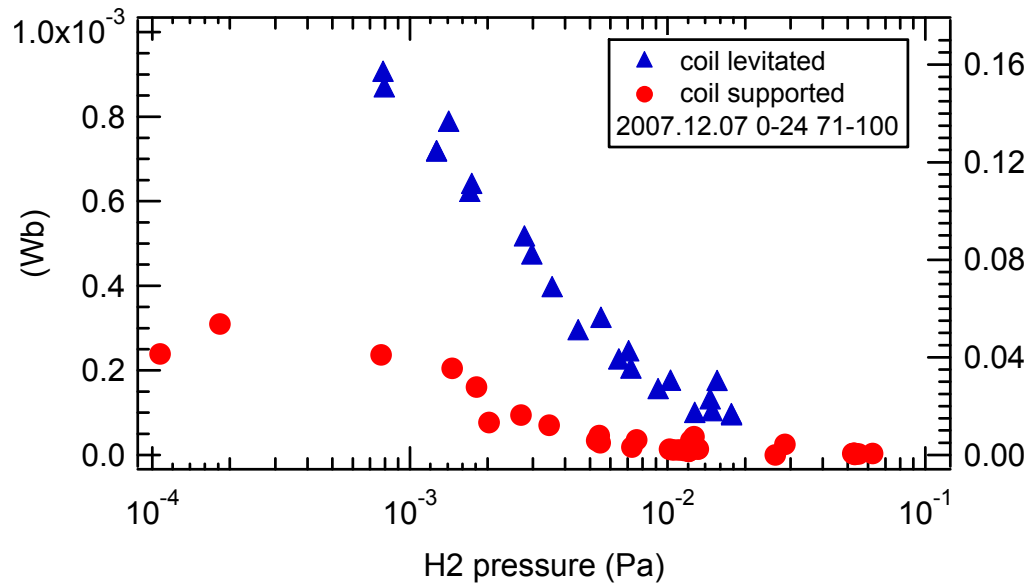
コイルの磁気浮上によるプラズマ性能の向上



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)



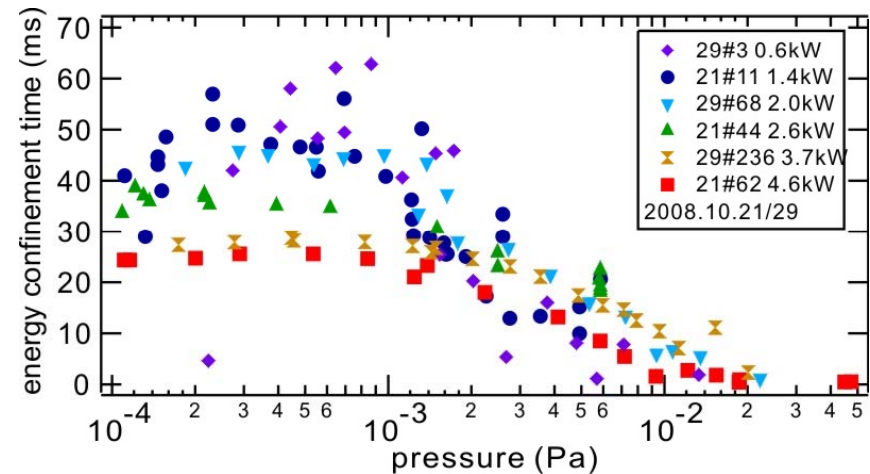
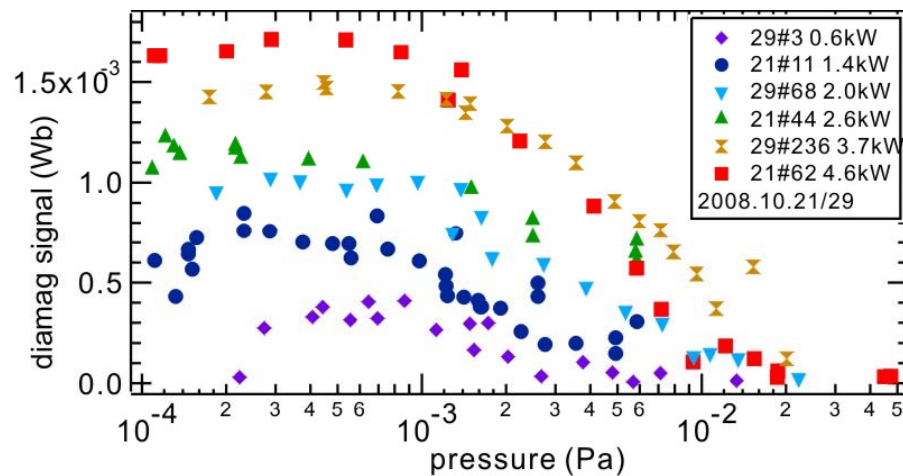
反磁性信号(β値)

- 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)

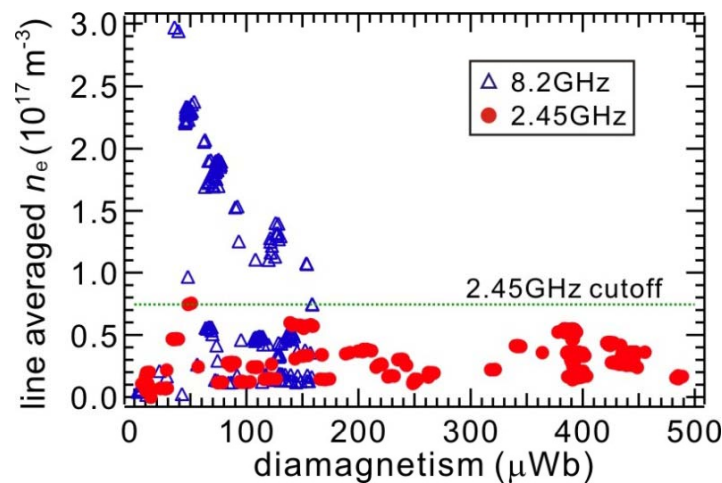
2.45GHz RFによるプラズマ生成時の
電子の線密度と反磁性信号

ECHによる高 β プラズマの閉じ込め特性



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。



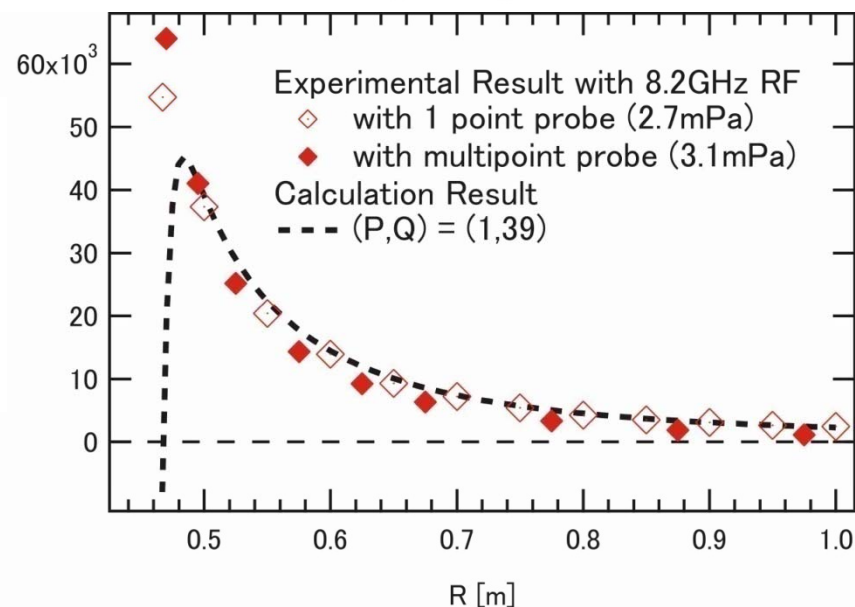
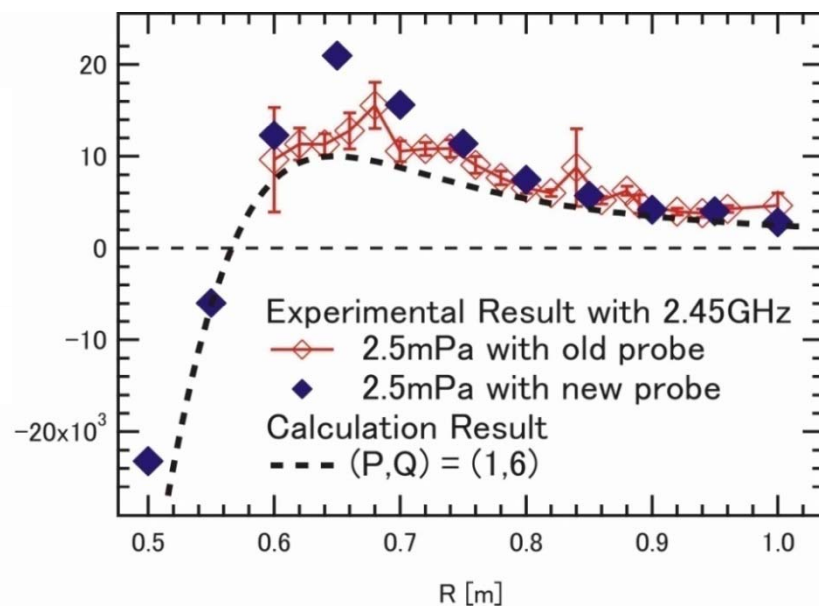
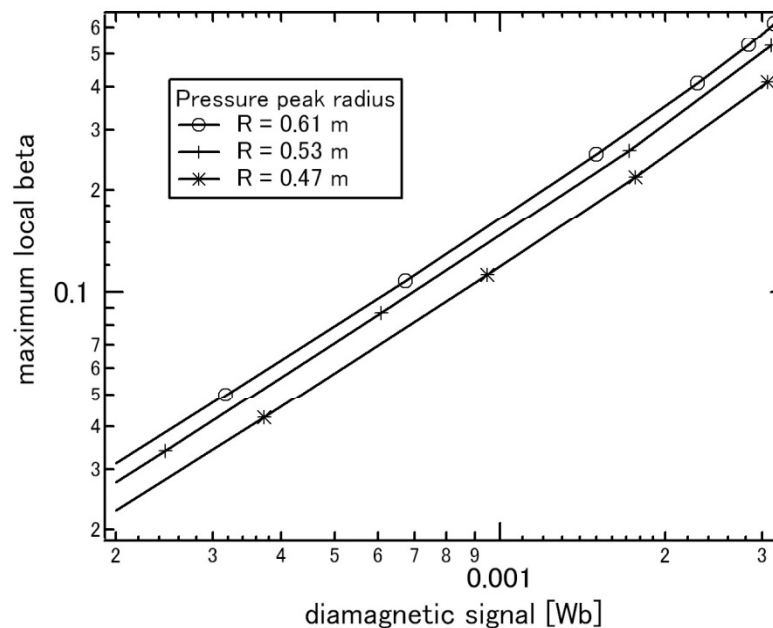
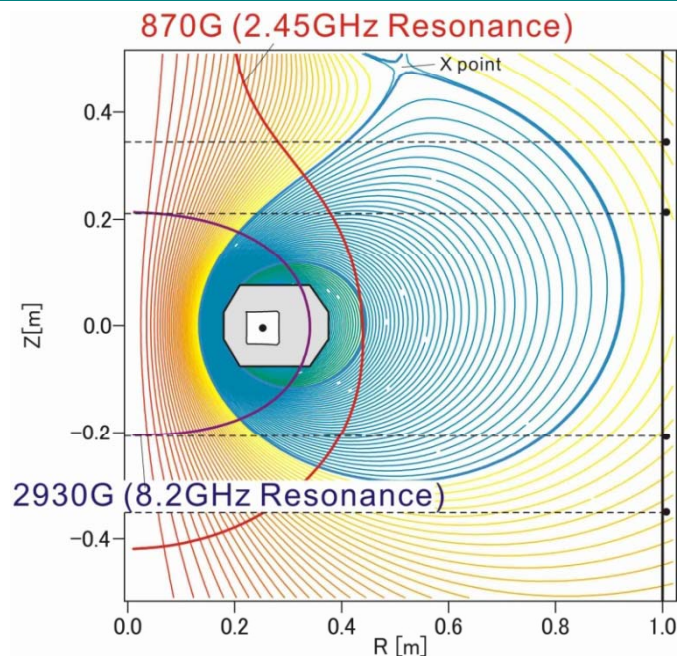
8.2/2.45GHz ECHのプラズマパラメータ

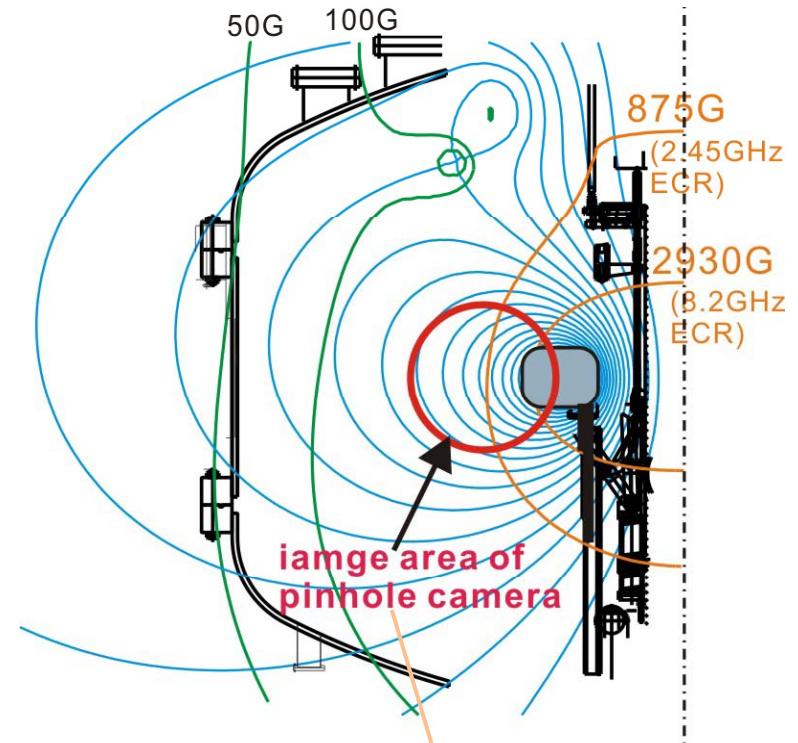
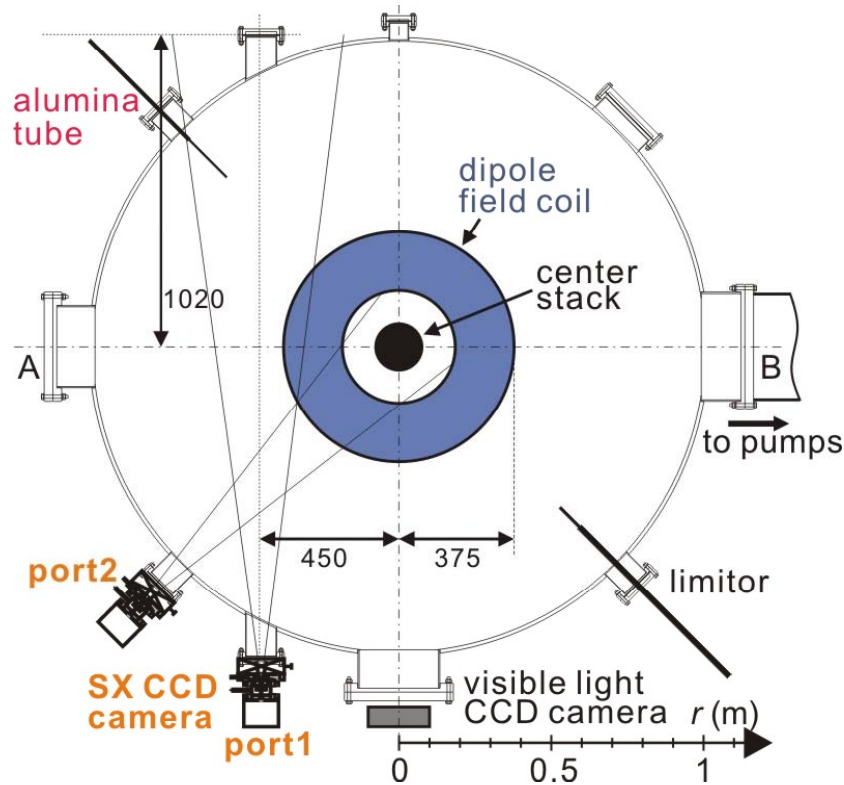
□ 放電中の入射パワーとstored energyから評価したエネルギー閉じ込め時間は最大60ms程度であり、磁気計測結果(stored energyのdecay time)による100msとほぼ一致している。

□ 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。

平衡とマイクロ波周波数による差異

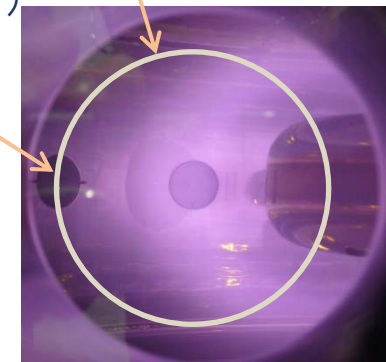
Y. Yano *et al.*, to be published.





RT-1 (top view) のカメラ導入ポート配置

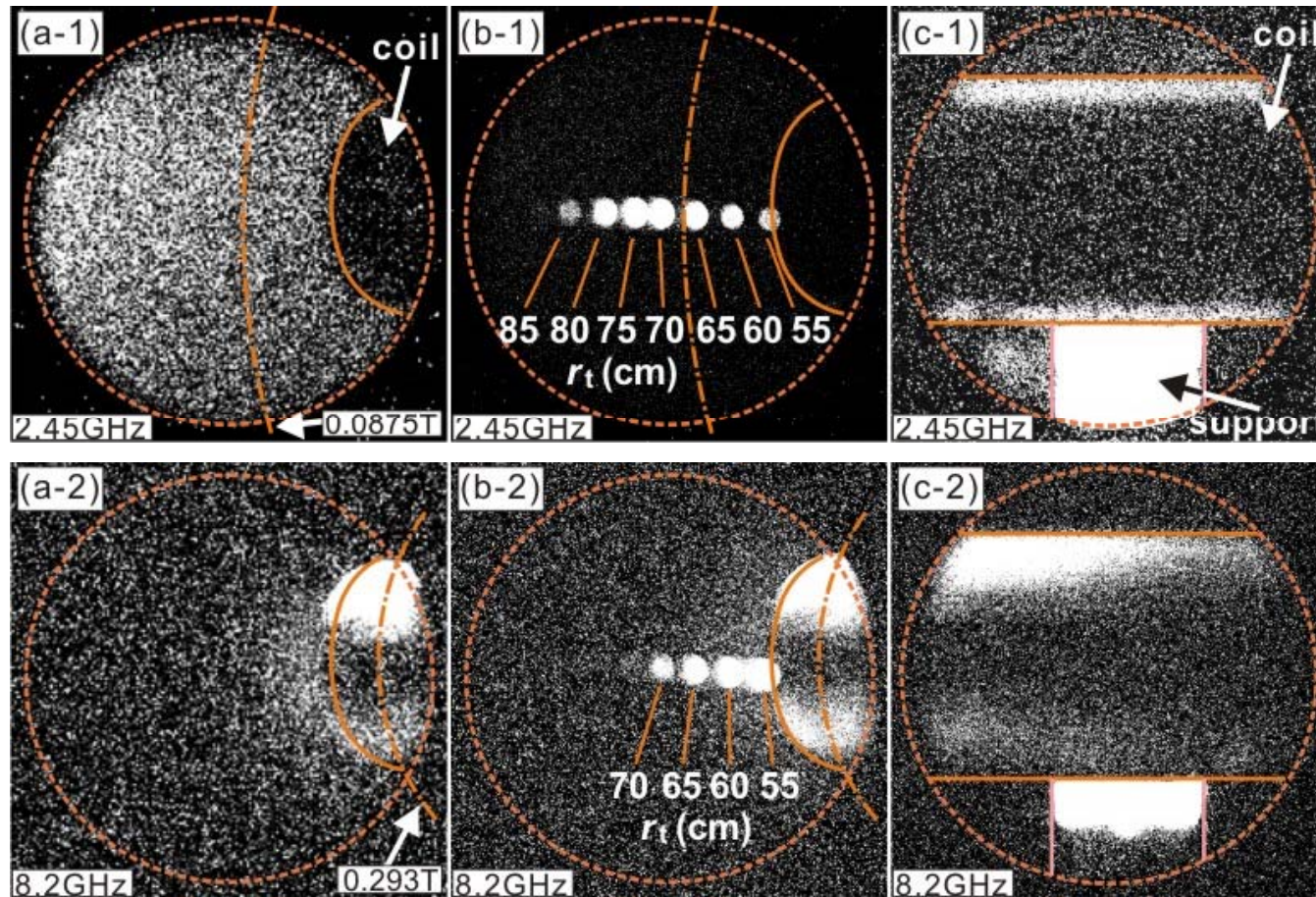
セラミック(アルミナ) チューブ



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

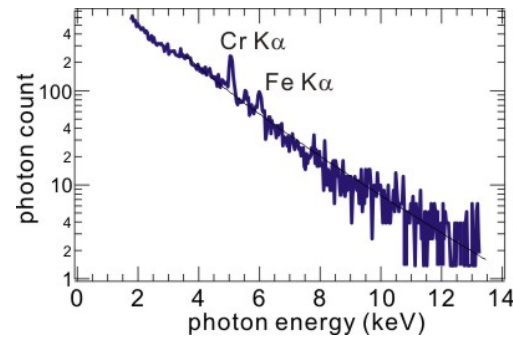
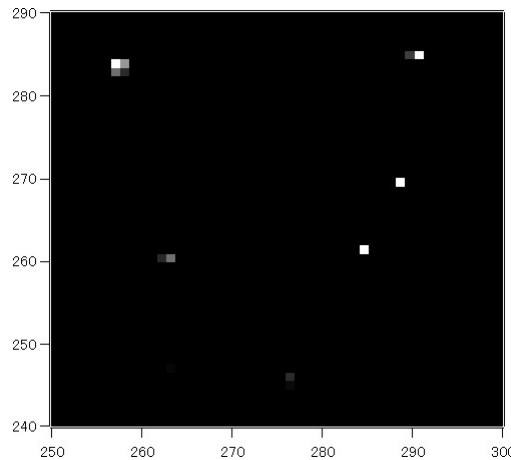


(a)上段は2.45GHz, (b)下段は8.2GHz ECHの(1) port1からのX線撮像, (2) 制動放射のtargetとしてセラミックチューブを導入して多重撮影, (3) port2からの撮像.

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.

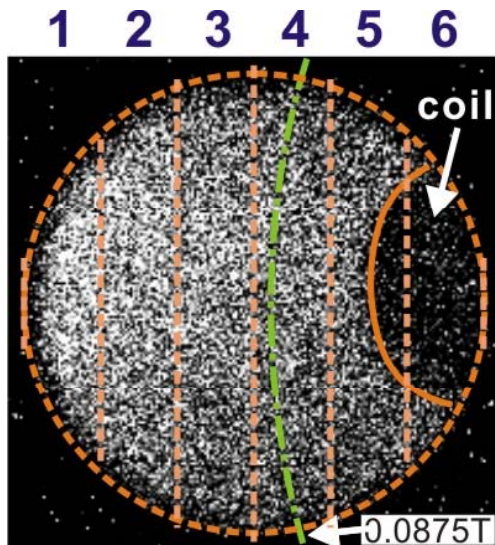
フォトンカウンティングモード*によるTe評価

10/11

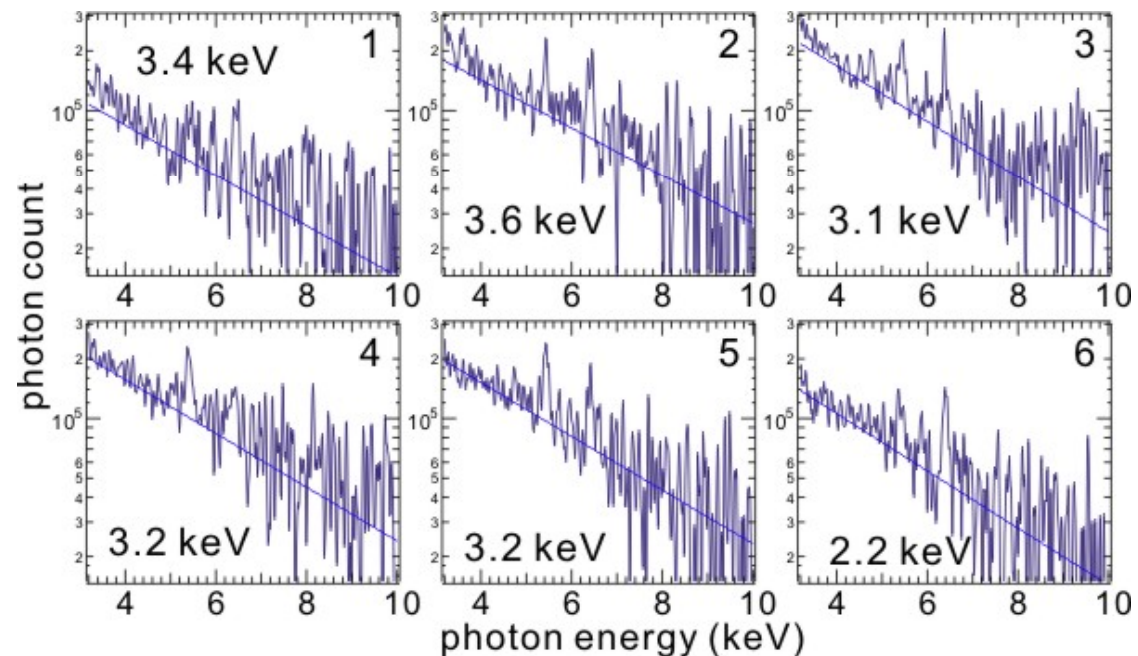


CCDイメージの拡大図と波高分析(全領域)

- ・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 *et. al.*, Rev. Sci. Instrum. **72**, 717 (2001), H. Saitoh *et. al.*, PFR **4**, 050 (2009).

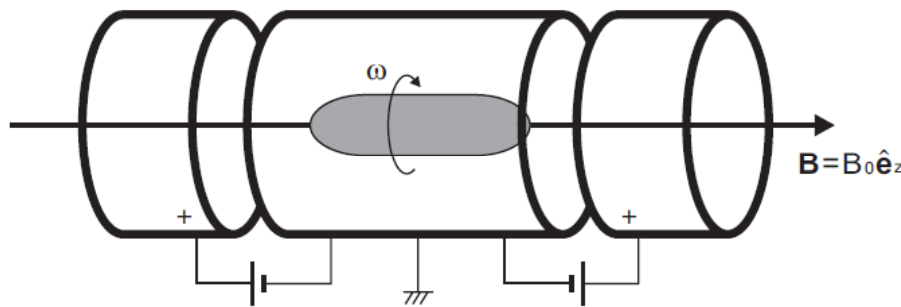
ECHプラズマ実験のまとめ

- RT-1装置において、真空容器内に磁気浮上させたdipole磁場コイルの作り出す**磁気圏型配位**中で、8.2GHz及び2.45GHzのマイクロ波によるECHプラズマ実験を実施し、以下の成果を得た。
- **コイルの磁気浮上**、**コイルの傾きの除去**や**地磁気補正**、**放電洗浄**等の効果により、過去2年間でプラズマ性能は大きく向上している：
Ne $8 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$ local $\beta > 40\%$ ($\sim 3.5 \text{mWb}$) $\tau_e \sim 100 \text{ms}$.
- 現状の実験では、プラズマ圧力はECHによる高温電子が担っており、 **$\sim 10 \text{keV}$ $1-10 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$ の高温電子**が観測される(磁場とX線計測)。
- 封入ガス圧等のプラズマ生成条件の最適化により、高温電子の割合が10%以下→50%以上へと向上する。
- 一方で、イオンの加熱は実現されておらず、高温電子が圧力の主成分。
- 今後の課題
 - ・イオンサイクロトロン加熱によるイオン温度の向上(導入準備中)。
 - ・プラズマの内部構造の理解と磁気圏型プラズマの β 限界の探索。
 - ・流速の計測と駆動、閉じ込めへの影響の評価。

3. 非中性(純電子)プラズマの長時間閉じ込め

磁気圏型配位による非中性プラズマ研究

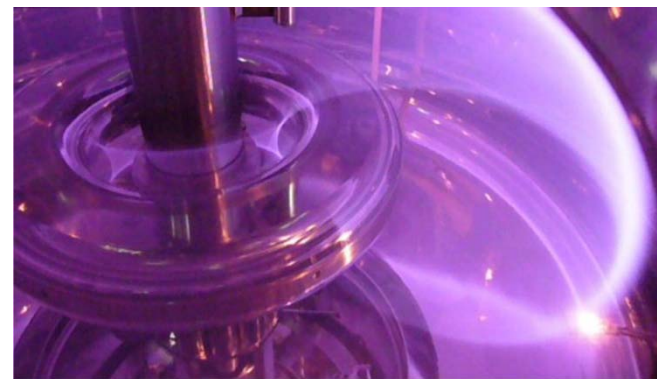
- **非中性プラズマ***: 電気的中性条件を満たさないプラズマ. **純電子**, **純イオン**等.
- 非中性プラズマ物理の研究対象
 - ・渦や結晶化等の**構造形成**, **自己組織化**. **輸送**や**波動現象**の基礎的研究.
 - ・希少な粒子の捕獲, 原子時計やイオントラップ等の**原子物理との境界分野**.
 - ・**反物質****: **電子陽電子**のpair plasmaや**反水素合成**(CPT対称性)への応用.



Penning-Malmberg trap: 直線型配位

- Trapとして**直線型の配位**が標準的.
 - ・一様磁場中でLorentz力と遠心力がbalance.
 - ・軸方向には**電位井戸**により閉じ込め.
 - ・極めて**長時間(~days)**の閉じ込めを実現.
 - ・異符号電荷の閉じ込めには不向き.

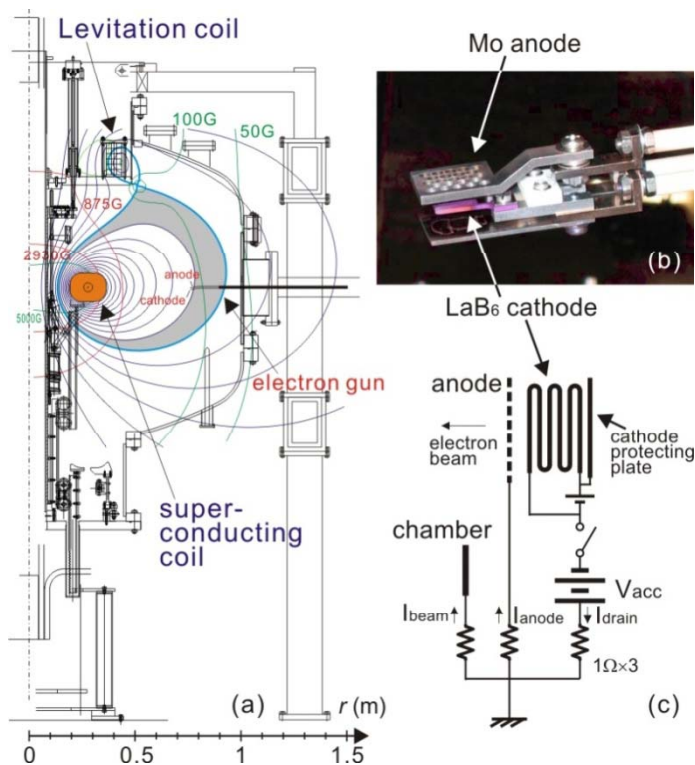
- **磁気圏型配位**の適用
 - ・電荷符号によらない**純磁場閉じ込め**が可能.
 - ・反物質閉じ込めへの応用可能.
 - ・RT-1では**純電子プラズマ**実験を実施している.
(閉じ込め特性等の基礎的性質の理解)



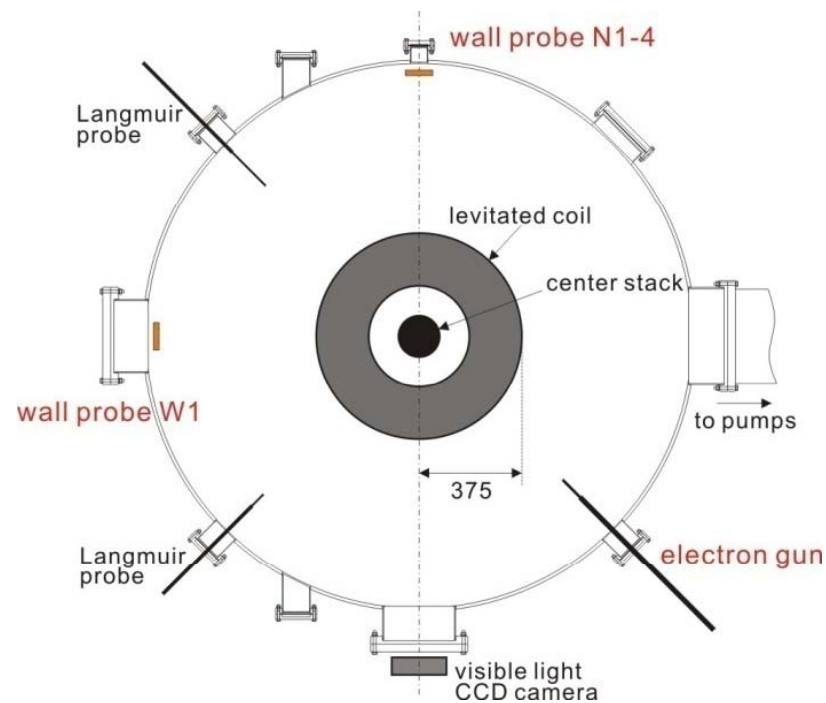
トーラス系の非中性プラズマ(RT-1)

*Dubin & O'Neil, Rev.Mod.Phys. 71, 87 (1999). ** Amoretti et al., Nature 419, 456 (2002), Gabriels et al., PRL 89, 213401 (2002).

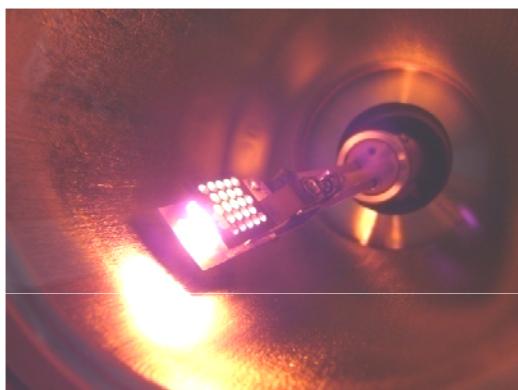
電子ビーム入射による純電子プラズマの生成



RT-1断面と電子銃の構造

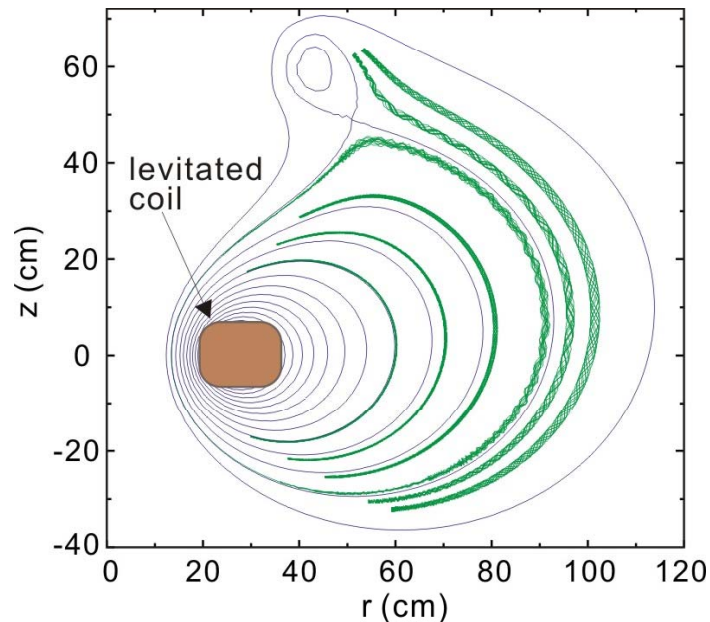


RT-1のtop viewと計測器等の配置

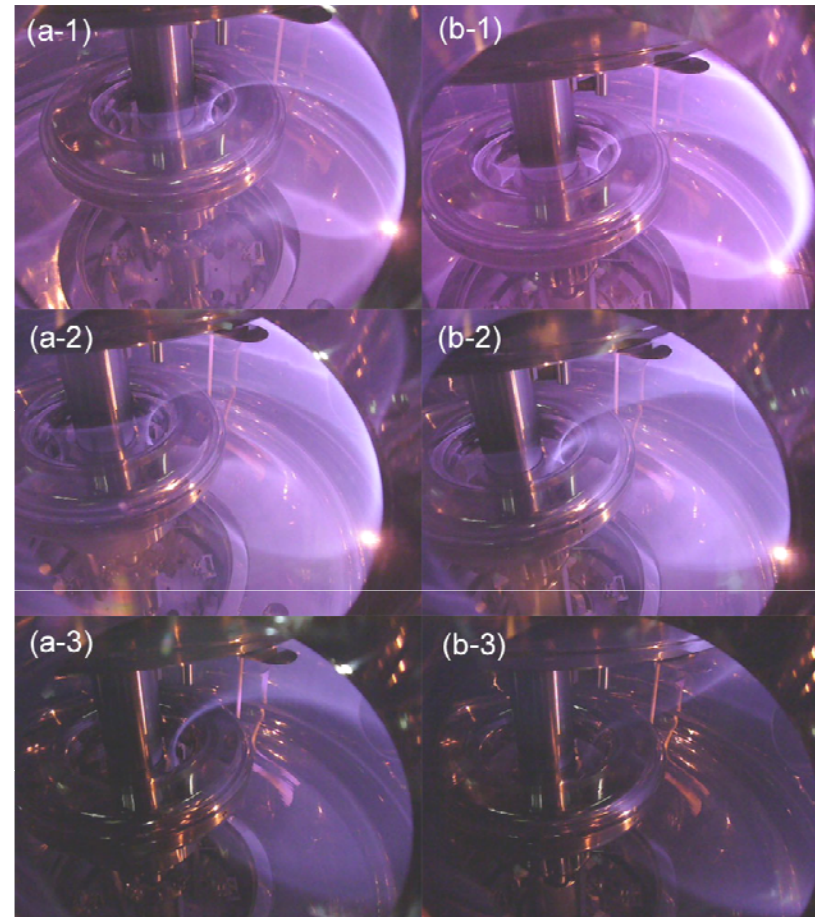


- RT-1では、閉じ込め領域の周辺部に配置した電子銃から静磁場中に電子を入射する.
- 電子はLaB₆熱カソード(-V_{acc})とアノード(真空容器電位)間で加速される.

電子入射による磁気面の可視化

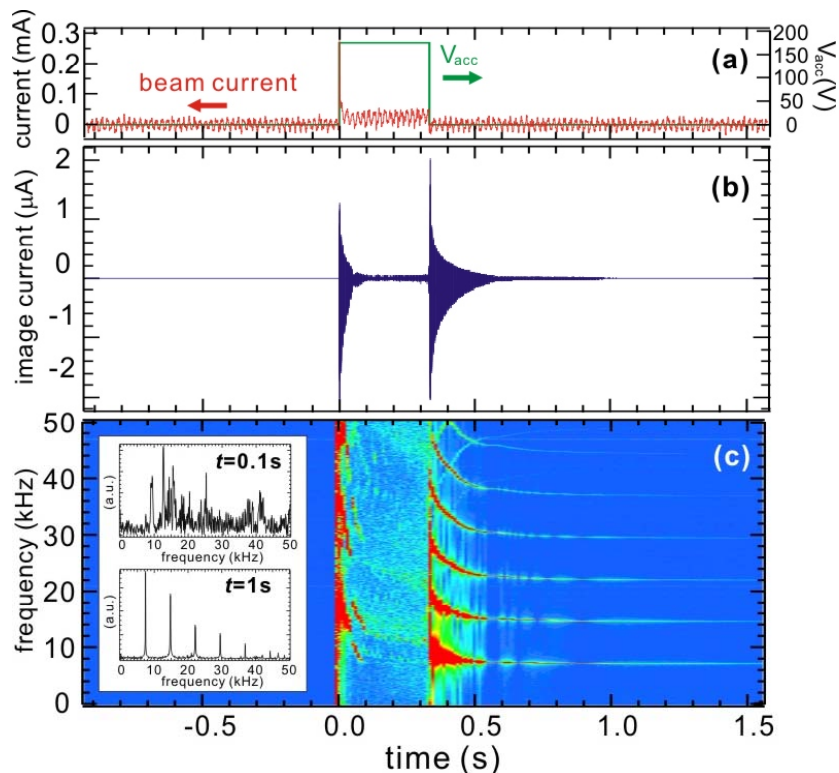


$$P_{\theta} = \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = mr^2 \dot{\theta} + qrA_{\theta} = \text{const.}$$
$$L = \frac{mv^2}{2} + q\mathbf{v} \cdot \mathbf{A} - q\phi$$
$$d \leq \left| \frac{mr\dot{\theta}}{qB_p} \right|$$

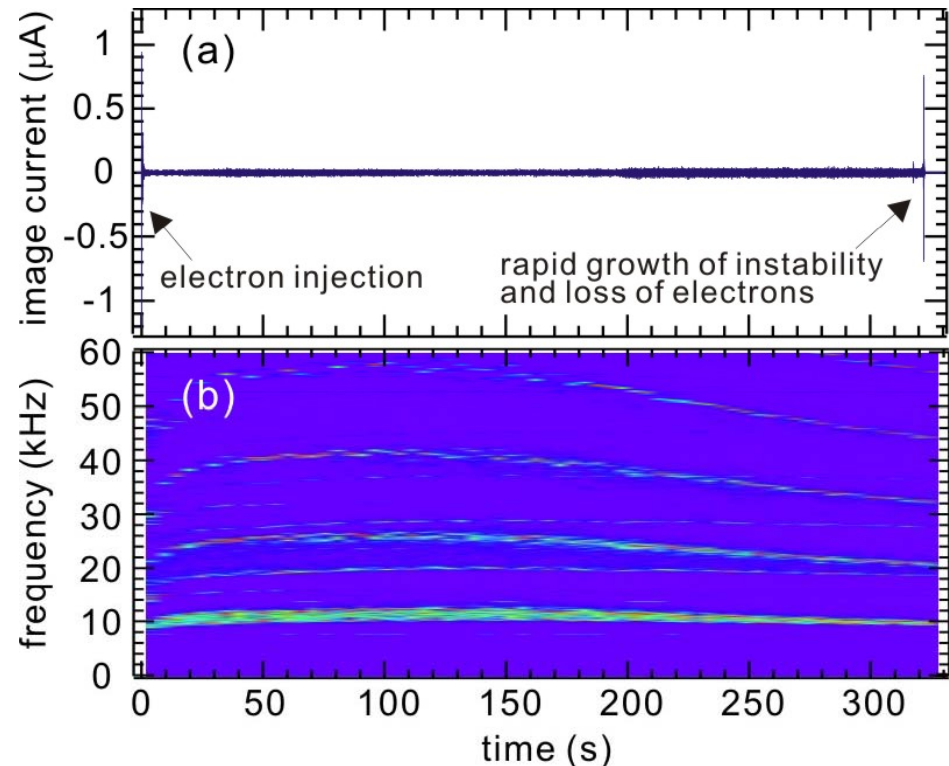


- プラズマ閉じ込め領域のエッジ部 ($r=75\text{cm}$) に配置したカソードより、 0.1s の電子入射。電子入射後は、カソードの加熱も停止。
- 電子のLarmor半径は最大で 6mm 程度であり、単一粒子軌道は磁気面とほぼ一致している。

揺動の安定化と長時間閉じ込めの実現

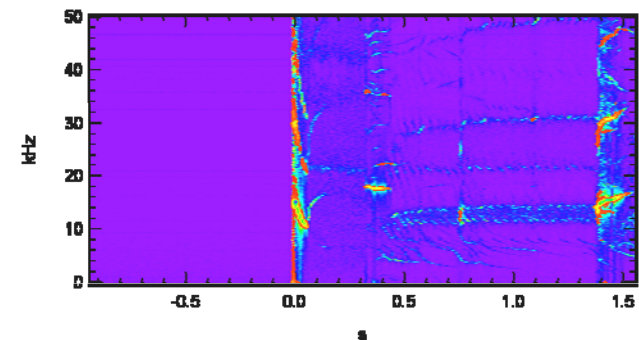


電子入射終了後のプラズマ安定化

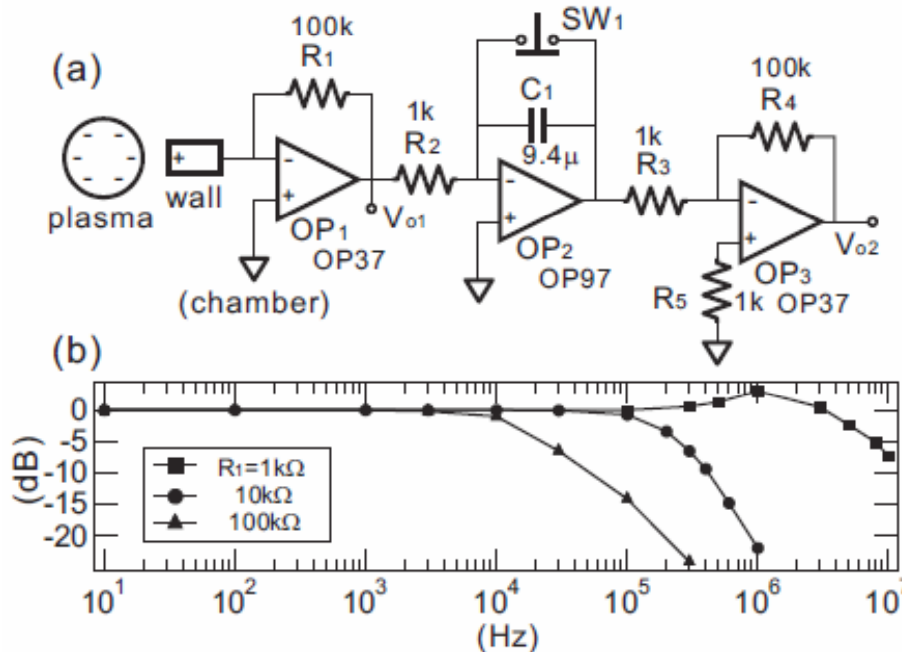


長時間閉じ込め中の静電揺動

- 電子の入射中と停止直後, 揺動は複数のbroadな周波数ピークを持つ大振幅の静電波形を持つ.
- コイル磁気浮上時, 電子入射の停止後に揺動は安定化し, 300秒以上の安定閉じ込めが実現される.
- 安定閉じ込め中, 極めて非一様な磁場配位でありながら, 剛体回転を示唆する揺動が観測される.



Wall probe (金属フォイル) による非接触のプラズマ計測



Wall probeによる静電揺動及び電場計測回路と、揺動計測回路の周波数特性.

1段: 鏡像電流を増幅する電流アンプ (wallは真空容器と同電位に保たれる).

2段: 鏡像電荷 (\propto 電場強度) を求める積分回路. ドリフト対策にスイッチを使用.

3段: 信号増幅用.

これらにより、静電揺動波形と電場強度の同時測定が可能.

- 安定閉じ込め中, probeの導入はプラズマを破壊してしまうため, 適用不可能.
- 長時間閉じ込め中の空間分布を把握するために, 電場を計測するwall probeを使用.
- 複数点で電場を計測し, 観測結果を再現するプラズマ分布を再構成する.

・Wallプローブのプラズマに対向する面に誘起される鏡像電荷密度は

$$\sigma_i = -\epsilon_0 E_r$$

であり, 図の計測回路により鏡像電流を積分して得られる

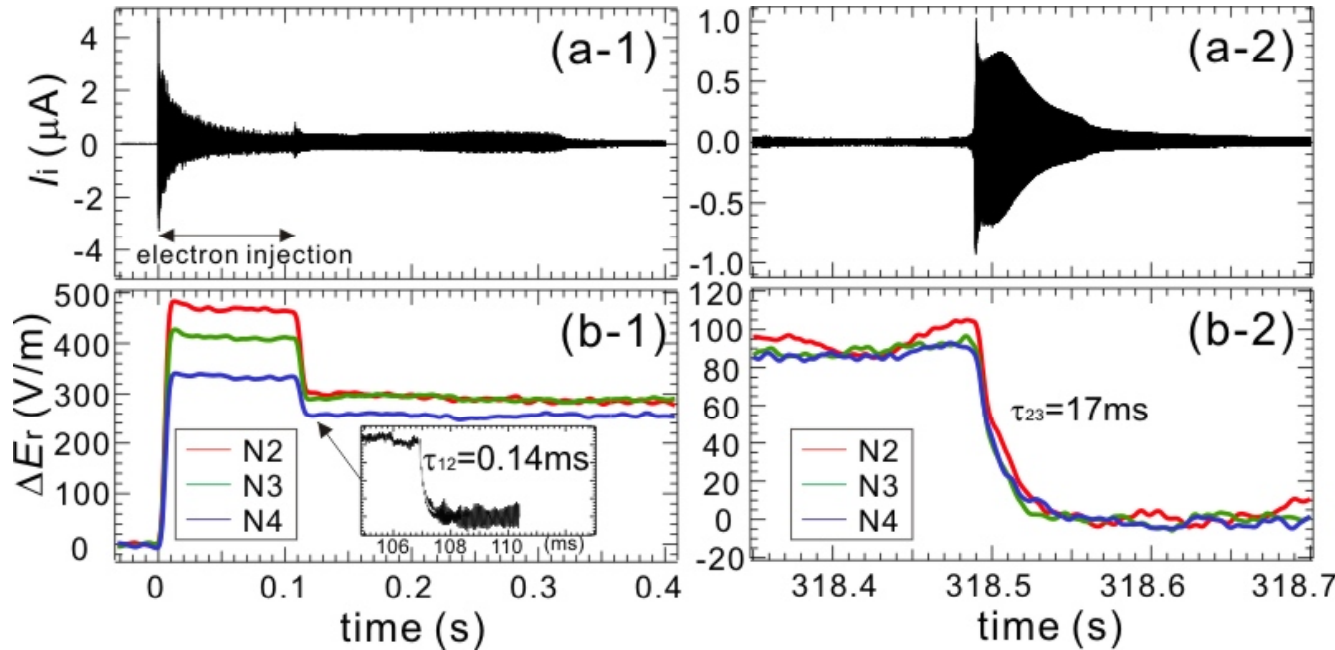
$$V_{o2} = -\frac{R_1 R_5}{C_1 R_2 R_3} \int I_i dt = -1.06 \times 10^{10} Q_i$$

を用いると, 電場強度は

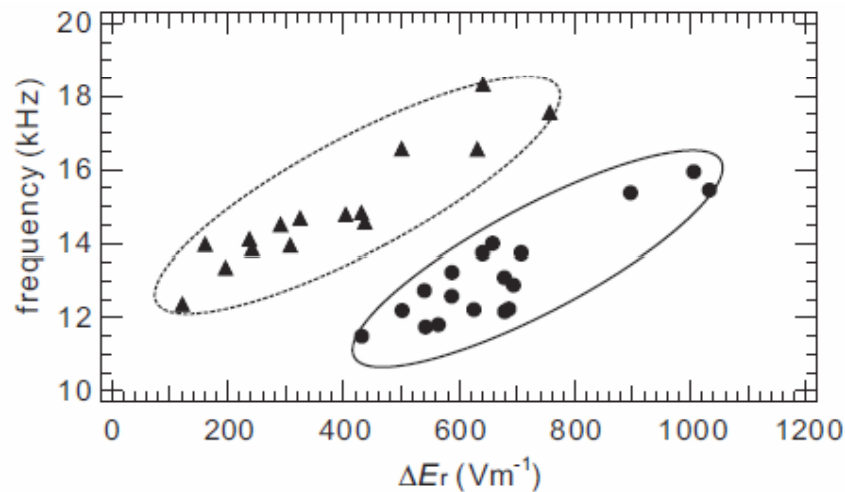
$$E_r = -\int I_i dt / \epsilon_0 S = 5.33 \times 10^3 \times V_{o2}$$

で与えられる.

Wall probe計測結果(電子入射時と閉じ込め終了時)



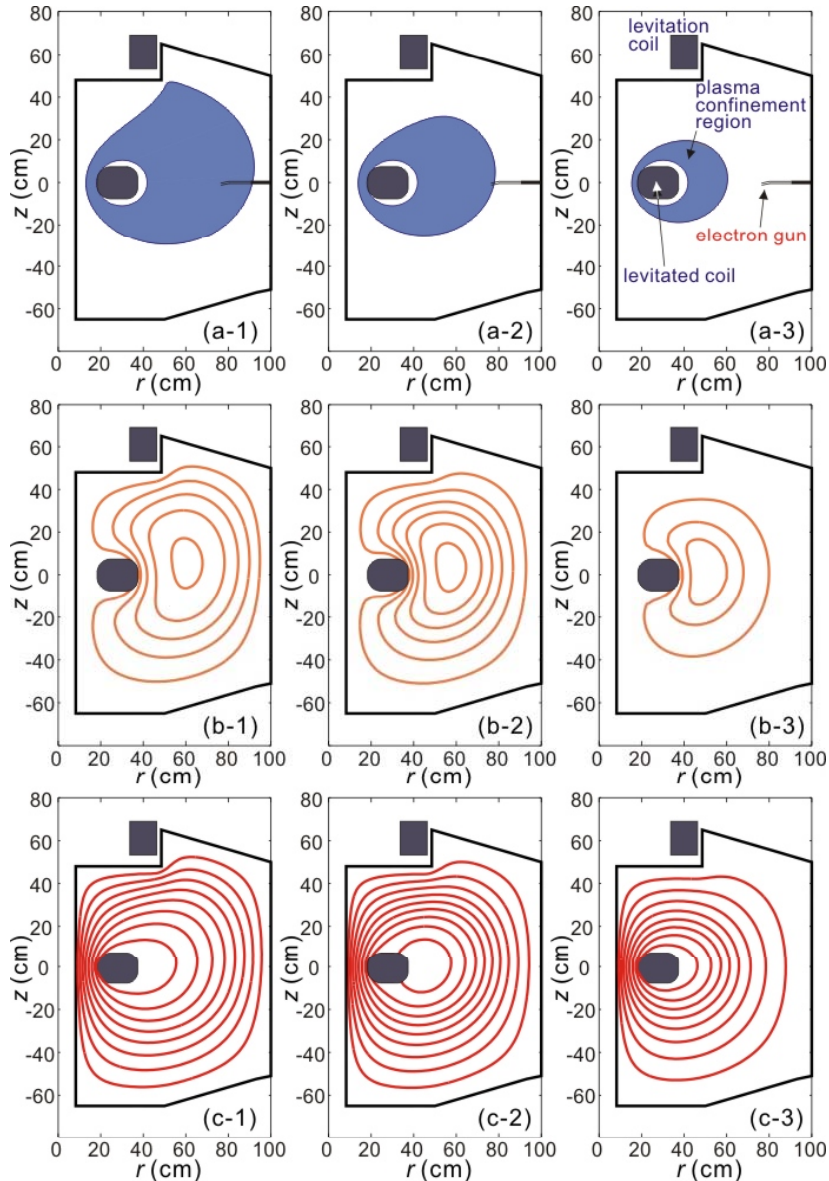
(1)電子入射中と
(2)閉じ込め終了
時の(a)静電揺動
と(b)電場強度.



- ・揺動周波数と電場強度は、電子入射中と安定閉じ込め中で異なる依存性を持ち、空間分布の変化を示唆している。
- ・ゼロ点からのオフセットから、wall probeでは測定不可能な静的な電場成分の存在が示唆される。

電子入射中(●)と安定閉じ込め時(▲)の周波数とwall probe計測による電場の関係.

各段階の電子プラズマの空間分布



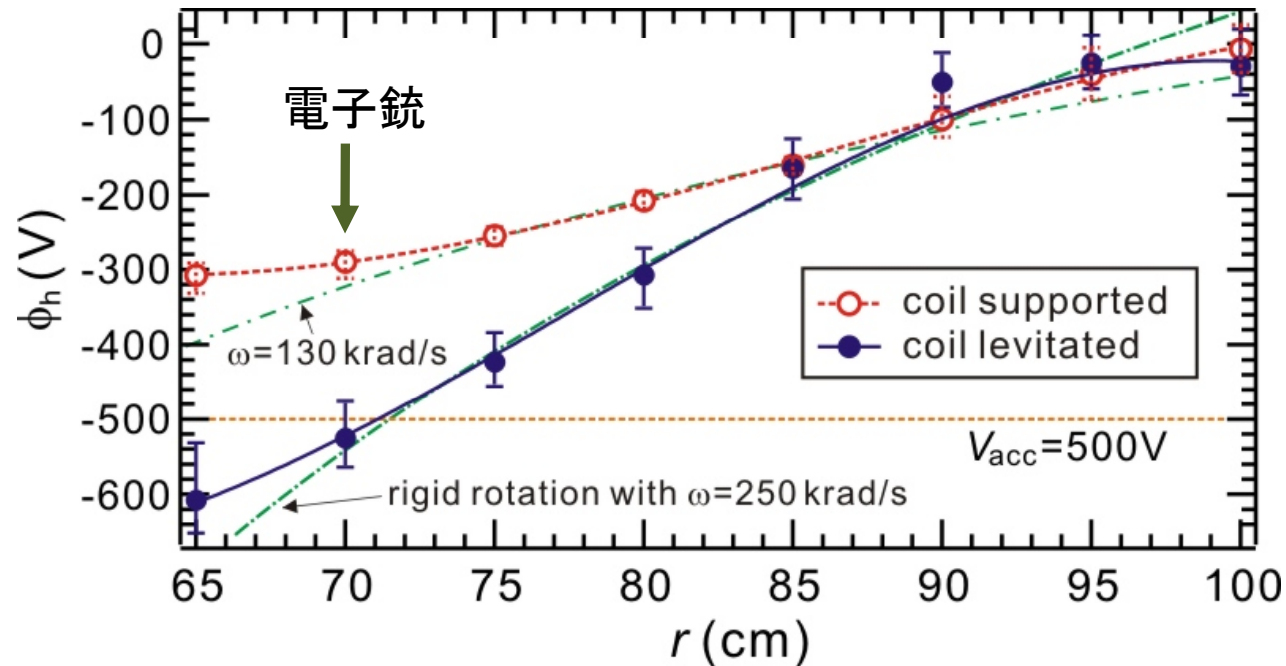
- 電子入射中には、セパトリクス内部全域にプラズマが分布している。
- 電子入射停止後に、電子銃構造物と交差する領域の電子が失われるが、それよりも内側で電子の安定閉じ込めが実現される。
- 単一粒子軌道(初期磁気面に近接)と異なり、強磁場側に進入する粒子が存在する。
- 安定閉じ込め時の等電位面は、磁気面の形状ほぼ一致している。

・各場合に対し、観測結果と最も一致するプラズマの外側境界は、91.6cm, 77.9cm, 60.5cm.

・各段階で、観測結果を再現する一様電子密度は、それぞれ(1) $1.4 \times 10^{11} \text{m}^{-3}$, (2) $2.4 \times 10^{11} \text{m}^{-3}$, (3) $1.4 \times 10^{11} \text{m}^{-3}$ である。

(1)入射中, (2)入射停止直後, (3)閉じ込め終了直前の, (a)プラズマ分布, (b)非定常成分の電位, (c)総電位.

電子入射中の空間電位分布



コイル支持状態及び磁気浮上時の内部電位分布 ($z=0$ cm)

- 流れ(トロイダル方向の $E \times B$ ドリフトによる)は, 電子入射中にはシヤ流であり, 特にコイル支持状態では強いシヤ流(複数のピークを持つ周波数スペクトル).
- 電子銃より内側の強磁場領域では, 加速電位を上回る空間電位が形成される.
- 電子が初期加速電位を超えるエネルギーを得た事を示している.
- 揺動に伴う軸対称性の破壊による径方向輸送の過程で, 第一・第二断熱不変量の保存により, エネルギーが増大して強磁場側への侵入が起こった事を示す.

純電子プラズマ実験のまとめ

- RT-1装置において、真空容器内に磁気浮上させたdipole磁場コイルの作り出す磁気圏型配位中で、**非中性(純電子)プラズマ**実験を実施し、以下の成果を得ている。
- コイルの磁気浮上により、従来のProto-RTを上回るパラメータを得た：
Ne $1-10 \times 10^{11} \text{m}^{-3}$ $\tau > 300 \text{s}$ 安定閉じ込め中にコヒーレントな揺動。
- 多点電場計測によれば、静電揺動が非安定時、粒子の強磁場側への radial diffusion が起こり、安定閉じ込め領域に電子雲が生成される。
- **強磁場領域への粒子侵入とエネルギーの増大**は、静電位計測からも確認され、空間電位は初期の加速電位を上回る。
- 磁気圏型配位の極めて非一様な磁場強度にもかかわらず、剛体回転する安定な平衡の存在を示唆する閉じ込め特性を示す。
- 今後の課題
 - ・粒子捕獲率の向上(希少粒子への適用性)。
 - ・電子プラズマ内部の、より詳細な内部構造と平衡の理解。
 - ・温度計測, 電子入射方法, 永久磁石によるコンパクトトラップの開発。