物理学会第65回年次大会20pTJ-3

# トロイダル純電子プラズマの wall probeを用いた空間分布計測

東大新領域 齋藤晴彦,吉田善章,森川惇二,矢野善久,水島龍徳,小林真也

目次 1.研究の背景と目的.概要 2. RT-1装置とトロイダル電子プラズマの生成 3. 安定閉じ込め 4. 強磁場側への内向き輸送の観測

5. まとめと今後の課題





- □磁気圏型配位Ring Trap-1(RT-1)\*では、磁気浮上させた超伝導コイルによる dipole磁場中で、トロイダル非中性プラズマの安定閉じ込めを目指している.
- □ コイルの磁気浮上と超高真空適用の効果により、RT-1では密度10<sup>11</sup>m<sup>-3</sup>の トロイダル純電子プラズマの300s以上の安定閉じ込めに成功している.
- □ RT-1では, 電子は閉じ込め領域周辺部に配置した電子銃から入射され, ビーム入射停止後に安定な閉じ込め配位が形成される.
- □ 電子入射中の電位分布計測に使用されるLagmuirプローブはプラズマに 擾乱を与えるため、安定閉じ込め中の空間分布計測には使用出来ない、 本研究では、wall probeと積分回路により、トロイダル非中性プラズマの電場 強度の直接計測を実施し、それによりプラズマの空間分布の推定を行った\*\*\*.
- □ プラズマの揺動により、粒子の第三断熱不変量(正準角運動量)は保存されず、 電子は内向きに輸送され強磁場領域で安定な閉じ込め配位を形成する.
- □ Dipole磁場の非一様な磁場強度分布にもかかわらず, 剛体回転を示唆する コヒーレントな静電揺動が観測される.

\*Yoshida, Ogawa, Morikawa et al., in Non-neutral Plasma Physics III (1999), PFR 4, 020 (2009); \*\*PFR 4, 054 (2009).

# 磁気圏型装置RT-1における純電子プラズマ生成 3/10



#### RT-1装置の断面図と電子銃の構造

電子プラズマ生成: LaB6カソード電子銃 測定: emissive静電プローブ(空間電位と電子束) wall probe(金属foil + current amplifier)

磁気計測と高β 平衡: 矢野 21aTE-3 イオンの温度計測と加熱計画: 水島 20pTK-10



RT-1内部で可視化された磁気面

>磁気浮上させたdipole磁場コイルにより 惑星磁気圏型配位を生成する装置.

▶主要な研究課題は - 先進核融合に適した高βプラズマの生成 -トロイダル非中性プラズマの閉じ込め

- ▶閉じ込め領域の周辺部に配置した電子銃 から電子ビームを供給する.
- ▶電子は初期エネルギーeV<sub>acc</sub>で静磁場中 へと入射される(r<sub>L</sub><~10mm).</p>

# 電子プラズマの安定化と長時間閉じ込め



▶ビーム入射時, プラズマは大振幅(Ē/E<sub>0</sub>~50%)でbroadなピークの静電揺動を持つ.

▶ビーム入射停止後, プラズマは安定化(Ê/E₀<1%)し, 300秒以上の閉じ込めを観測.</p>

➢Dipole磁場の極めて非一様な磁場強度にもかかわらず、トロイダル方向の剛体回転 を示すコヒーレントな揺動モードが観測される。

# 計測法: Wall probeによる静電揺動と電場計測 5/10



揺動と電場の同時計測用のwall probe回路

- ▶電子入射中に使用される静電プローブは、 プラズマに与える擾乱が大きく閉じ込め を破壊するため、長時間閉じ込め中には 適用出来ない。
- ▶揺動信号に加えて電場強度を同時測定. (積分時間の上限~5s).

$$V_{o2} = -\frac{R_1 R_5}{C_1 R_2 R_3} \int I_i dt = -1.06 \times 10^{10} Q_i$$
$$E_r = -\int I_i dt / \varepsilon_0 S = 5.33 \times 10^3 \times V_{o2}$$





#### Wall probeによる非接触の密度分布推定



(a)想定したプラズマの各境界と, (b) r=1m の真空容器壁上の鏡像電荷密度.



外側の境界を変化させた時, (a) 各wall上に 誘起される鏡像電荷と(b)  $(Q_{N2}/Q_{N4})^2 + (Q_{N3}/Q_{N4})^2$ ,

- ▶プラズマ形状として以下を仮定:
  - ・トロイダル対称性を持ち,一様密度である.

- ・プラズマの境界は真空磁気面と一致する.
- ·内側の境界は図の点線で与えられ、プラズマは内部導体と接しない.
- ▶ これらを満たす形状のうち, 計測結果を満た す外側の境界位置(r=r<sub>0</sub> at z=0)を探す.
- ▶ 外側の境界の変化により真空容器上の鏡像 電荷密度は変化し, wall probeで検出される.
- ▶各wall上の電荷Q<sub>N2</sub>, Q<sub>N3</sub>, Q<sub>N4</sub>とr=r<sub>0</sub>の対応を 得るために、 (Q<sub>N2</sub>/Q<sub>N4</sub>)<sup>2</sup> + (Q<sub>N3</sub>/Q<sub>N4</sub>)<sup>2</sup> を計算.
- ▶ 現在の実験ではwall数が少なく、特にコイル 近傍の分布の感度は非常に低い。

#### 閉じ込めの各段階の密度分布



各wall上で、電場の実測値と、仮定に 基づいて推定した電子雲の作る電場

### 電子入射中の空間電位分布



▶ 電子入射中, 電子銃よりも内側(強 磁場側)では, 加速電位V<sub>acc</sub>を上回る 電位が観測される.

- ▶電子銃付近では,空間電位は電子銃の加速電位とほぼ等しい.
- >プラズマの静電揺動が大きい時, V<sub>s</sub> の大きさは顕著にV<sub>acc</sub>を上回る傾向 が見られる.
- ≻揺動に伴う強磁場側への輸送による 粒子のエネルギー増大を示している.



#### 電子入射中のプラズマの内部構造



揺動周波数の径方向分布(10ch静電プローブ).

各chで測定した電流揺動波形(位相差無し).



>プラズマ閉じ込め領域及び外部のwall probeで,静電揺動の周波数は一定. (電子入射中の同時計測)

>プラズマがほぼ定常的に生成されている時, 各揺動信号は位相差を持たない.

▶トロイダル方向に剛体回転する平衡の存在 を示唆している.

#### まとめと今後の課題

- □ RT-1装置(磁気浮上させたdipole磁場コイルによる磁気圏型配位)で,
  非中性(純電子)プラズマの内向き輸送と安定閉じ込めを観測した.
  - (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 1-10×10<sup>11</sup>m<sup>-3</sup> τ>300s 安定閉じ込め中にコヒーレントな揺動)

- □ 安定閉じ込め中のトロイダル非中性プラズマの分布推定方法として, 多点wall probeを用いた電場計測法を提案した.
- □ 閉じ込め領域の周辺部から入射した粒子は強磁場側へと内向き輸送 され、安定閉じ込め領域に安定な平衡配位が生成される.
- □ <u>強磁場領域への粒子輸送とエネルギーの増大</u>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.
- 口今後の課題
  - ・揺動に伴う径方向輸送の定量的な評価.
  - ・トロイダル電子プラズマのより詳細な内部構造の理解.
  - 高効率の粒子入射方法の開発.