

トロイダル非中性プラズマの静電揺動特性

東大新領域, 東大工^A

齋藤晴彦, 吉田善章, 森川惇二^A, 渡邊将

目次

1. 研究背景と本研究の目的:

トロイダル磁気面配位における非中性プラズマ

2. 実験装置Proto-RTの概要と計測法

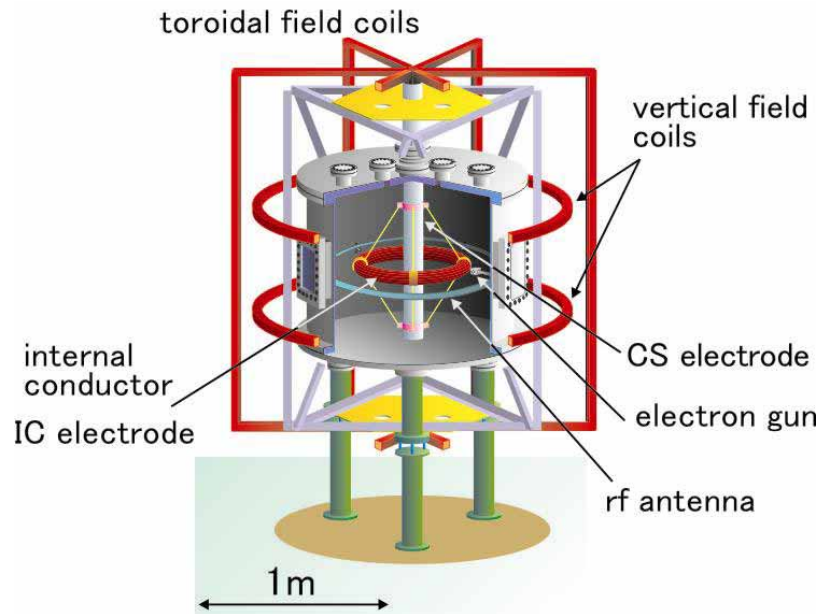
3. 純電子プラズマ:

トロイダル磁場の追加による磁気シヤーの効果

4. 2.45GHz ECH実験

5. まとめと今後の課題

トロイダル磁気面配位における非中性プラズマ研究



Proto-RT (Prototype-Ring Trap) 装置の俯瞰図

vacuum vessel	inner radius	59 cm	
	height	90 cm	
	base pressure	5×10^{-7} Torr	
internal conductor	major radius	30 cm	
	minor radius	4.3 cm	
	coil current	10.5 kAT	50kAT
vertical field coil	major radius	90 cm	
	coil current	$5.25 \text{ kAT} \times 2$	
vertical field coil	coil current	30 kAT	

Proto-RTの磁場コイル等の装置パラメータ

研究背景: トロイダル非中性化プラズマ

- ・磁力線方向に静電井戸を不使用
- ・任意の非中性度のプラズマを閉じ込め可能

内部電場・流れを持つプラズマの生成,
各種荷電粒子の同時閉じ込め

トロイダル磁気面配位の使用*

dipole磁場, 垂直磁場, トロイダル磁場

- ・高速流を伴うプラズマの平衡の検証
(double Beltrami state**)
- ・反物質等の荷電粒子の混合物の閉じ込め

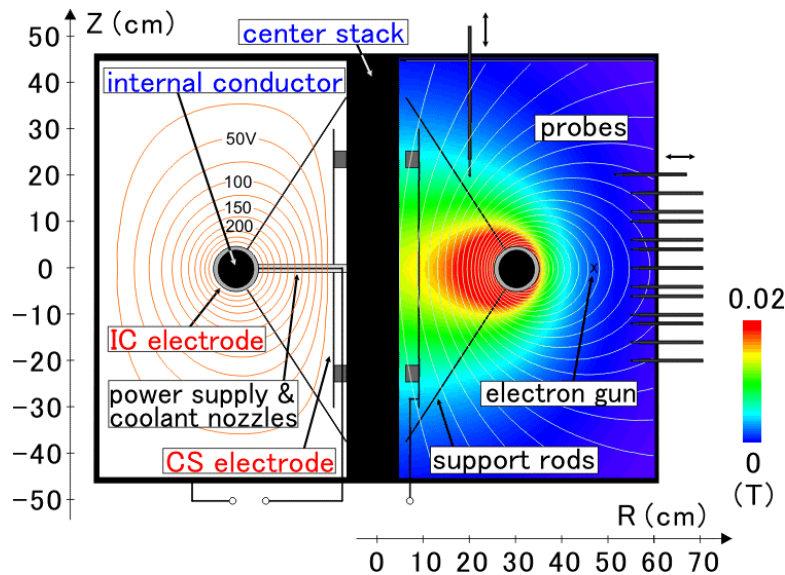
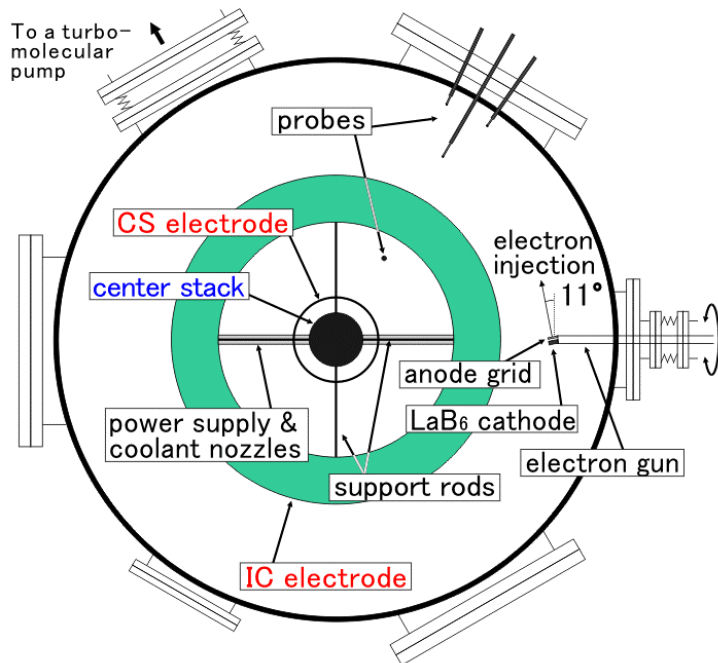
Proto-RTにおける基礎実験

- ・内部電場を持つプラズマの閉じ込め特性
(一流体のトロイダル純電子プラズマ)
- ・トロイダル磁場の追加, 磁気シャーの効果
- ・2.45GHzマイクロ波によるECHプラズマ

*Z. Yoshida et al., Y. Ogawa et al., H. Himura et al., in *Non-neutral Plasma Physics III*, 397 (1999).

S. M. Mahajan & Z. Yoshida, PRL **81 4863 (1998); Z. Yoshida & S. M. Mahajan, PRL **88** 095001 (2002).

内部導体型装置Proto-RT(Prototype-Ring Trap)



Proto-RT断面図と計測器等の配置

トロイダル磁気面配位

- ・内部導体 (dipole磁場コイル, 吊り下げ式)
- ・垂直磁場コイル (装置外部, 2本)
- ・トロイダル磁場コイル (中心軸内部)

磁気シヤーを含む多様な磁場配位

プラズマバイアス電極

- ・内部導体上のトラス状電極
- ・中心軸上の円筒電極 (今回は不使用)

電位分布の最適化, 径方向電場生成

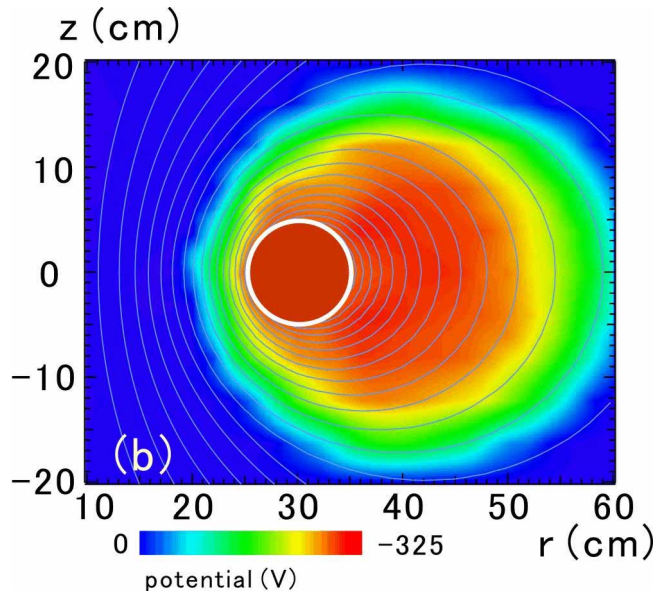
プラズマ生成

- ・純電子プラズマ:
LaB₆カソード電子銃, ~2kV初期加速
- ・中性プラズマ:
13.56MHz RF, 2.45GHzECH (準備中)

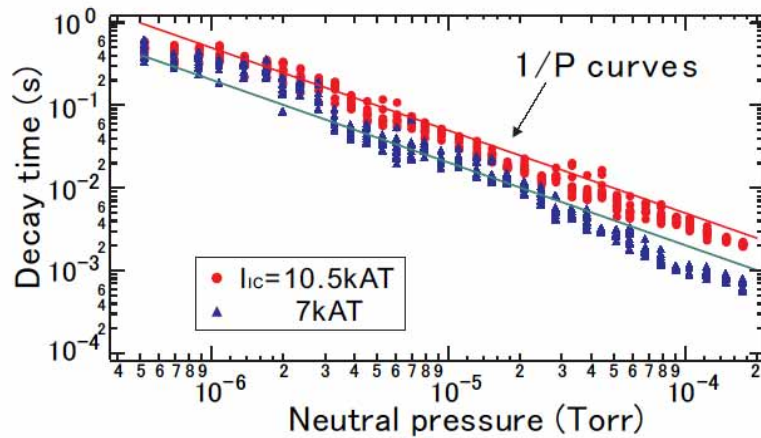
計測器

- ・Emissive Langmuirプローブ:
空間電位分布 (電子入射中)
- ・Wallプローブ:
静電揺動測定, 閉じ込め時間, 電荷

トロイダル磁気面配位における純電子プラズマ



空間電位分布とdipole磁場の磁気面 (Vic=-300V)



閉じ込め時間と古典拡散時間のスケーリング

Proto-RTトロイダル電子プラズマ*

・磁気面と等電位面を接近させる電位制御

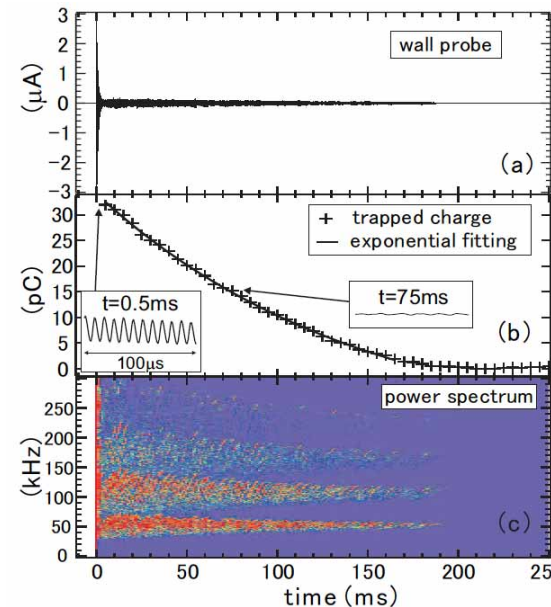
初期の不安定な静電揺動を安定化,
内部電場を持つプラズマの安定な閉じ込め

・閉じ込め時間は中性粒子との衝突により規定

$$qn(\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B}) - m_e n_e \nu_{en} \mathbf{v}_e = 0$$

$$\tau_D \sim a/v_r = \frac{qaB^3}{m_e n_e \sigma E^2} \propto P^{-1} B^3$$

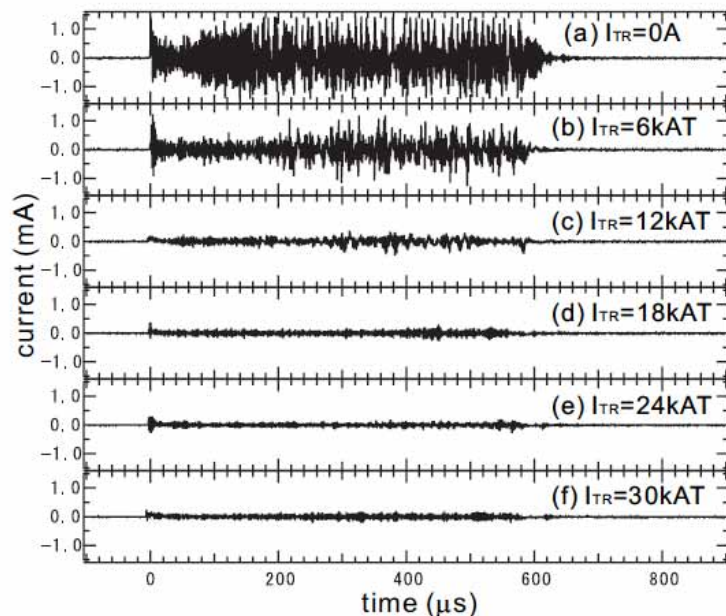
B~50G, P=5 × 10⁻⁷Torr, ne~10¹²m⁻³, etc. ~1s



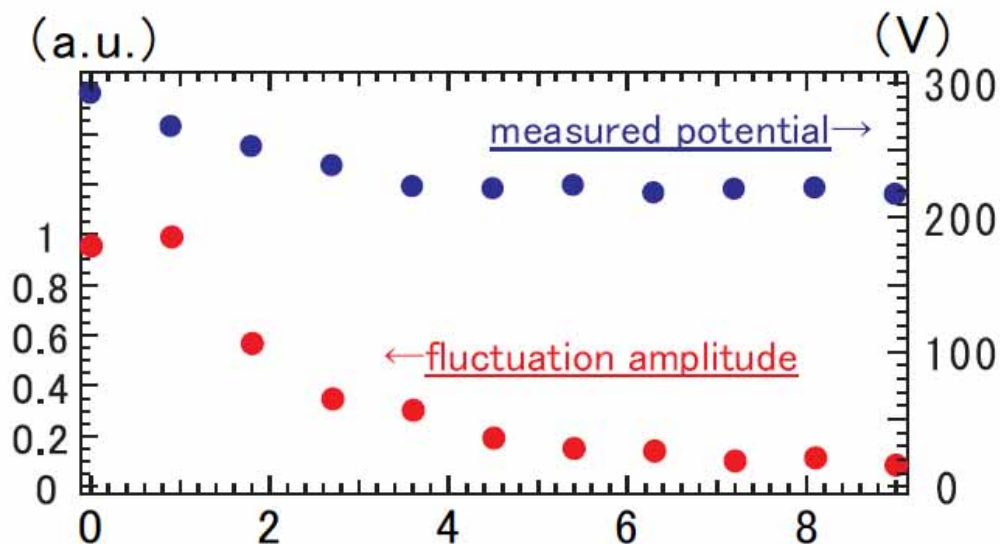
電子入射停止(t=0)
後の揺動, 閉じ込め
電荷の時間発展, FFT

*C. Nakashima, Z. Yoshida et al., PRE **65** 036409; H. Saitoh, Z. Yoshida et al., PRL **92** 255005 (2004).

トロイダル磁場の追加によるプラズマの安定化* (電子入射中)



トロイダル磁場追加時の静電揺動

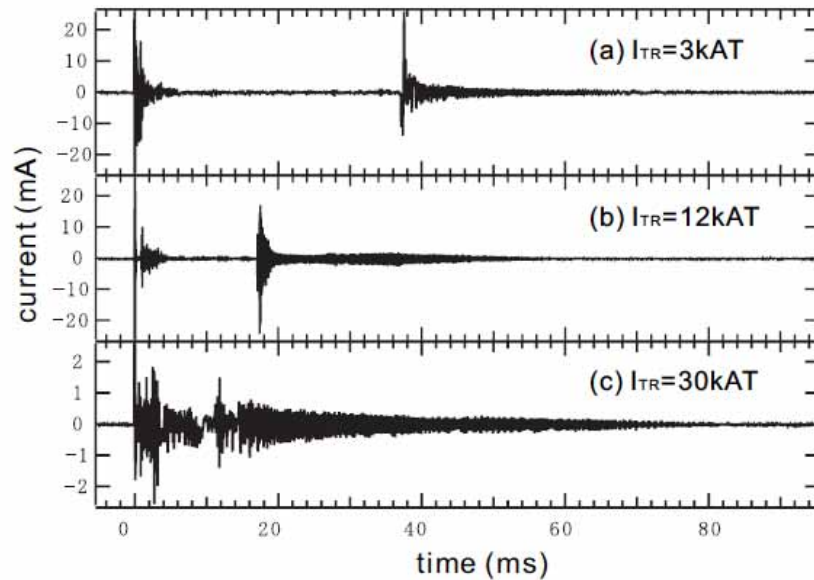


印加したトロイダル磁場強度をパラメータとした揺動振幅と生成された空間電位

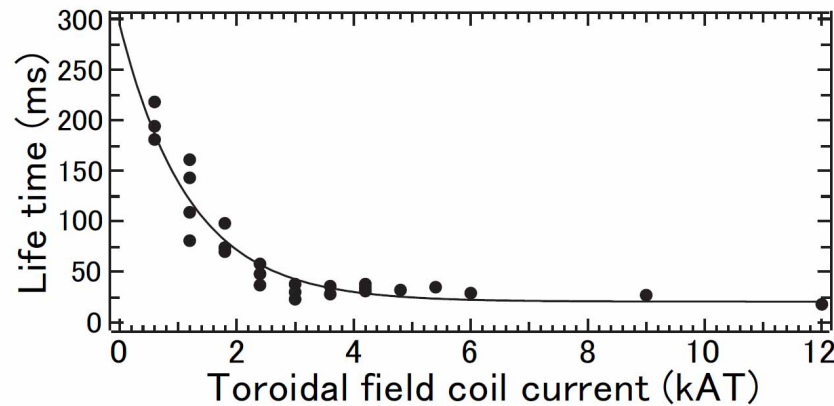
- ・電子入射中, 磁気シヤーによりdiocotron周波数帯の揺動振幅が減少.
(磁場配位と合わせて電子の入射角を調整する事で, 閉じ込め電荷はほぼ一定)
- ・ポロイダル磁場と同程度の強度のトロイダル磁場を与えた際, 静電揺動
(空間電位で規格化)は1 / 10程度にまで減少.

*S. Kondoh, T. Tatsuno, and Z. Yoshida, Phys. Plasmas **8** 2635.

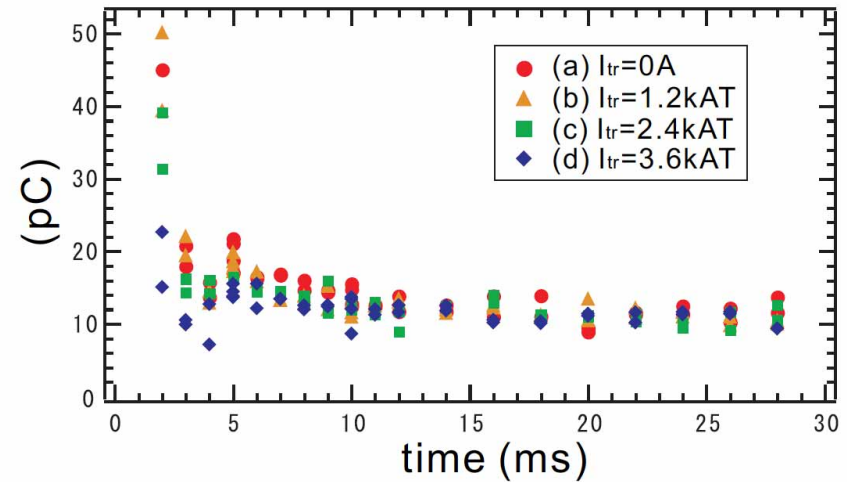
トロイダル磁場追加時の閉じ込め特性(電子入射停止後)



トロイダル磁場追加時の静電揺動
(電子銃停止後の閉じ込め期間中)



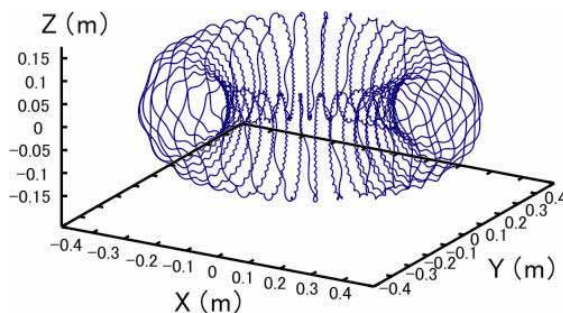
トロイダル磁場追加時の安定閉じ込め時間



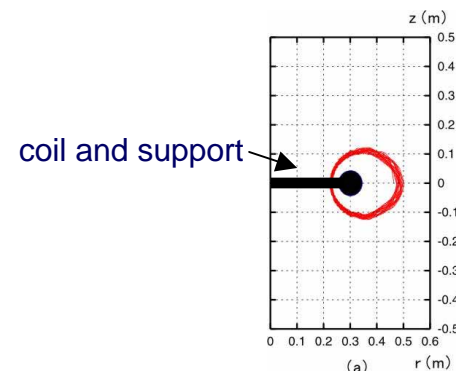
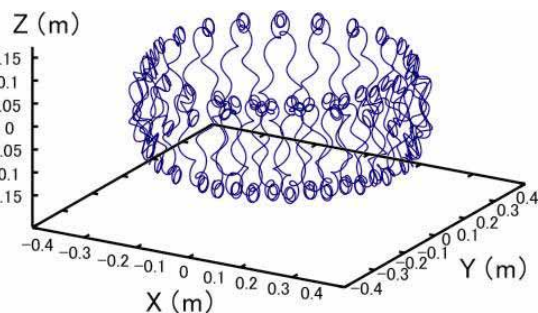
閉じ込め電荷の時間発展(純dipole磁場～
トロイダル磁場の追加)

- ・電子入射中の揺動の振幅が減衰する一方で、電子銃停止後の安定な閉じ込め時間は減少する傾向が見られる。
- ・揺動の急成長までの安定な閉じ込め中には、トロイダル磁場の追加は電荷に大きな影響を与えない。

障害物による閉じ込めの悪化と荷電粒子の軌道



内部導体を取り巻く周回軌道 / ミラートラップされた電子



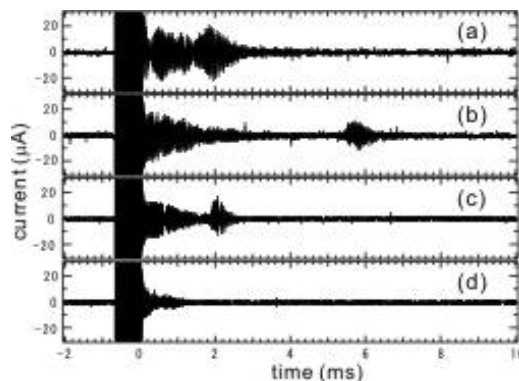
ポロイダル断面の粒子軌道



- ・トロイダル磁場を追加しない時, ミラートラップされない (障害物のある領域に侵入しない) 粒子は擾乱を受けず良好な閉じ込めを示し得る.

- ・しかし, トロイダル磁場追加時, $E \times B$ ドリフトは内部導体を取り巻く螺旋状の軌道を描き, サポートロッド等の障害物を横切り, 不純物の叩き出し 不安定性の成長の可能性. (超伝導磁気浮上型の装置の使用により改善可能)

- ・同様の不安定性の急成長と電荷ロス, 閉じ込め領域への障害物(静電プローブ)の導入によっても観測される.

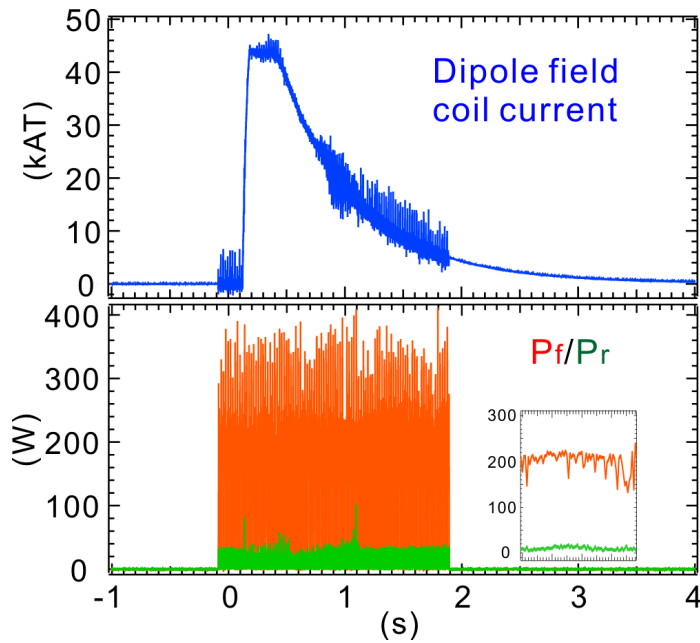


障害物(静電プローブ)導入時の長時間閉じ込めの揺動波形

2.45GHz ECH 初期実験の開始



Proto-RT 20kWマイクロ波発振器 / 導波路



Proto-RT 20kWマイクロ波発振器 / 導波路

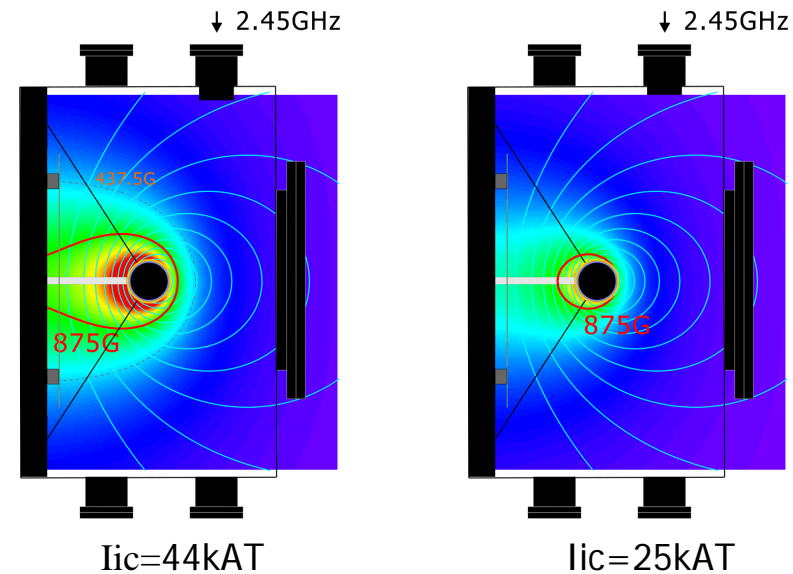
・純電子実験 - 内部電場を持つプラズマの特性

中性プラズマの非中性化, 流れ駆動による,
高速流を持つプラズマの平衡状態の検証

・これまで: 13.56MHz RF放電+プラズマバイアス
2.45GHz ECHによるプラズマの高性能化

・ ECHによる初期実験

・純dipole磁場 (44kAT) 中で水素プラズマ
・パワー上昇, ガス圧低下, 計測は今後

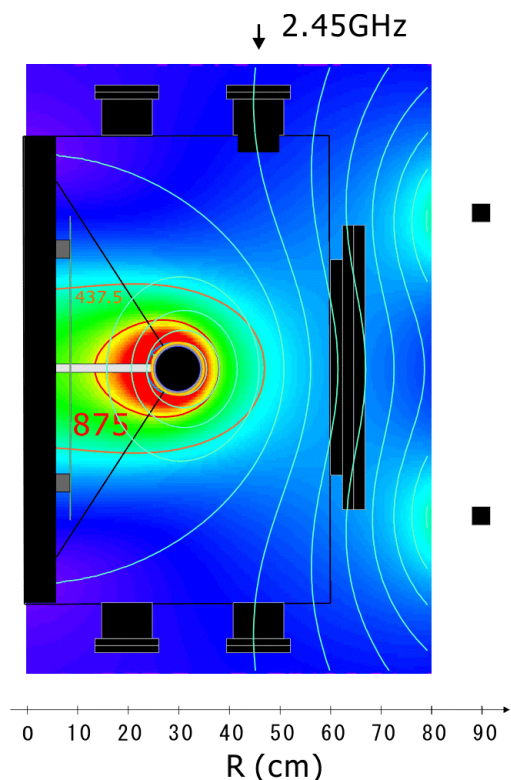


Dipole磁場の磁場強度と磁気面 (ポロイダル断面)

まとめと今後の課題

トロイダル磁気面配位における内部電場を持つプラズマの実験研究。
(基本的な閉じ込め特性について、純電子プラズマを使用した実験)

- ・トロイダル磁場の追加による磁気シャーの効果：
電子入射中の静電揺動は $\tilde{\phi}/\phi \sim 10\%$ 程度まで振幅減少。
しかし、安定な閉じ込め時間は減少。コイル支持構造の影響。



Proto-RTのdipole+vertical配位

中性プラズマの非中性化・流れ駆動：
プラズマの高性能化を目指してECH初期実験を開始

- - ・今後の課題と目標：
 - ・入射パワーの上昇による高密度プラズマの生成。
(プラズマ流速 ~ Alfvén速度)
 - ・バイアスによる内部電場 / 流れ場の形成。
(電極, 電子入射による)
- - ・垂直磁場の追加による磁気面構造の最適化。

高速流を持つプラズマの平衡(Double Beltrami state)
の実験的検証。