

平成 1 6 年度博士論文審査 発表資料

Experimental Study on the Confinement of
Electron Plasma and Formation of Flow of Neutral
Plasma in an Internal Conductor System

内部導体系における電子プラズマの閉じ込めと
中性プラズマの流れ駆動に関する実験的研究

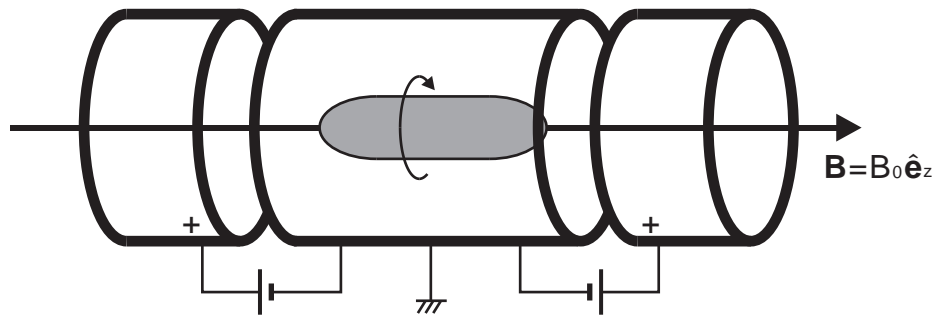
指導教官 吉田善章教授

平成 1 7 年 1 月 2 4 日

新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻
博士課程 3 年 学生証番号 2 7 2 0 1 齋藤晴彦

研究背景 1 . 非中性プラズマ

直線型装置における非中性プラズマ：



Penning-Malmberg trapの電磁場配位

装置軸方向に磁力線
磁力線方向にDC電場を使用
(異符号荷電粒子の同時捕獲は困難)

純電子，純イオンプラズマにより
輸送，構造等に関して多様な研究

反物質を含む多様な荷電粒子群の閉じ込め

- ・ 陽電子プラズマ，陽電子プラズマ-電子ビーム系の実験研究
- ・ 反陽子，陽電子の閉じ込めと反物質原子の合成

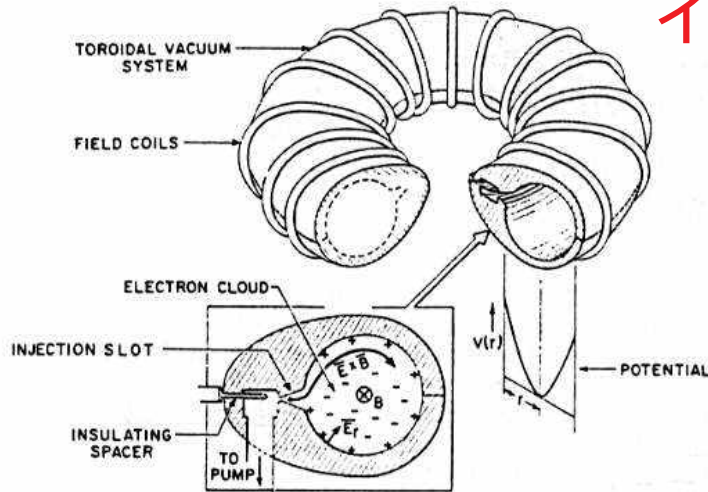
プラズマ基礎物理，学際分野への応用

陽電子-電子の等質量プラズマの特性，天体プラズマ現象の基礎研究
反物質荷電粒子やその混合物，反水素等の合成

研究背景 2 . トーラス系における非中性プラズマ

1950 ~ 純トロイダル磁場中の電子プラズマ

イオン源, イオン加速装置等の開発が目的
(HIPAC project)



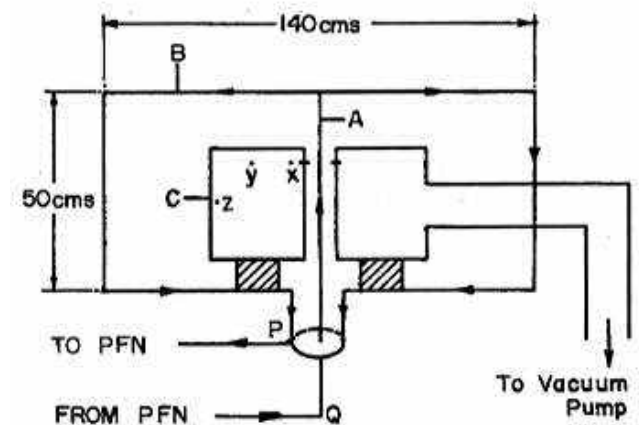
- 回転変換無しで閉じ込め可能
- 磁場上昇時の「誘導」方式による電子入射
- 電子による $\sim 400\text{kV}$ の空間電位の達成
- イオン共鳴不安定性

• Daugherty, Eninger, Janes, Phys. Fluids 12, 2677 (1969)

1990 ~ 低アスペクト比装置における実験

外部電場印加時の平衡の性質

- 外部電場の平衡への影響
- 電子のドリフトを利用した電子入射
- $B \sim 100\text{G}$ で $\sim 100\ \mu\text{s}$ の程度の閉じ込め



• Zaveri et. al., Phys. Rev. Lett. 68, 3295 (1992)

研究背景 3 . トロイダル磁気面配位における非中性プラズマ

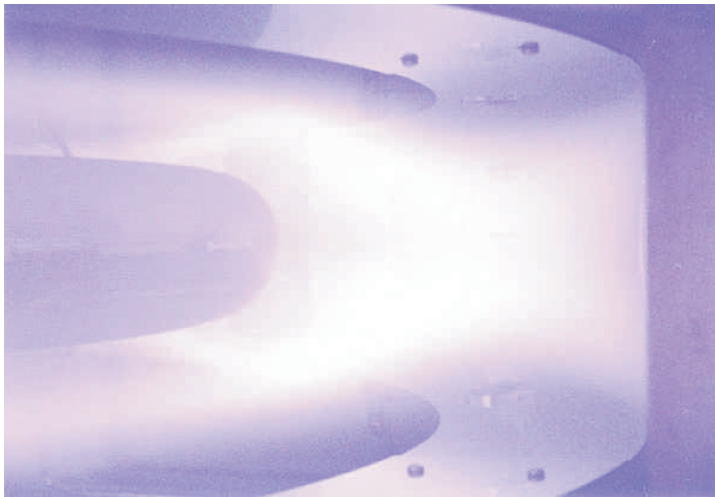
トーラス系の利点：

磁力線が閉じている．磁力線方向に静電井戸を使用しない．
複数種類，高エネルギーの荷電粒子の同時閉じ込めが可能．

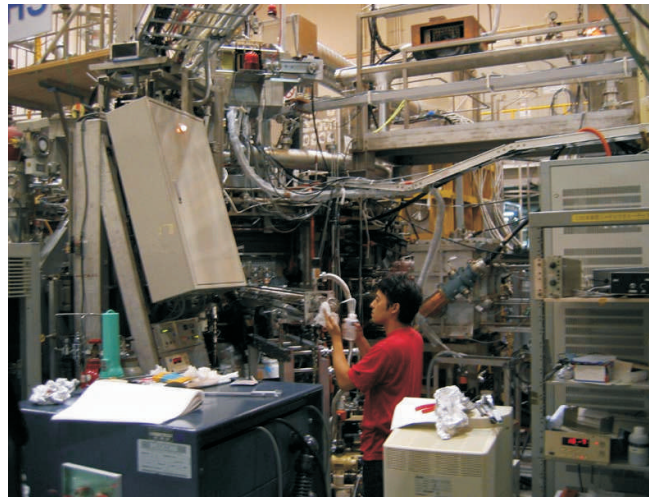
プラズマ物理学や学際分野における研究と関連して，
トロイダル磁気面配位を用いた非中性プラズマ研究*が開始

内部導体系やヘリカル系において基礎研究が進行中

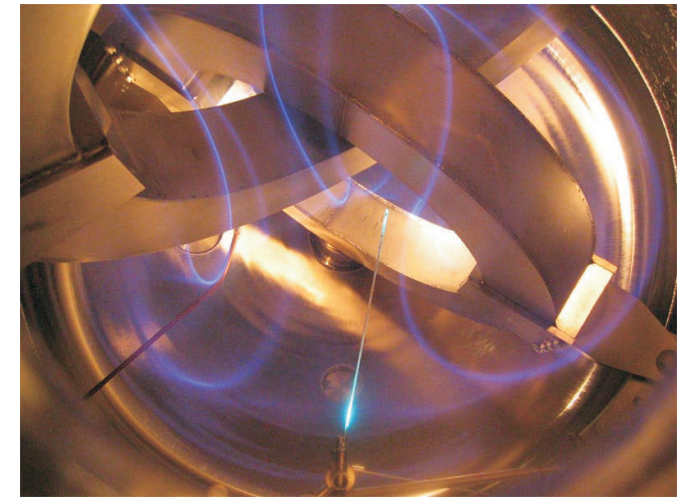
磁気面配位を持つ非中性プラズマ実験



Proto-RT(プラズマ理工学講座)



CHS(核融合科学研究所)



CNT(米コロンビア大)

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

研究背景 4 . プラズマ中の電場と流れ場の効果

プラズマ中の流れと電場 プラズマの平衡や安定性等の閉じ込め特性
核融合プラズマ, 基礎プラズマ実験

流れによる安定化 / 不安定化, 閉じ込め改善 / 損失増大, etc.

内部の広い領域に電場と流れを持つプラズマ

- ・ 回転流の遠心力を利用した閉じ込め, 加熱, 安定化
- ・ **流れを持つプラズマの平衡状態, 高 状態の探求**

(double Beltrami state)

* S. M. Mahajan and Z. Yoshida, Phys. Rev. Lett. 81, 4863 (1998);
Z. Yoshida and S. M. Mahajan, Phys. Rev. Lett. 88, 095001 (2002).

先進的な核融合や, 天体現象中の高 プラズマへの応用

プラズマの非中性化による径方向電場・流れ場の形成

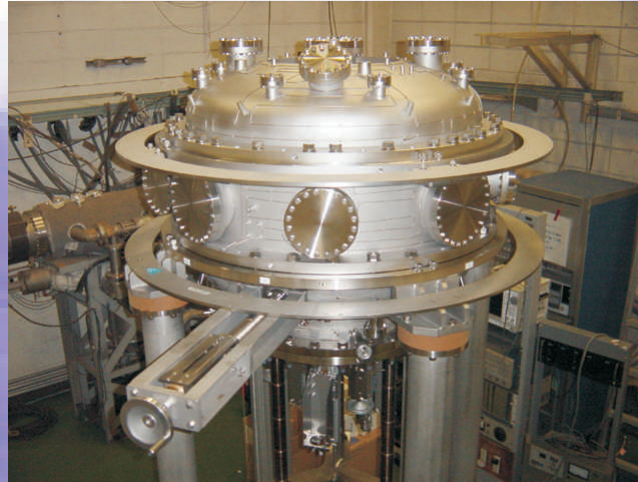
トロイダル系磁気面配位 (内部導体系) における実験研究が進行中

トロイダル磁気面配位における非中性プラズマ研究



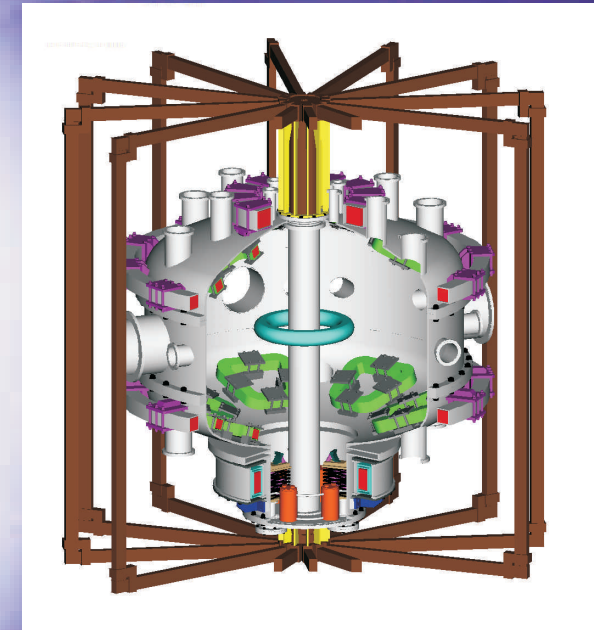
Proto-RT 1998 ~

常電導吊り下げコイル
コイル半径 $R_{coil}=30\text{cm}$,
電流 $I=10\text{kAT}$



Mini-RT 2003 ~

超電導磁気浮上コイル
 $R_{coil}=15\text{cm}$, $I=50\text{kAT}$



RT-1 2005 ~

トロイダル磁気面配位における非中性プラズマの実験研究 (電場構造と流れ場を持つ磁化プラズマ)

- 磁気面内への荷電粒子の入射 (磁場ヌル点とカオスの応用)
- 磁気面配位における非中性プラズマの平衡, 安定性
- 閉じ込め, 揺動等のプラズマ特性

本研究の目的

Proto-RT装置を使用して、
磁気面配位における内部電場を持つプラズマの特性理解

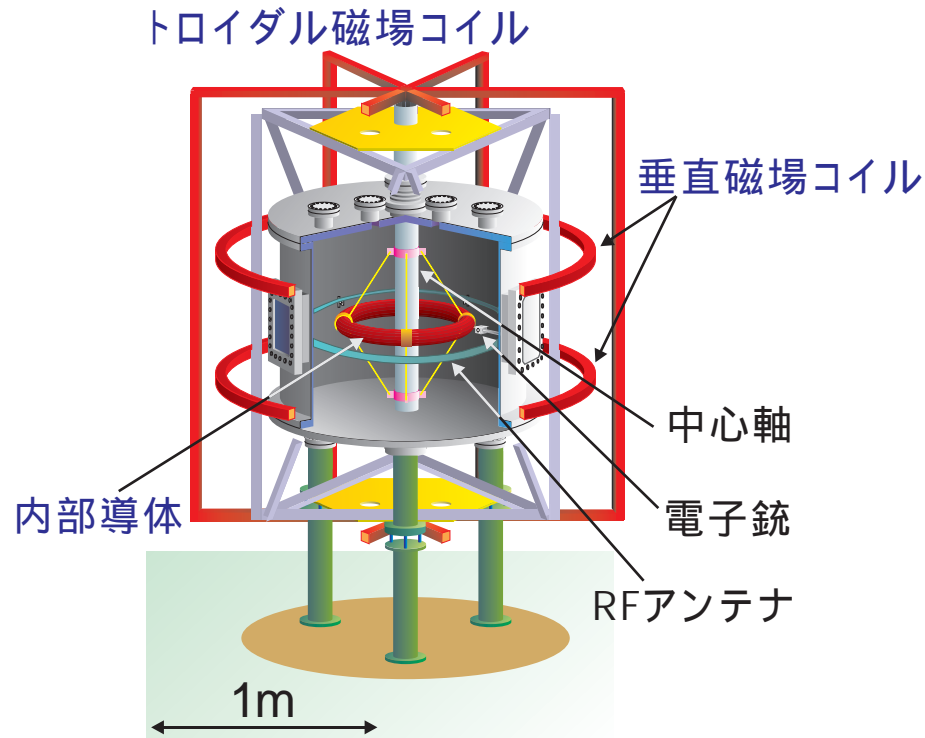
1. 径方向電場制御下のトロイダル非中性プラズマの閉じ込め特性
トロイダル純電子プラズマ
2. (中性)プラズマ内部の電場形成と流れ駆動の性質
13.56MHz RF による水素プラズマ

を実験的に明らかにする事が目的。

広義の非中性プラズマ(二流体プラズマや、反物質粒子群)の
安定な閉じ込め配位の実現

プラズマの基礎特性に様々な影響を及ぼす、流れ場を駆動する
手段を確立

Proto-RT (Prototyoe-Ring Trap) 装置



・ トロイダル磁気面配位

- ・ 内部導体 (dipole磁場コイル)
- ・ 垂直磁場コイル
- ・ トロイダル磁場コイル

磁気面上への荷電粒子閉じ込め

・ 電位分布構造の外部制御

- ・ 内部導体上のトーラス状電極
- ・ 中心軸上の円柱状電極

電位分布の最適化, 径方向電場の形成

・ プラズマ生成

- ・ 電子銃 (LaB₆カソード) : 電子プラズマ
- ・ 13.56MHz RF: 水素プラズマ

・ プラズマ生成

- ・ Langmuirプローブ (静電プローブ)
- ・ wallプローブ (静電揺動計測)

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
vertical field coil	major radius	90 cm
	coil current	5.25 kAT × 2
vertical field coil	coil current	30 kAT

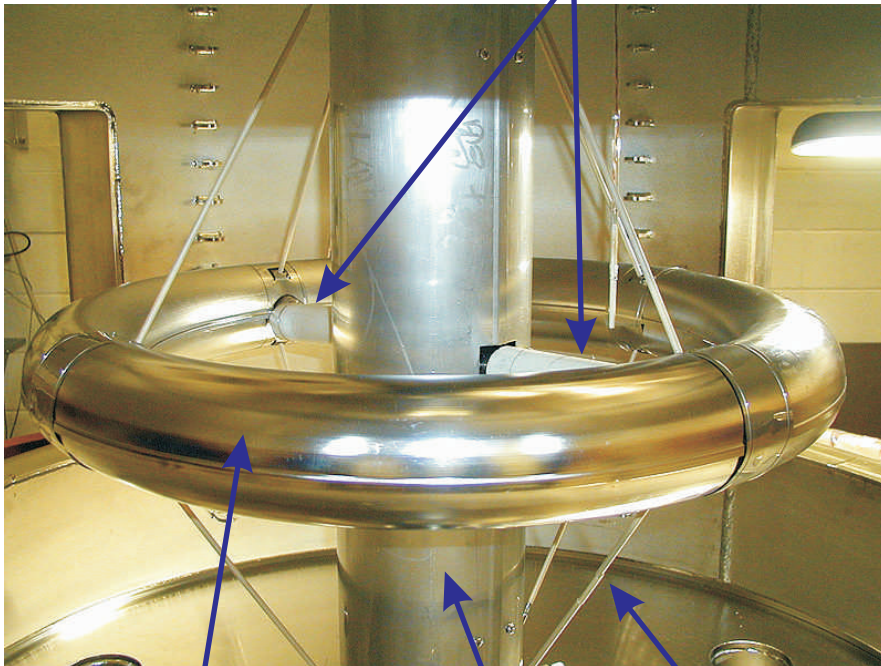
Proto-RTの俯瞰図と装置パラメータ

Proto-RT (Prototyoe-Ring Trap) 装置内部

Proto-RT内部の磁場コイル, 電子銃, 計測プローブの構成

コイル給電 / 冷却用配管

Langmuirプローブアレイ



内部導体と電極

内部導体サポート
(× 8)

電子銃カソード部

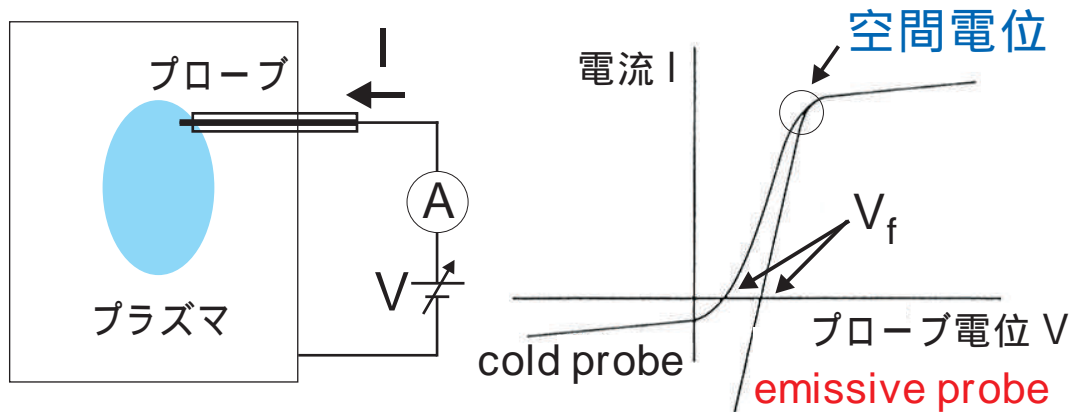
中心軸導体と電極

装置内部写真. 計測ポート開放時(左)と計測器取り付け時(右)

Langmuirプローブによる空間電位分布の計測1

電場印加による応答, 電場の形成 ポテンシャル構造の計測

- Emissive Langmuir probeによる空間電位計測

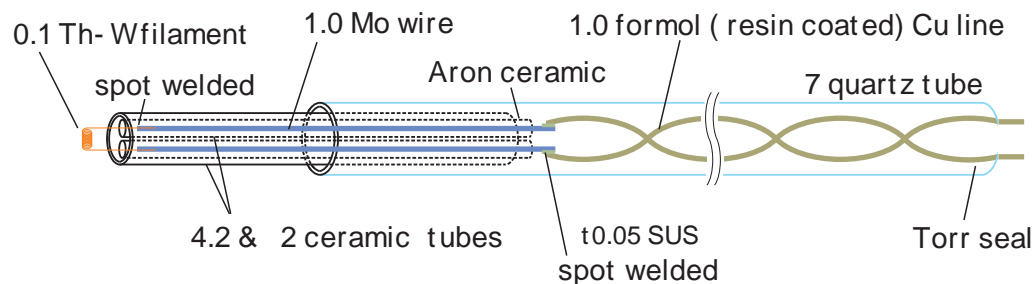


プローブバイアス電位 < プラズマ空間電位

熱電子をプラズマ中に放射
プローブ特性上で実効的なイオン電流

- I-V曲線の分岐は空間電位に対応
- 浮遊電位 V_f は, 空間電位 V_s へ接近
: 高圧プローブによる測定が可能

Langmuir プローブ計測とプローブ特性



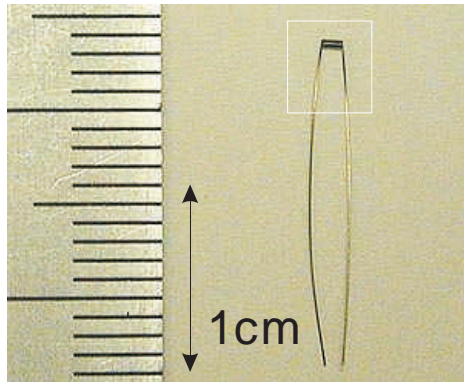
プローブチップへの電流通過
(タンゲステンフィラメント)

熱電子の放射

電流加熱型emissive probeの構造

* H. Himura et al., Phys. Plasmas 81, 4651 (2001)

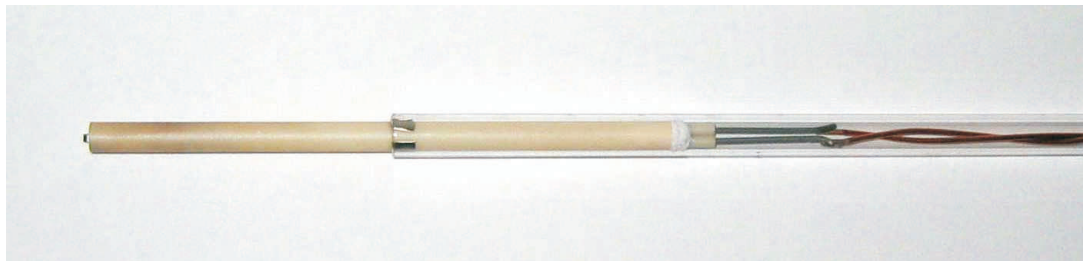
Langmuirプローブによる空間電位分布の計測2



emissive probe tip

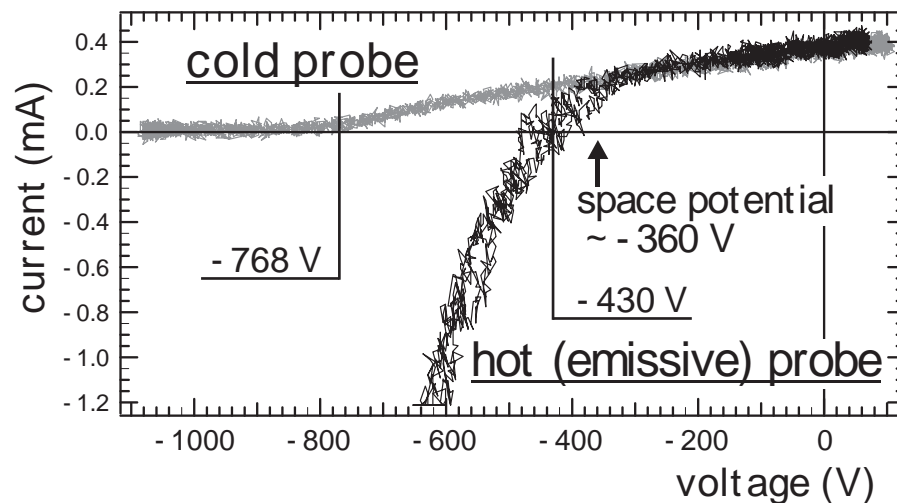


emission ($I_{fil}=1.4A$)



Emissive probeの構造

- フィラメント
- 加熱中
- プローブ全体写真



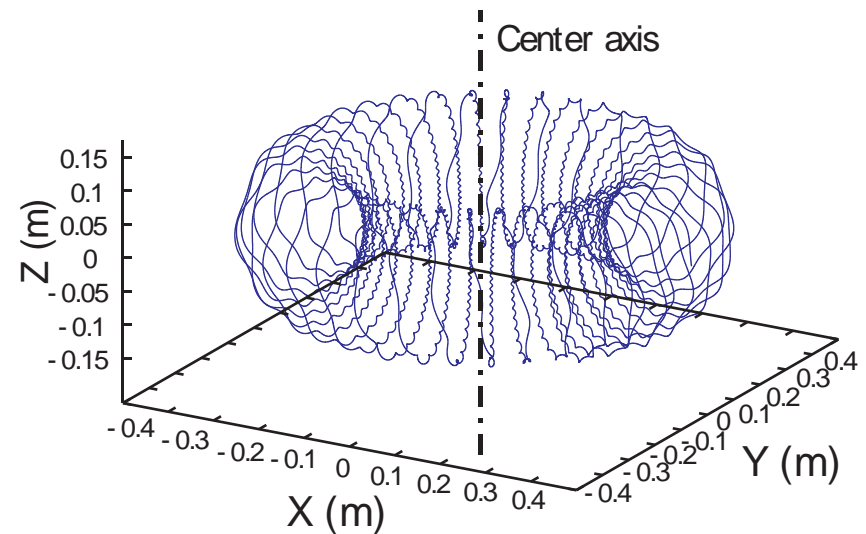
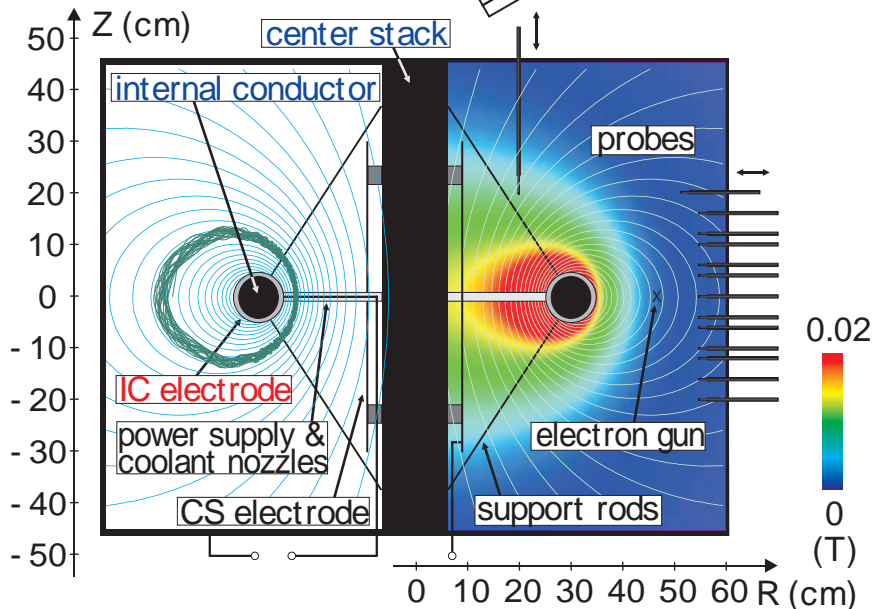
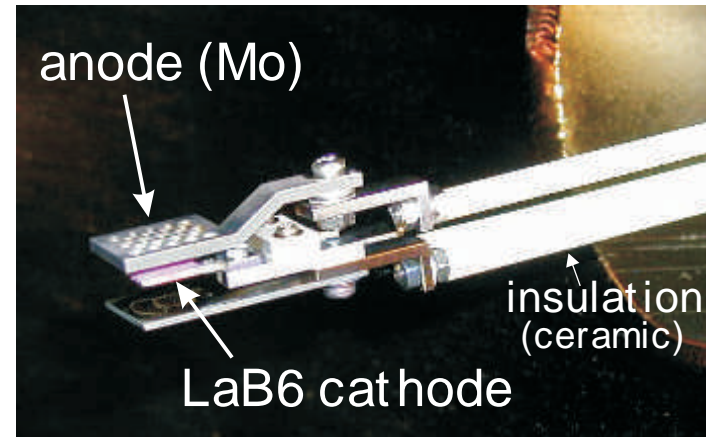
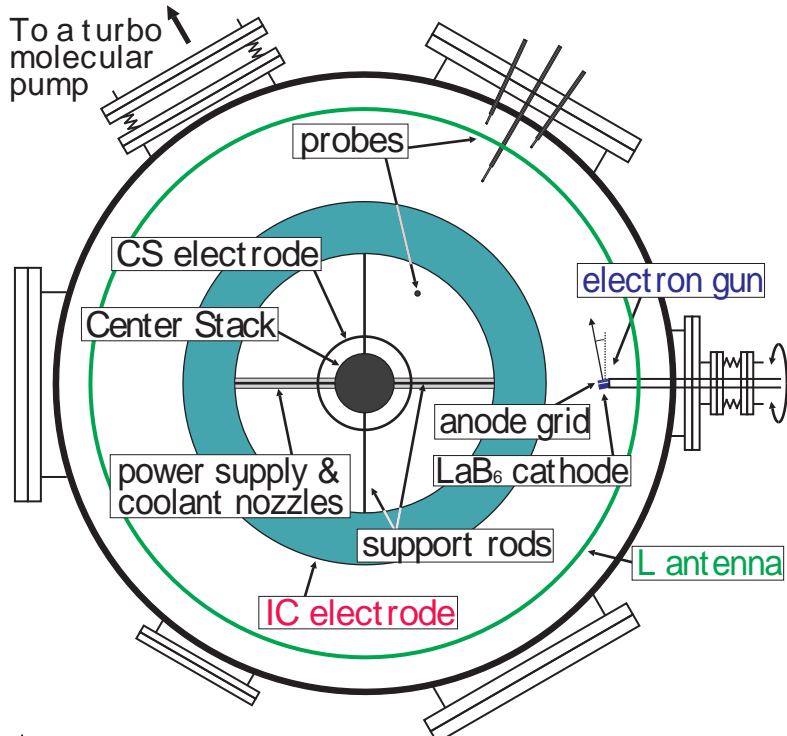
電圧-電流特性

空間電位付近で分離 (純電子)

~ 高インピーダンス測定値

Emissive probeとcold probeのI-V特性

トロイダル磁気面配位とdipole磁場中への電子入射

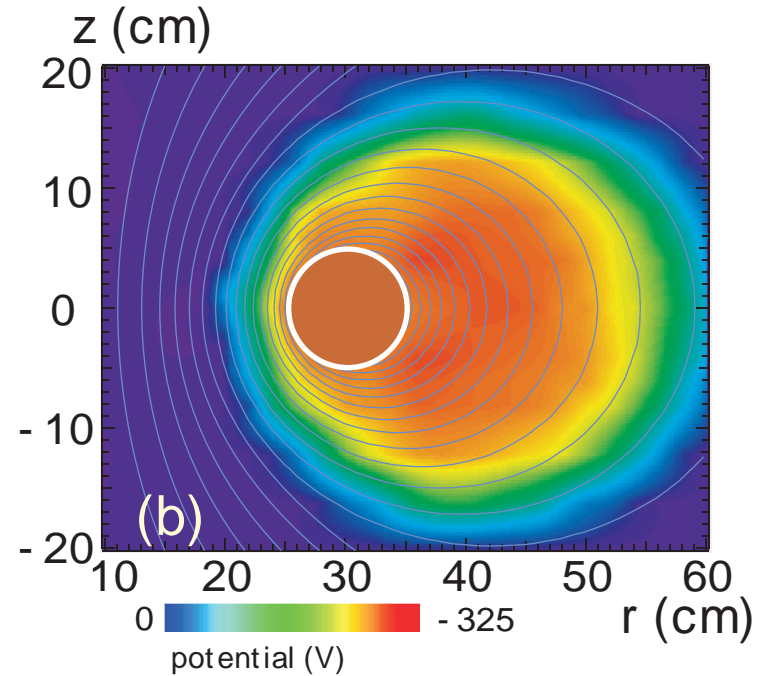
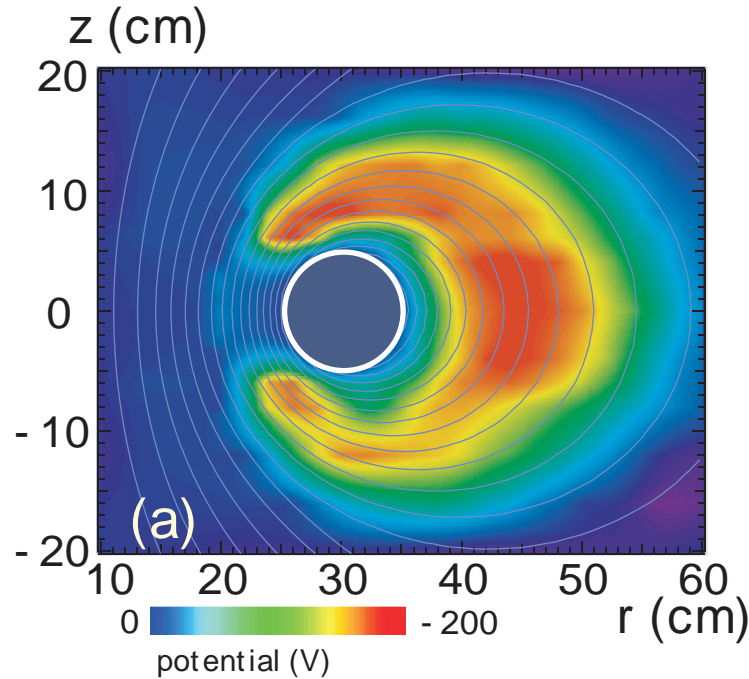


電子銃とdipole磁場配位中の電子軌道

- ・カソード - アノード間に加速電圧
- ・定常磁場中に電子入射
- ・ドリフト運動により磁気面内に電子雲

コイル等の装置内の配置とdipole磁場配位

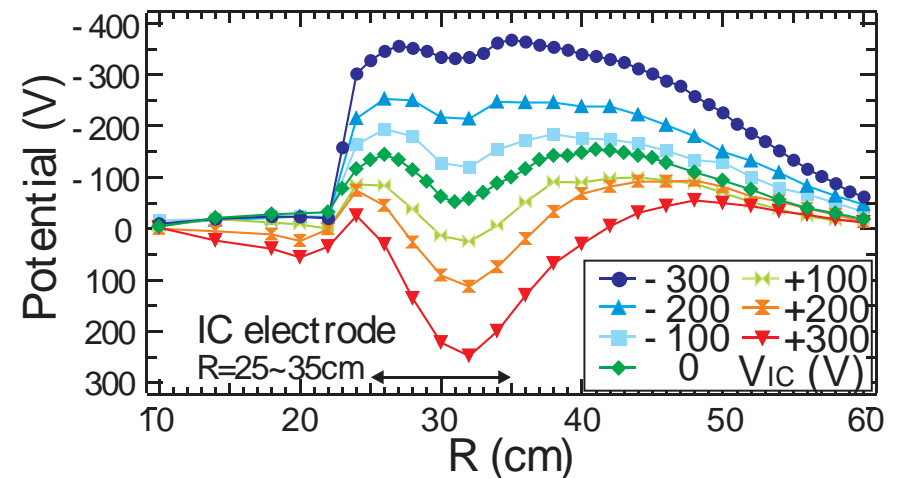
トロイダル電子プラズマの電位分布構造



電子入射中の空間電位分布, $V_{IC} =$ (a) 0V (b) -300V

- バイアスを行わない時 ($V_{IC} = 0V$):
磁気面と等電位面の形状が不一致
diocotron不安定となり得る中空分布
- 負バイアス時 ($V_{IC} = -300V$):
磁気面と等電位面の分布が接近
中空上の電位分布が解消

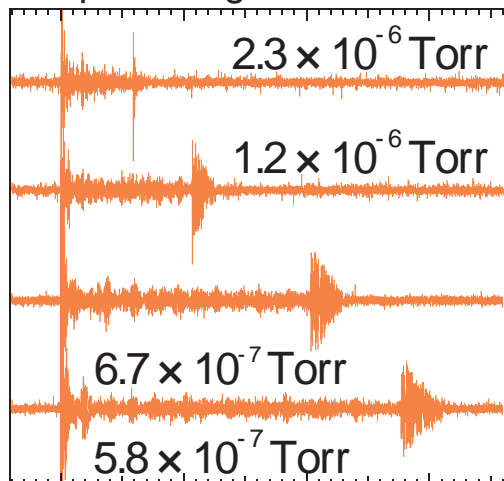
長時間閉じ込めの観測



$Z = +6cm$ 電位分布

電子プラズマの安定閉じ込め時間

wall probe signal



0 100 200 300 (msec)

Wall probeによる静電揺動計測

定常磁場中に電子入射 ($t = -100 \mu s \sim 0s$)

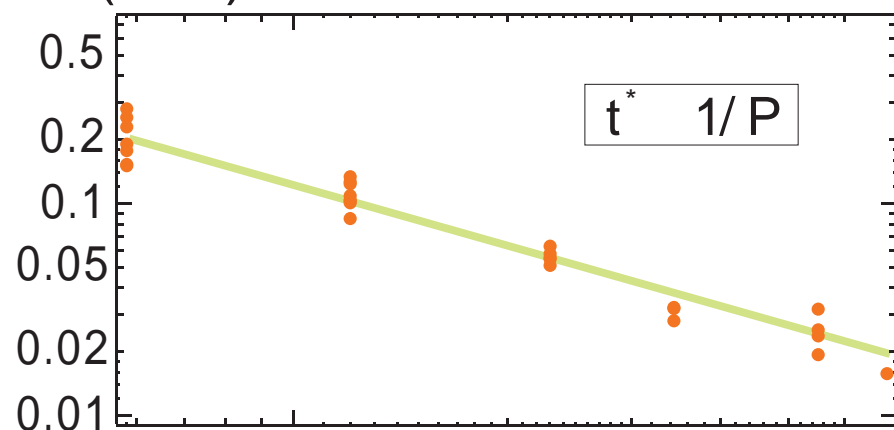
プラズマの電荷を反映したwall上の電荷計測

Stable confinement time $B^{1.6}P^{-1}$

不安定性の急成長による閉じ込めの終了

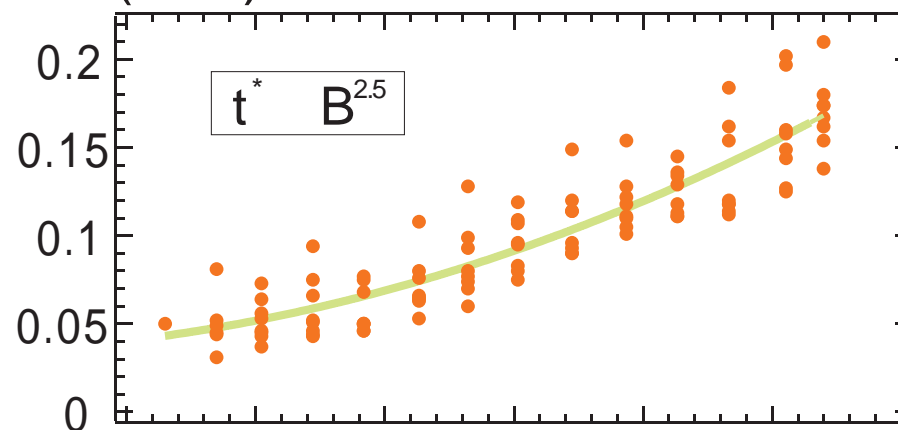
残存する中性粒子との衝突により規定

t^* (sec)



10^6
H₂ pressure (Torr)

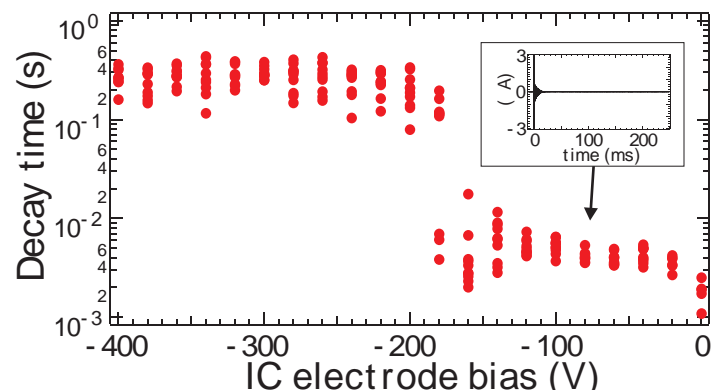
t^* (sec)



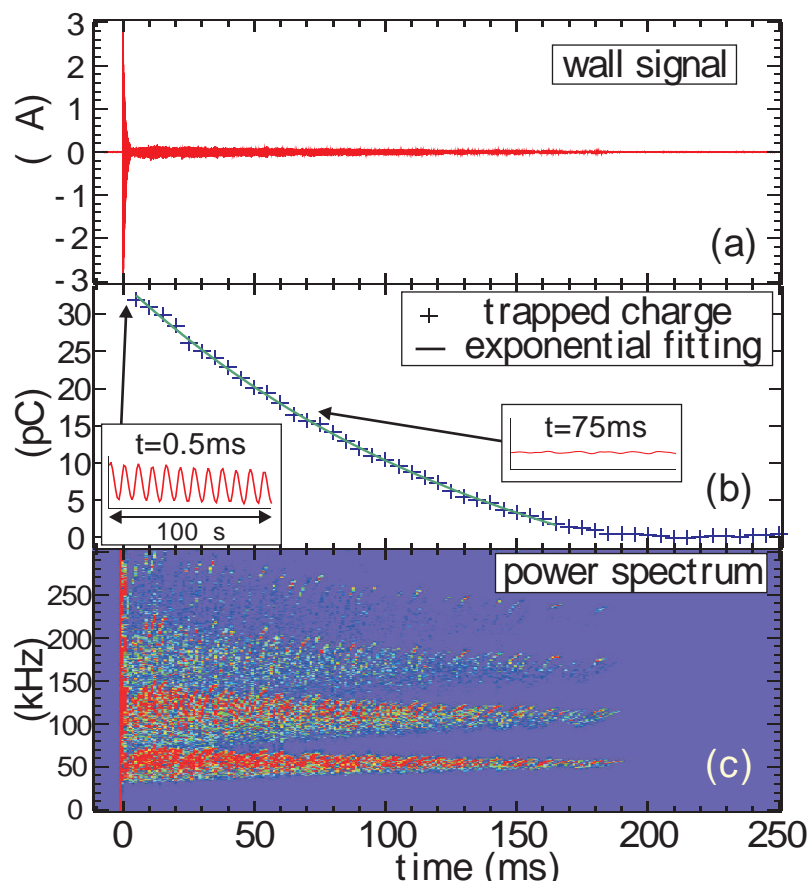
Typical magnetic field strength (G)

安定な閉じ込め時間の背景圧力, 磁場強度依存性 ($V_{ic} = -300V$)

電極バイアスによる安定化と閉じ込め電荷



電荷減衰時定数の電極電位依存



電極負バイアス時の静電揺動

周辺部の計測器等,
プラズマに擾乱を与える構造物を除去
不安定性の急成長無し

・ 実験条件

- ・ 電子入射 300V加速 ($t = -100 \sim 0$ s)
- dipole磁場 (定常7kAT)
- 電極バイアス電位 $V_{ic} = -300V$

・ 電子銃停止後の電荷:

- $t \sim 1ms$ で $\sim 5\%$ まで減少 ($5 \times 10^{-9}C$)
- 揺動振幅は空間電位の10%程度

・ 電位制御無し ($V_{ic} = 0V$):

安定化せず電荷は $\sim ms$ で消滅

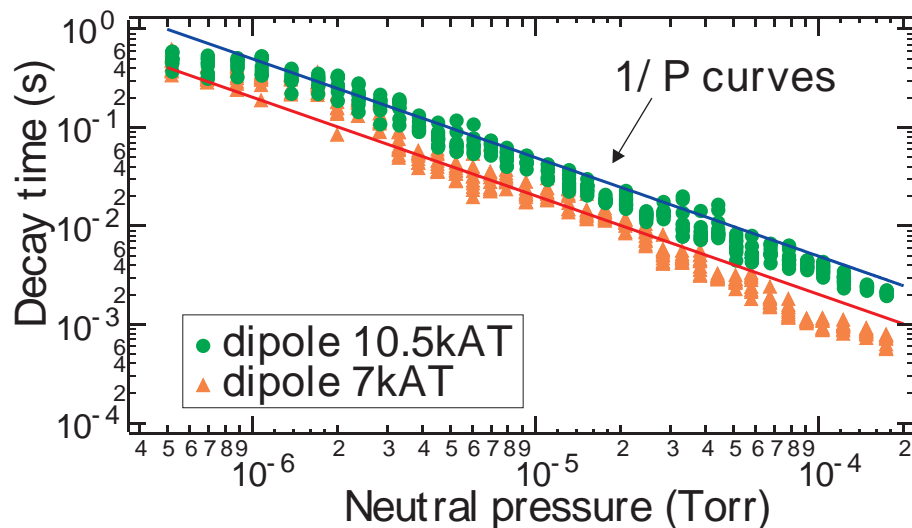
・ 電極による負バイアス時:

揺動持続 (振幅は1%以下に減衰)

(初期の中空状の電位分布の解消時)

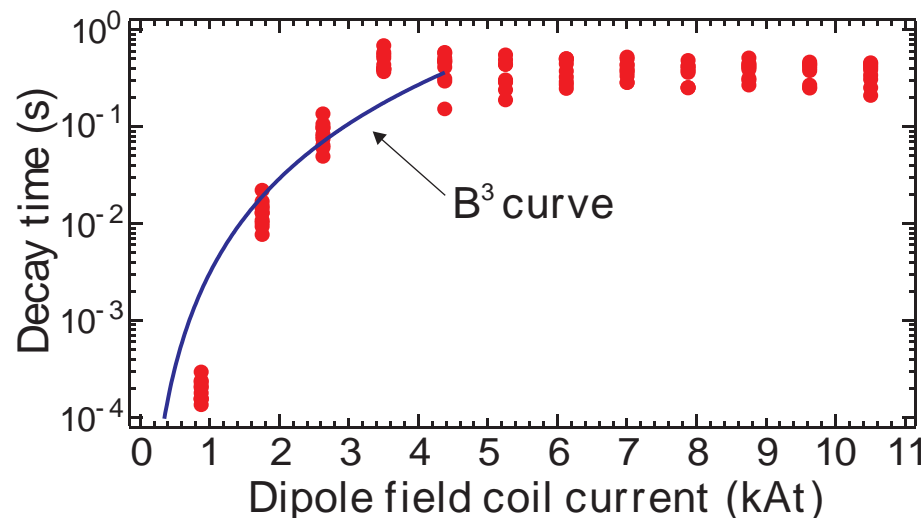
電荷は $\sim 100ms$ 程度で指数関数的減少 15

閉じ込め時間のスケーリング



背景ガス圧依存

dipole磁場, 電極 $V_{ic} = -300V$, 水素追加



磁場強度依存 (dipole磁場配位)

dipole磁場, 電極 $V_{ic} = -300V$, 5×10^{-7} Torr

- ・ $t \sim 1ms$ 以降の電荷減衰時定数
(安定な揺動の持続時)
 $\sim 0.5s$ (at base pressure)

- ・ 拡散時間 (中性粒子との衝突)

$$D \sim eaB^3 / m_e n_n E_r^3 \quad P^{-1} B^3$$

e 電荷 a プラズマ小半径 B 磁場強度

m_e 電子質量 n_n 中性粒子密度

電子-中性粒子衝突断面積

$$B \sim 100G \quad P \sim 5 \times 10^{-7} \text{ Torr}$$

$$D \sim 1s$$

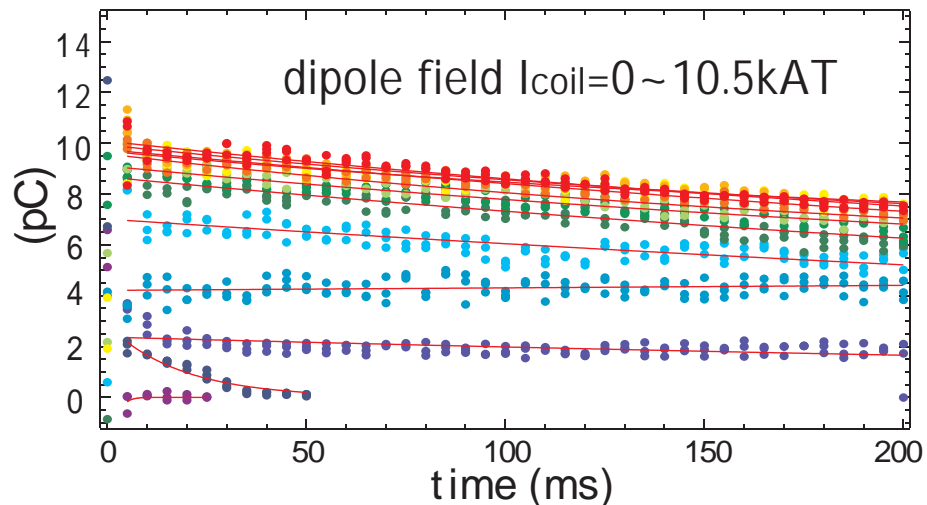
- ・ 背景ガス圧力 (水素) 依存

$10^{-6} \sim 10^{-4}$ Torrの範囲で B^3/P

古典拡散による閉じ込めの上限

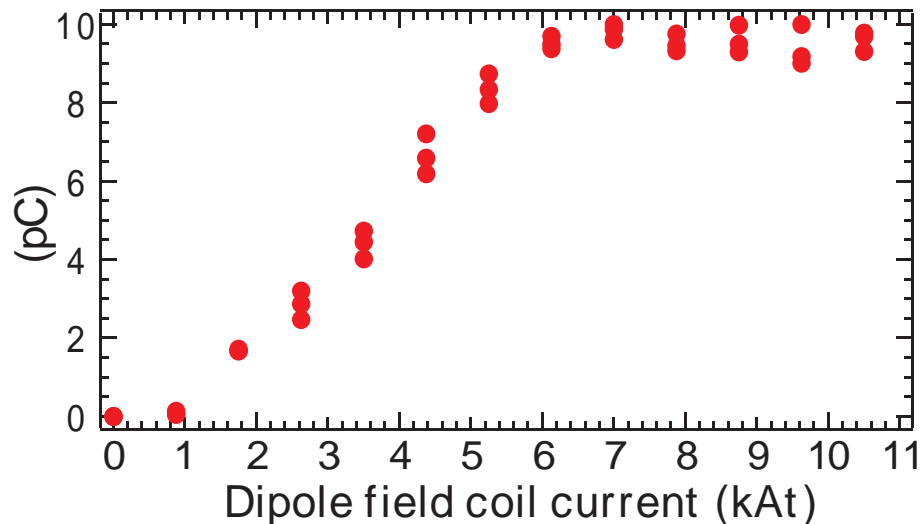
$\sim 10^{-4}$ Torr以下での増加が鈍化
(真空度改善, 磁場増強)

閉じ込め電荷の磁場依存性



wall上電荷の減衰 (磁場強度依存)

dipole磁場, 電極 $V_{\text{ic}}=-300\text{V}$, base pressure



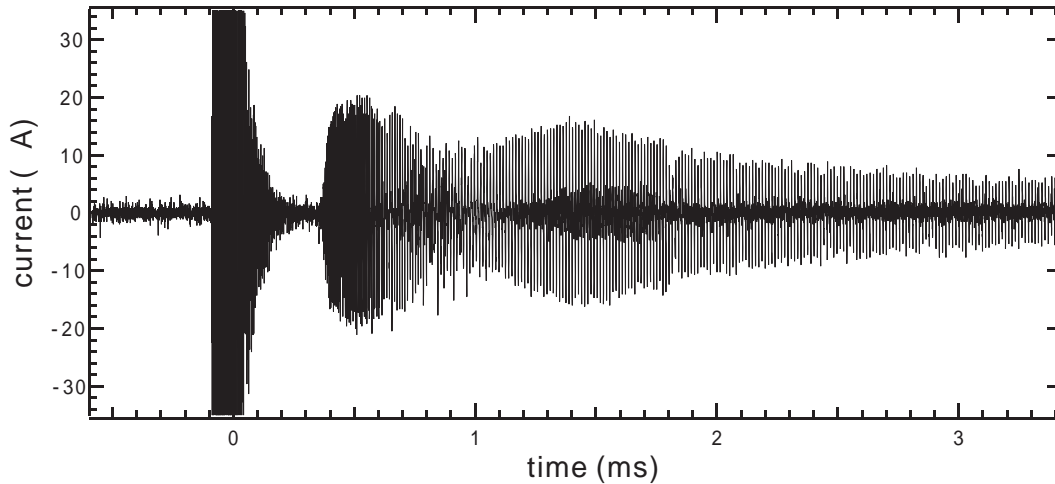
電荷 at $t=5\text{ms}$

- ・ 安定な揺動時の電荷減衰
電子入射 300V加速
電極バイアス電位 $V_{\text{ic}}=-300\text{V}$
- ・ 良好な閉じ込め特性を示す
電荷には磁場強度に応じた上限
(閉じ込め時間と同様な傾向)

電荷はコイル電流6kAT程度で飽和

電子プラズマの電荷 $Q\sim 5\times 10^{-9}\text{C}$
(3×10^{10} 個)に対応

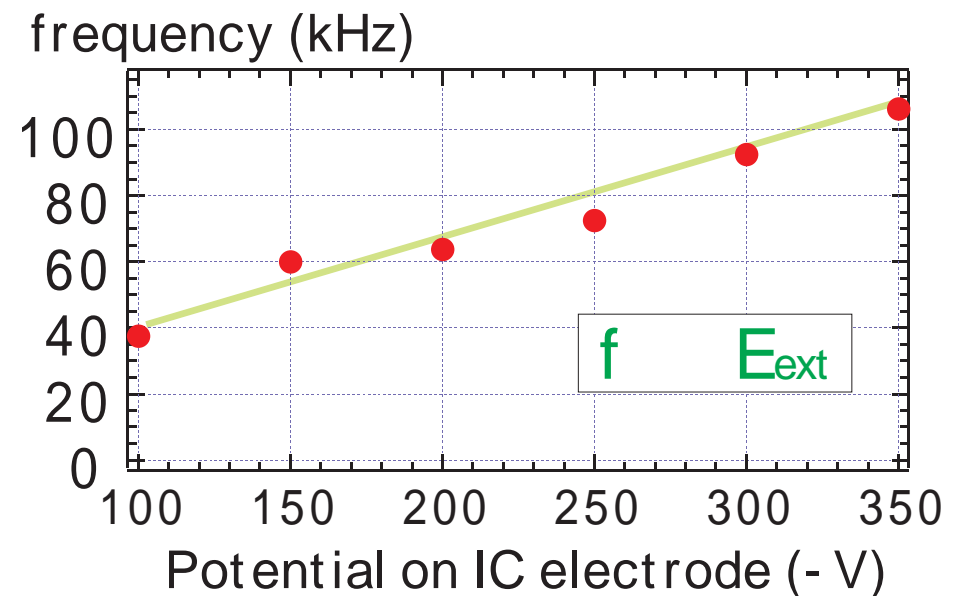
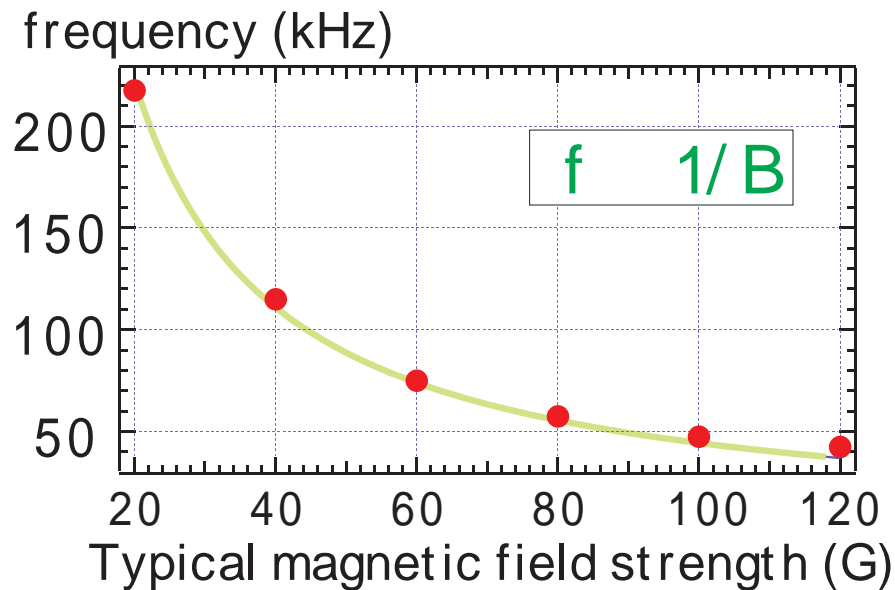
静電揺動の周波数特性



揺動周波数の時間的低下
(電荷の減少に対応)

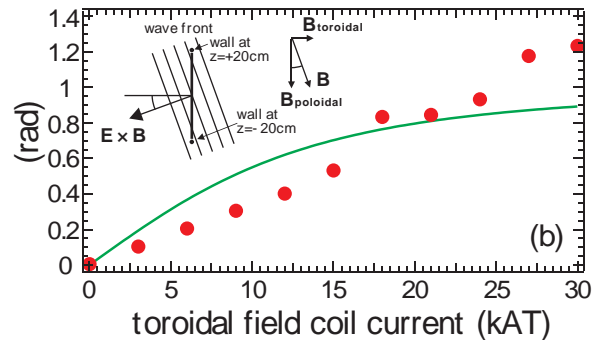
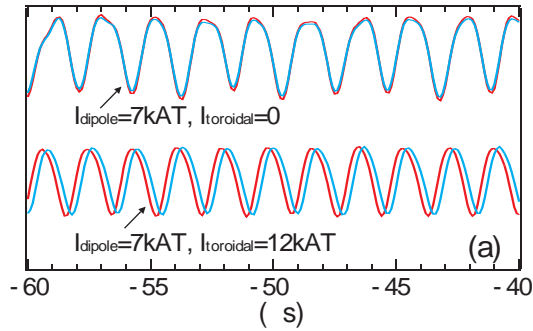
安定期の周波数:
電場 / 磁場強度

揺動信号の時間発展

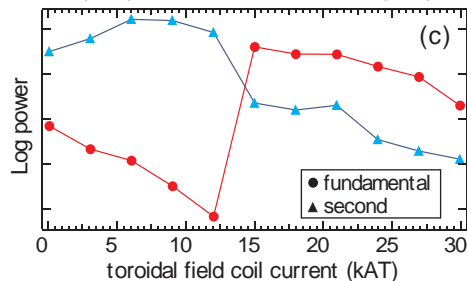
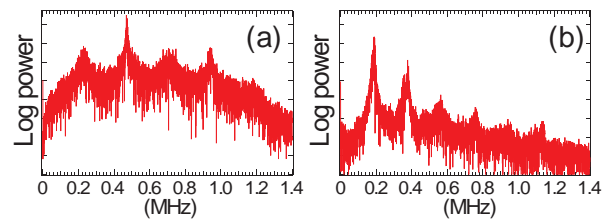


安定期の周波数の磁場強度(左), 外部電場強度(右)依存性

静電揺動の周波数特性 (電子入射中)



トロイダル磁場追加時の静電揺動 (Z=±20cm wall) の位相差



トロイダル磁場追加時(b)のpower spectrum

- ・ 周波数 (電子入射中) $1/B$
- ・ 揺動波形の位相 E_{external} に線形な依存
(wallは同一ポロイダル断面 $Z = \pm 20\text{cm}$)

純dipole磁場:

ポロイダル断面内で同相

dipole + toroidal磁場:

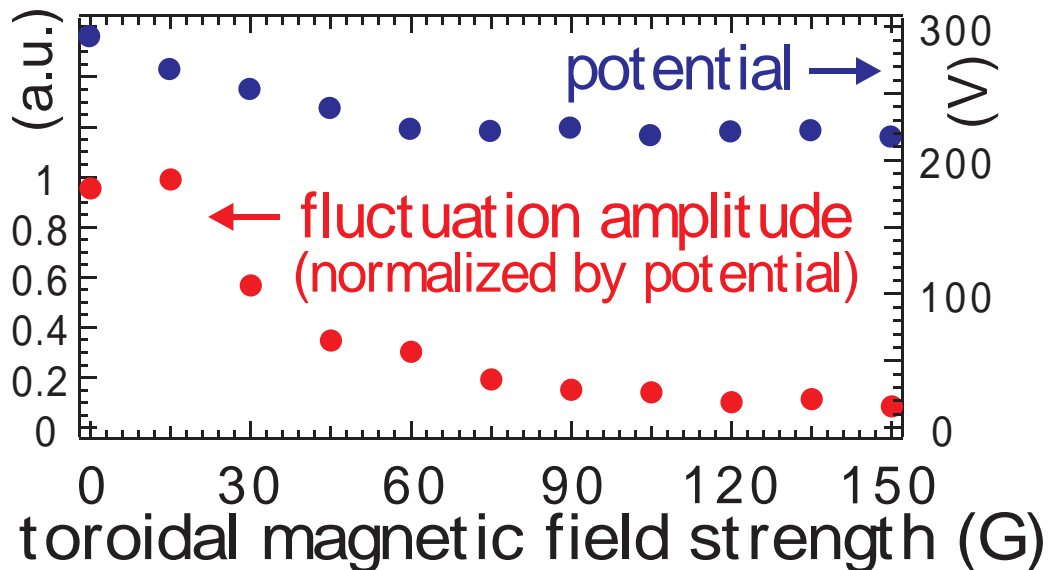
下流側wallの位相遅れ

磁力線のピッチ角に応じた cross field方向に伝播する波

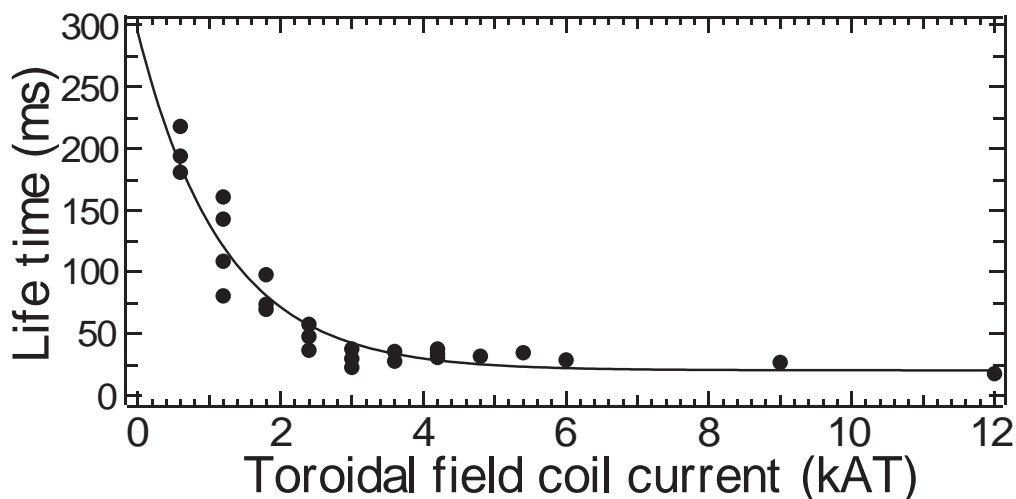
- ・ 周波数からの粒子数の見積り:
電荷減衰時, 基本波の周波数は62kHz 57kHz
(10%弱の減少)
外部電場と自己電場による寄与
電荷は引加電圧 ($V_{\text{ic}} = -300\text{V}$) の10%程度
~ 安定化までの初期のWall上の電荷減衰

- ・ トロイダル磁場の追加
静電揺動の減衰, higher modeが支配的

トロイダル磁場追加時の揺動と安定閉じ込め時間



トロイダル磁場追加時の空間電位と揺動振幅



トロイダル磁場追加時の安定閉じ込め時間の減少

ポロイダル磁場に磁気シヤー追加

揺動御振幅が10%程度まで減少

空間電位(閉じ込め電荷)はほぼ一定

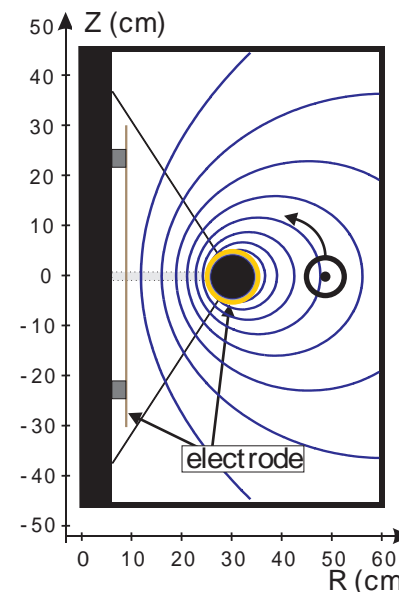
ポロイダル磁場と同程度の強度のトロイダル磁場追加時, diocotron modeの安定化

しかし, 安定閉じ込め時間は減少

閉じ込め期の E × B ドリフト軌道

トロイダル磁場追加により, 内部導体を取り巻く螺旋状

コイル支持構造の擾乱の可能性



トロイダル電子プラズマ実験のまとめ

- ・ トロイダル磁気面配位における電子プラズマの閉じ込め
古典拡散(中性粒子との衝突)が上限となる閉じ込め.

(背景圧力: $P=4 \times 10^{-7}$ Torr, 初期の電子密度: $n_e \sim 10^{13} \text{m}^{-3}$)
 $Q \sim 5 \times 10^{-9} \text{C}$ (3×10^{10}), $\sim 0.5 \text{sec}$ ($B \sim 100 \text{G}$ の dipole 磁場)

背景中性ガス圧力依存:

$10^{-6} \sim 10^{-4}$ Torr で B^3/P , 10^{-6} Torr 以下で飽和傾向.

磁場強度依存:

減衰時間, 電荷共に磁場強度の上昇により飽和.

低圧領域での異常輸送の存在

- ・ 磁気シャーによる揺動振幅の減少を観測
しかし, 安定閉じ込め時間は短縮.

コイル支持構造による擾乱の可能性

中性プラズマの内部電場形成実験

内部電場を持つ中性(通常のイオン電子)プラズマ

流れを持つ二流体プラズマの超高 平衡状態の検証

中性プラズマの内部に流れ場を形成する必要性

径方向電場 $E \times B$ ドリフトによるトロイダル流

電場形成 : 内部導体上に設置した電極

: LaB₆カソード電子銃

電極/電子入射に対するプラズマの応答

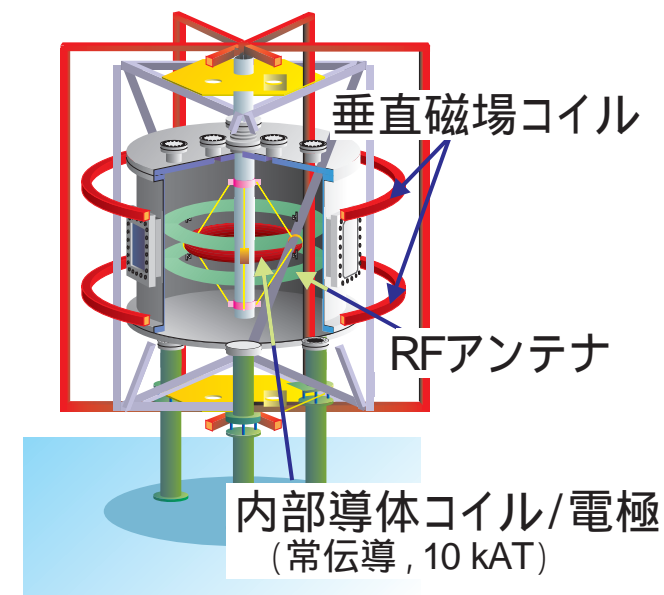
Emissive probeによるプラズマの電位構造計測

現状のパラメータ(電子密度, ガス圧)では,

- ・流れが閉じ込めに与える影響の評価や
- ・良好な閉じ込め特性との両立

を実現する事は困難

電場形成条件, プラズマ特性の基礎的な評価

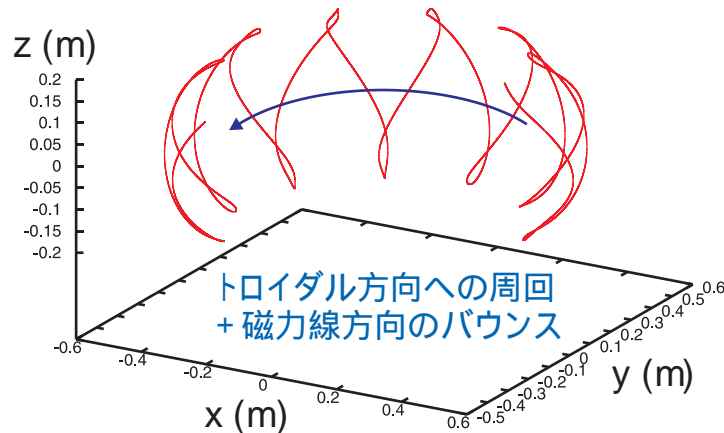


Proto-RT装置とRFアンテナ

内部導体系の弱電離プラズマ中の粒子運動

n_e	電子密度	$1 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$
T_e	電子温度	5 eV
T_i	イオン温度	$\sim 1 \text{ eV}$
n_n	中性粒子密度	$8.8 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$
B	磁場強度	0.01 T
ω_{ci}	イオンジャイロ周波数	$1.0 \times 10^6 \text{ rad s}^{-1}$
ν_{ni}	中性粒子-イオン衝突周波数	$3.7 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$
ν_{ie}	イオン-電子衝突周波数	4.7 s^{-1}
ν_{ii}	イオン-イオン衝突周波数	6.9 s^{-1}
$v_{E \times B}$	$E \times B$ ドリフト速度	$3.0 \times 10^5 \text{ ms}^{-1}$
c_s	イオン音速	$3.1 \times 10^4 \text{ ms}^{-1}$
v_a	アルフベン速度	$6.9 \times 10^7 \text{ ms}^{-1}$

Proto-RT プラズマのパラメータ



トロイダル磁場・径方向電場中でのイオンの軌道

電場と流れ場の形成

$$\left(\frac{\nu_{ci}}{\nu_{ni}} \right)^2 \sim 10^3 \gg 1 : \text{磁化}$$

$$\nu_{ni} \gg \nu_{ie} : \text{中性衝突が支配的}$$

内部導体系でのイオンの運動 :

$$\mathbf{v}_i = \frac{q}{m_i} \frac{\nu_{ni}}{\omega_{ci}^2} \mathbf{E} + \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$$

磁気面を横切る径方向運動

(中性衝突による輸送)

径方向の電場 E_r と 電流密度 j_r :

$$j_r = 1.9 \times 10^{-4} E_r$$

電極電流 1A

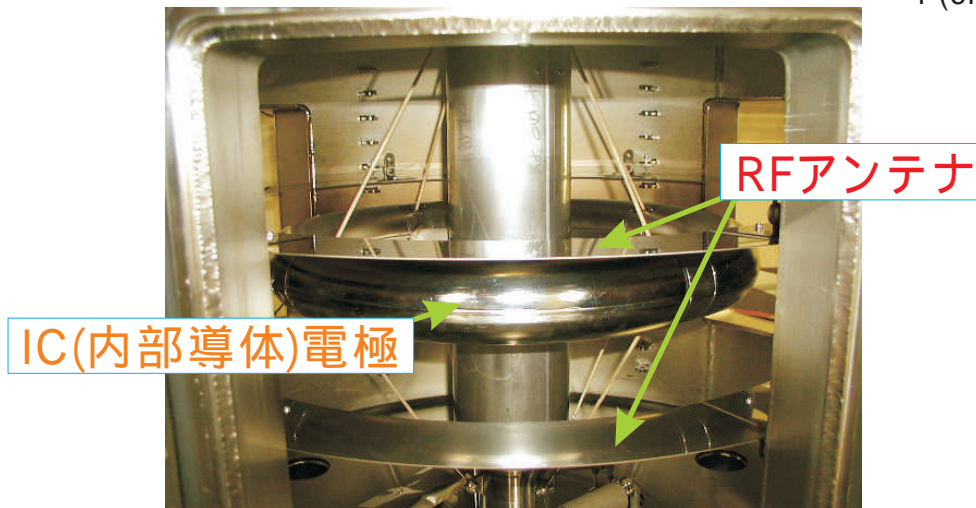
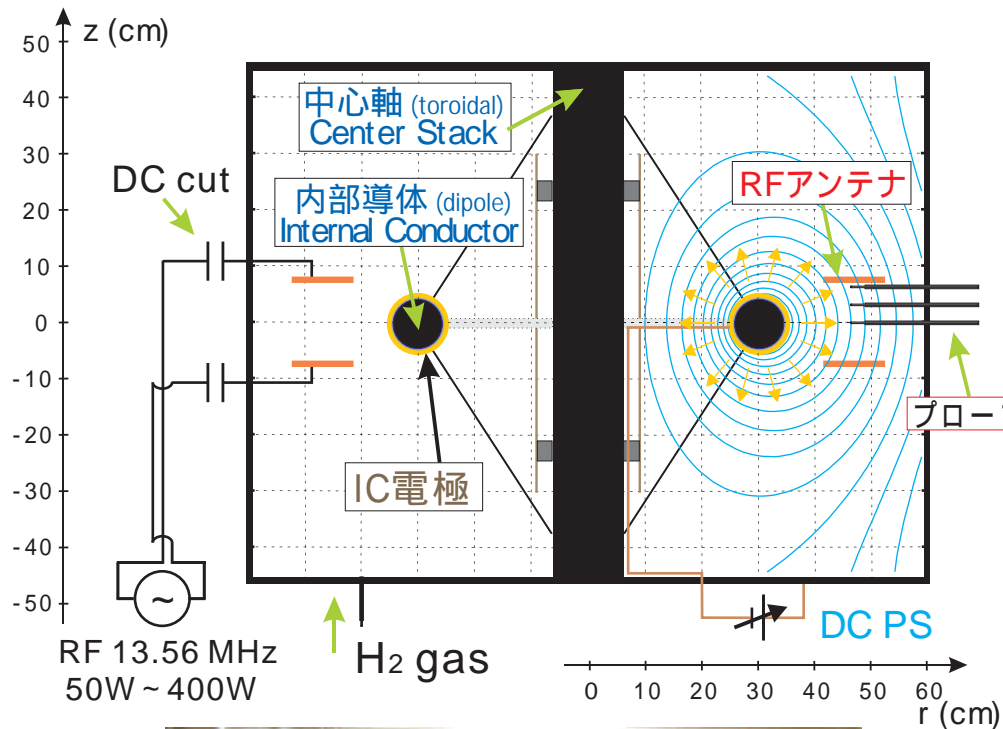
$$v_{E \times B} \sim 5 \times 10^5 \text{ ms}^{-1} (> \text{イオン音速})$$

トロイダル方向のドリフト運動

$$\sim E \times B \text{ ドリフト速度 } v_{E \times B}$$

(粒子衝突の効果のみ評価)

中性プラズマ実験配位



Proto-RT r-z断面と、装置内部のRFアンテナ・電極

- Dipole, 垂直磁場コイル
純ポロイダル磁場配位
- プラズマ制御電極
径方向電場の形成
トロイダル $E \times B$ ドリフト

Langmuir プローブ (T_e, n_e)
(低周波 RF 用)

Emissive プローブ (plasma)

Mach プローブ (v)

probe size < ion ジャイロ半径

非磁化プラズマ Hudis model*

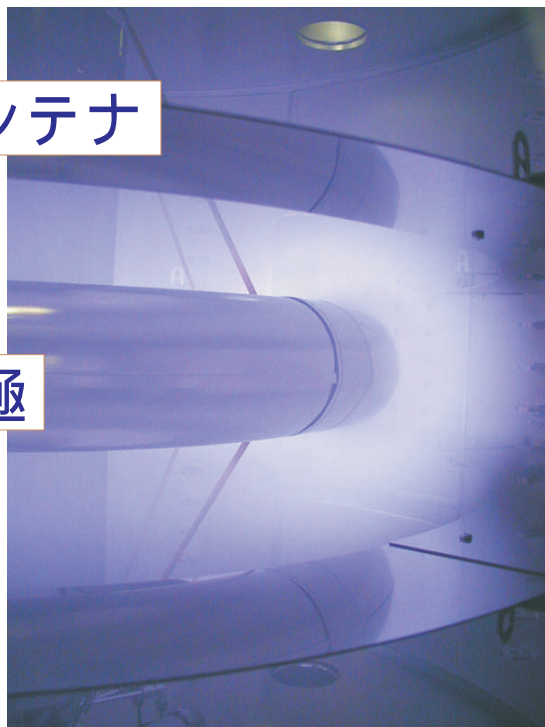
イオン電流比 流速の概算

* Hudis & Lidsky, JAP 41, 5011 (1970)

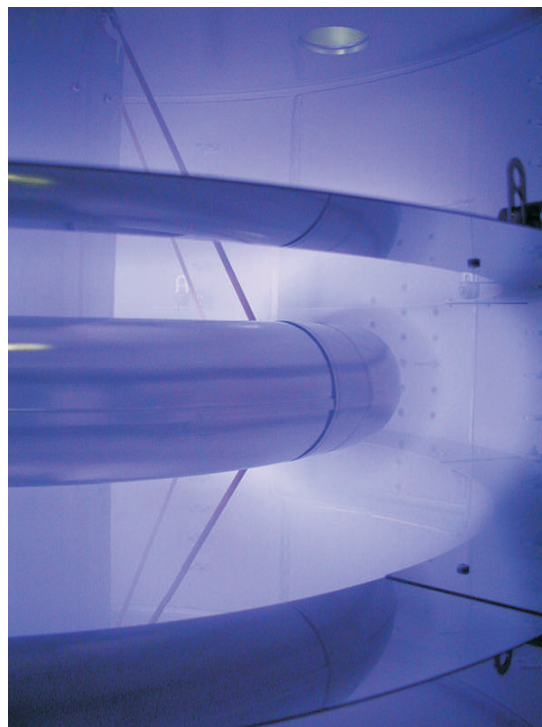
電極バイアスに対する水素プラズマの応答

rf アンテナ

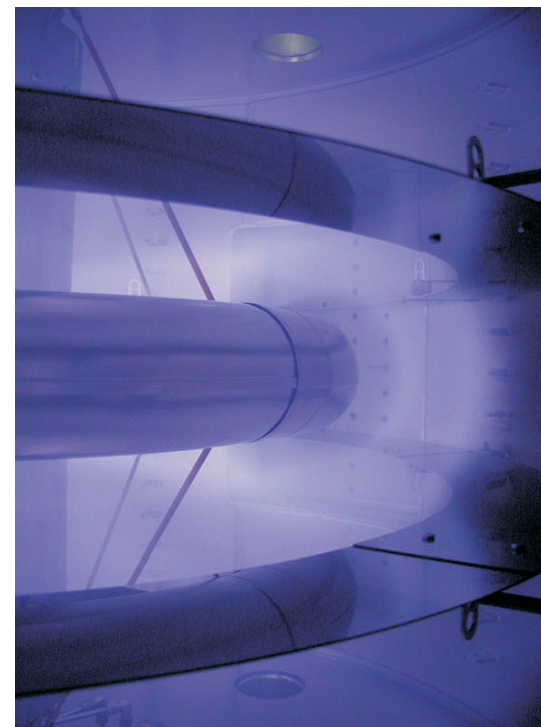
電極



電極負 (Vic=-300V)



Vic=0V
(電圧印加無し)



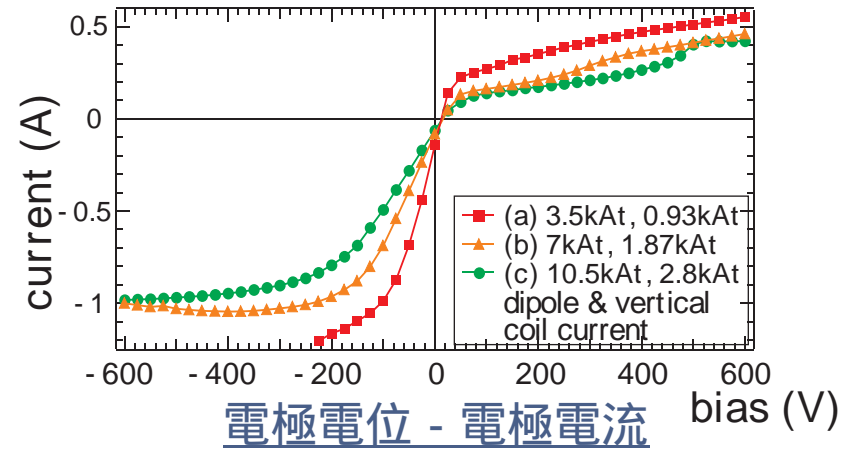
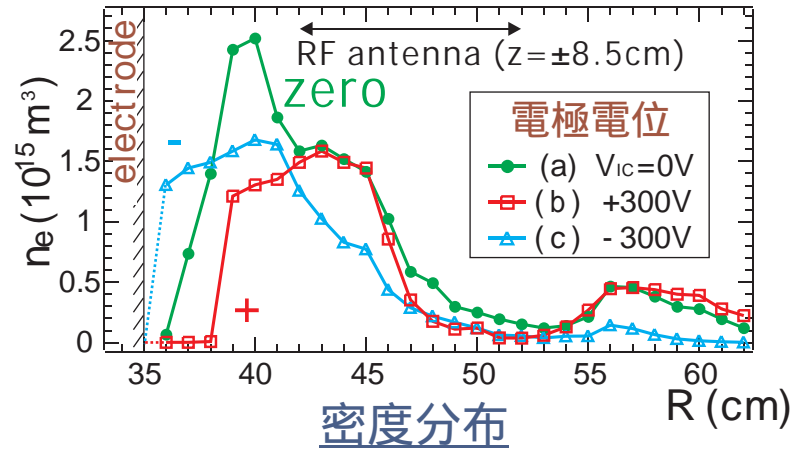
電極正 Vic=+300V

電極への電圧印加による発光分布の変化

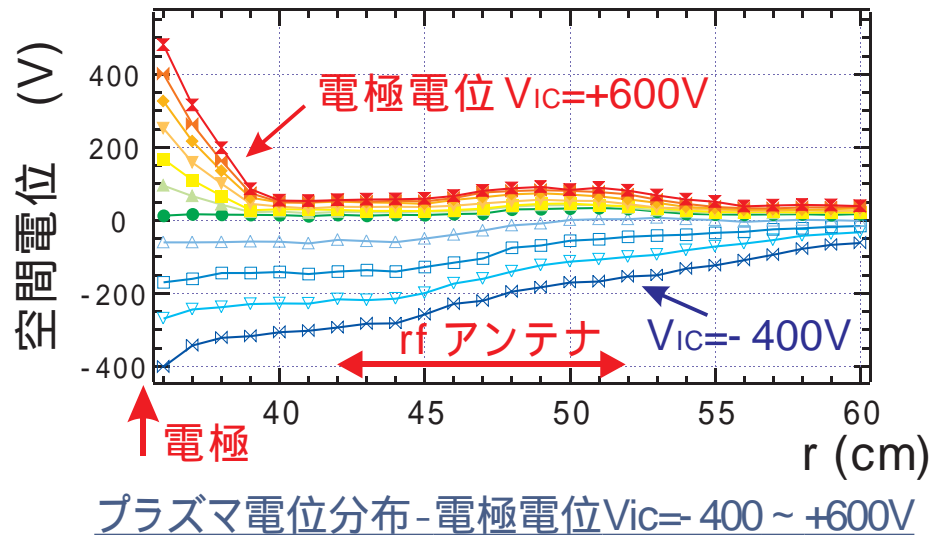
負バイアス時: 電極付近で発光が増加

正バイアス時: 電極付近に暗部が発生, 電極電流の減少.

電極バイアスに対する水素プラズマの応答



- 内部導体電極 (プラズマ中心部) のバイアス
正電極付近に低密度領域, 電極電流の制限



電極に正電位:

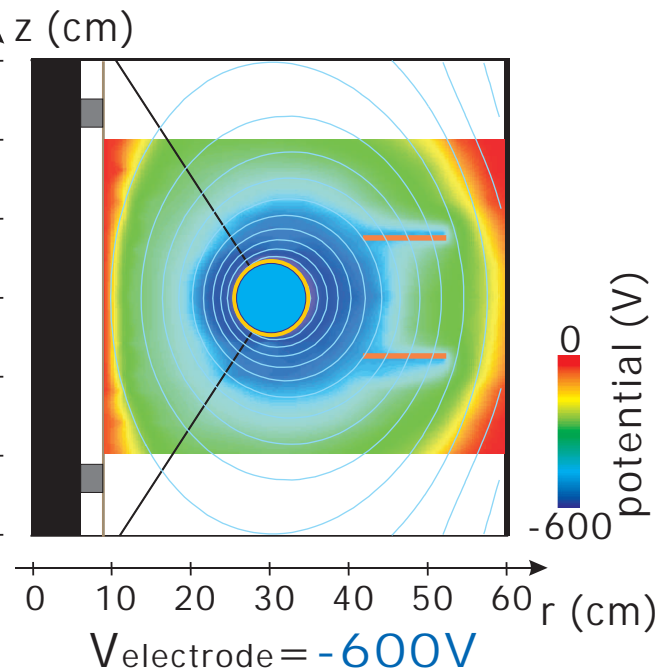
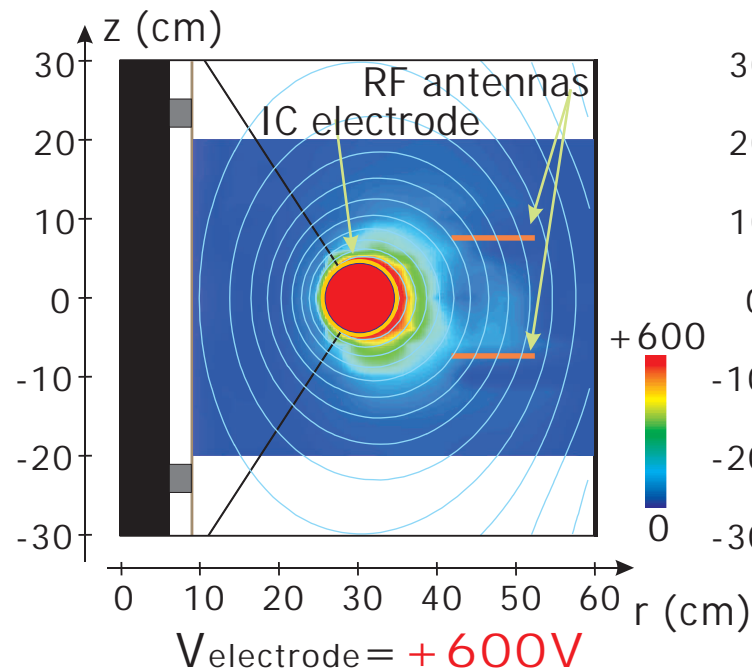
電極付近でプラズマ密度低下
プラズマ中での電位降下は小さい

電極に負電位:

電極付近で電子密度上昇
($n_e: 10^{13} \rightarrow 10^{14} \text{ m}^{-3}$)

プラズマ中に $\sim \text{kV/m}$ の電場形成

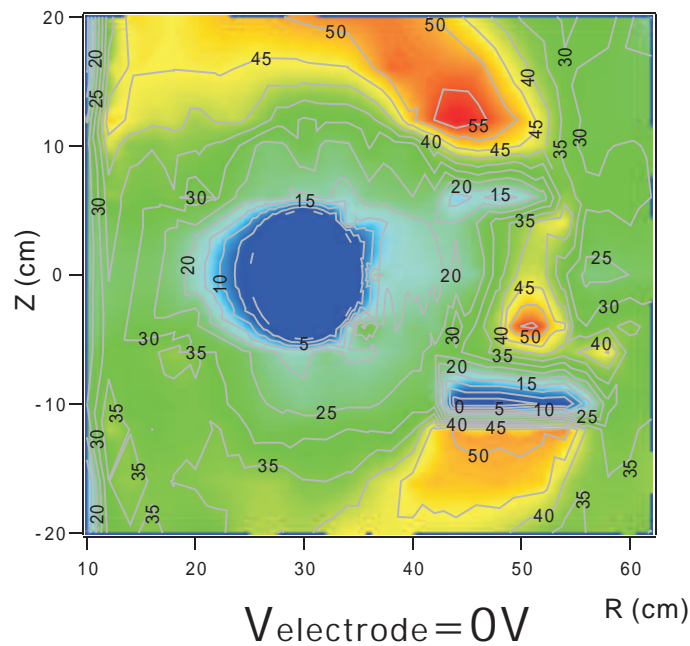
C型アンテナによる電場構造の擾乱



Proto-RT r-z断面
の空間電位分布

正電位:
電極周辺の
低密度領域
で電位降下

負電位:
容器壁までの
広い範囲に電場



磁力線を横切るアンテナ極板

閉じ込め領域に不正電場

アンテナ電位の非対称etc.

径方向電場の歪み

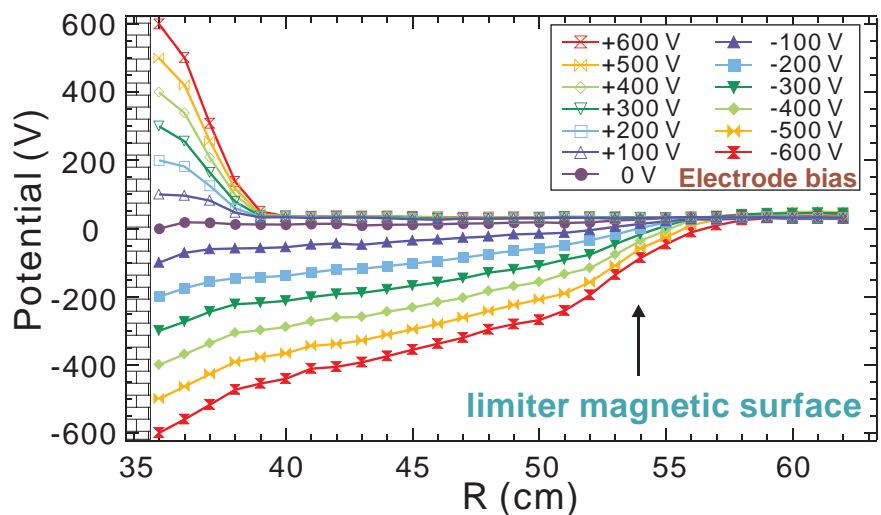
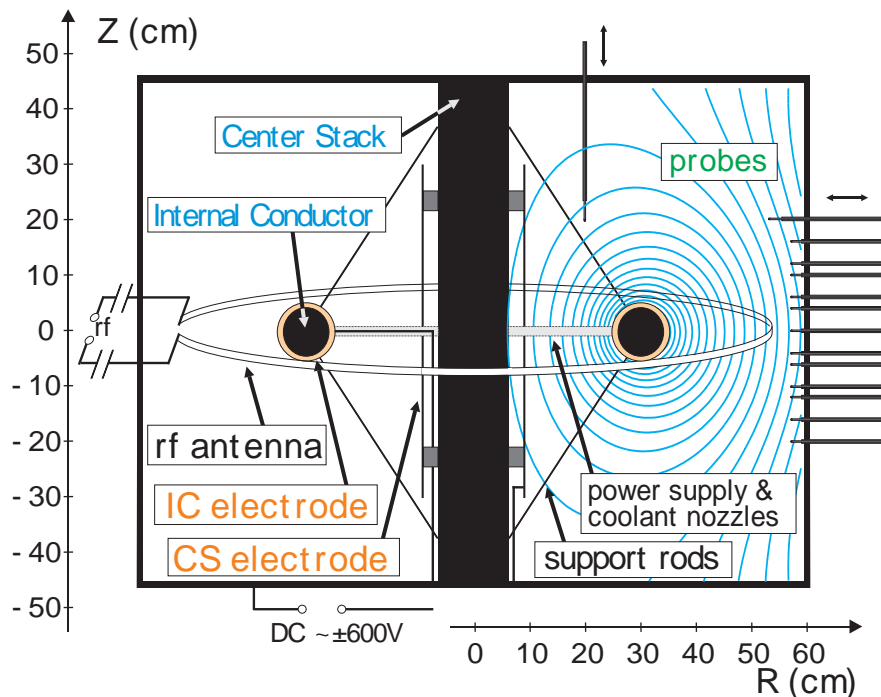
L型アンテナによるプラズマ生成

L型アンテナによるプラズマ生成と電場形成

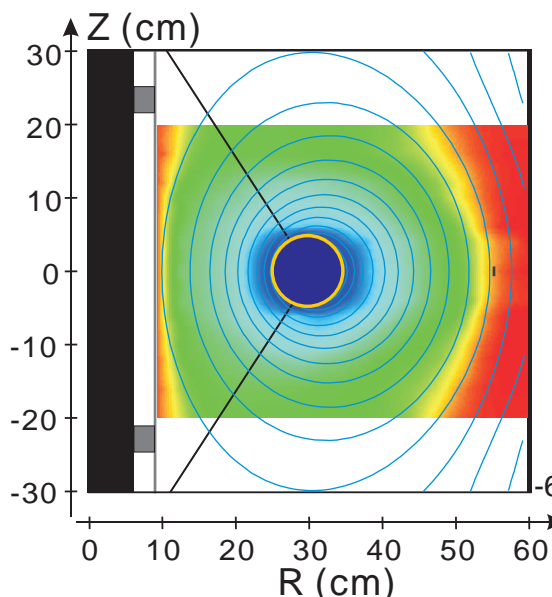
ループアンテナを用いたプラズマの生成
有効な閉じ込め領域の拡大

プラズマ内部の広い範囲で径方向電場:

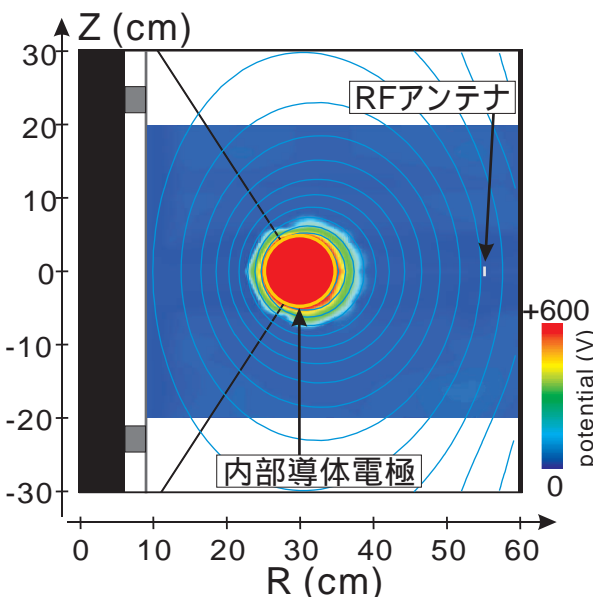
$$E_R = \sim 2 \times 10^3 \text{Vm}^{-1} \text{ (プラズマ内部)}$$



Z=0における電位分布 (Vic = -600 ~ +600V)



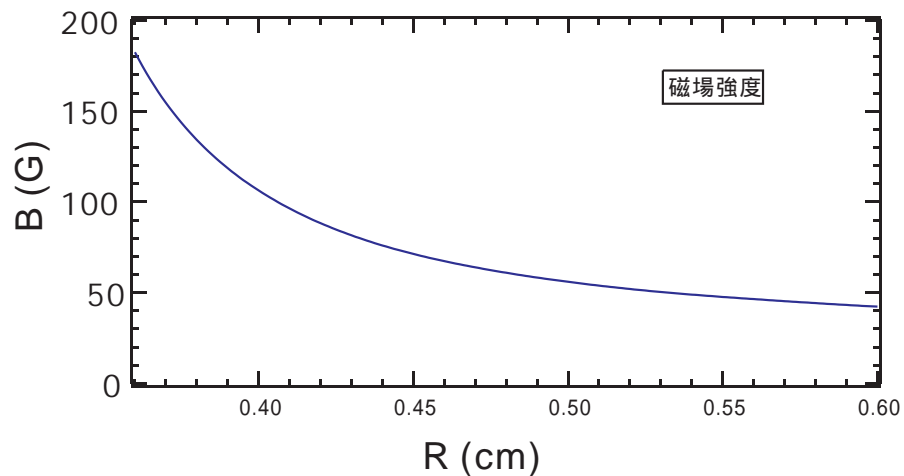
負電位バイアス (-600V)
電極電流 $I_{fil} = 0.6\text{A}$



正電位バイアス (+600V)
 $I_{fil} = 0.05\text{A}$

正負バイアス時の電位分布 (ポロイダル断面)

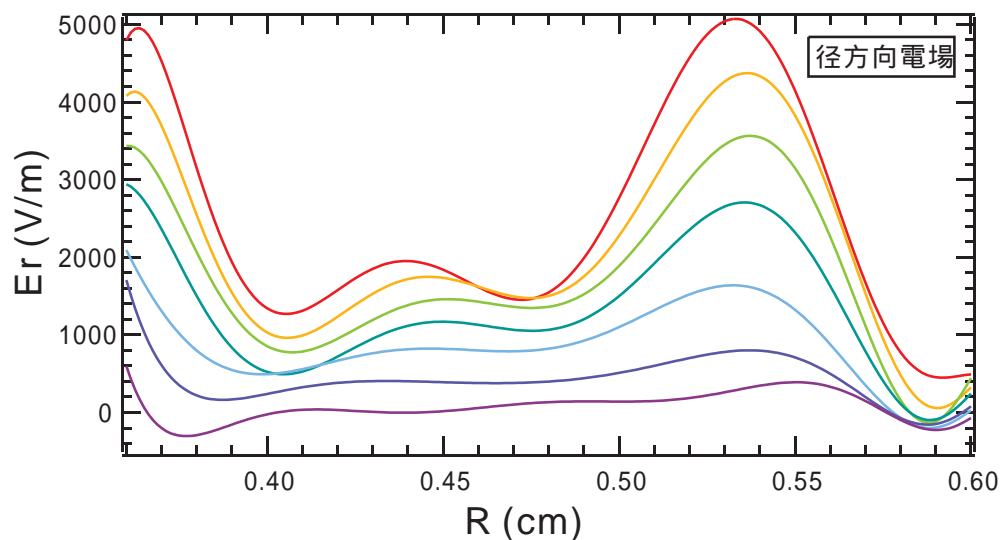
プラズマ中の径方向電場強度とトロイダル流速度



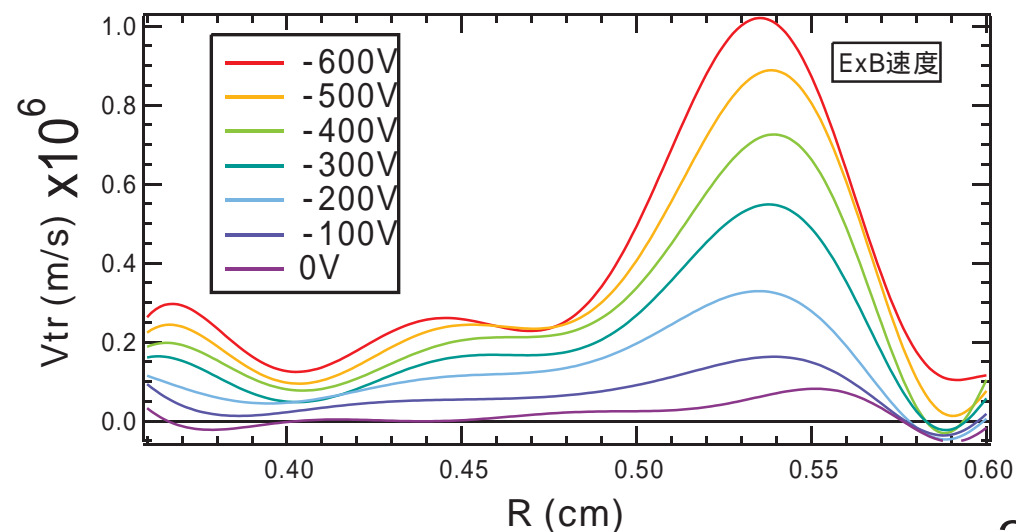
磁場強度分布

$E_R = \sim 2 \times 10^3 \text{Vm}^{-1}$ (プラズマ内部)

トロイダル流速: $2 \times 10^5 - 1 \times 10^6 \text{ms}^{-1}$

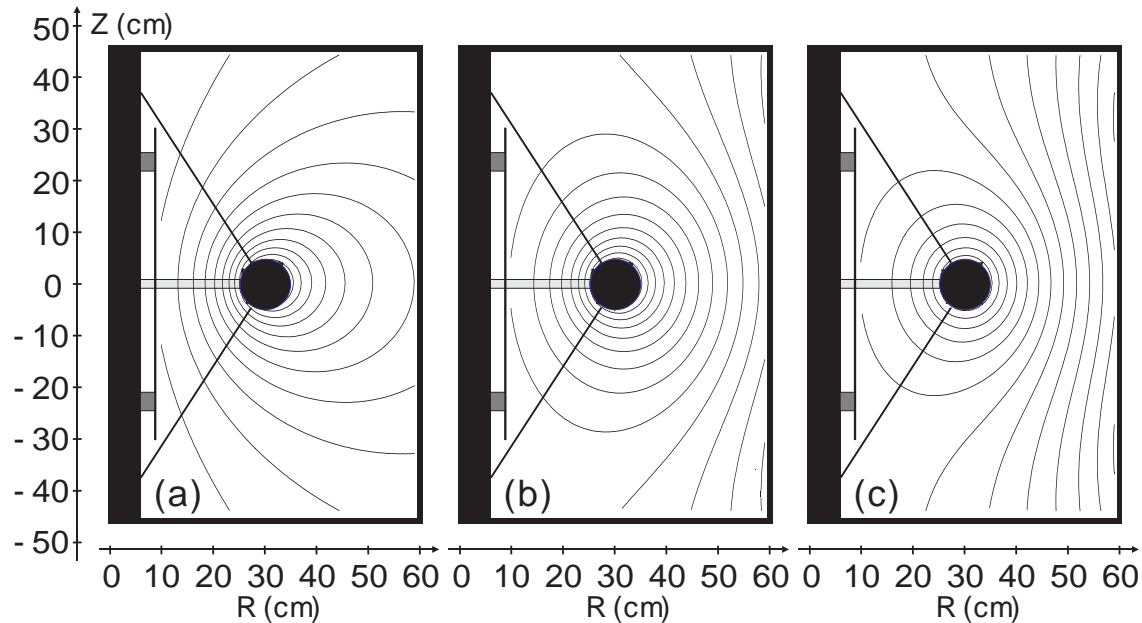


径方向電場強度分布



トロイダル流速分布

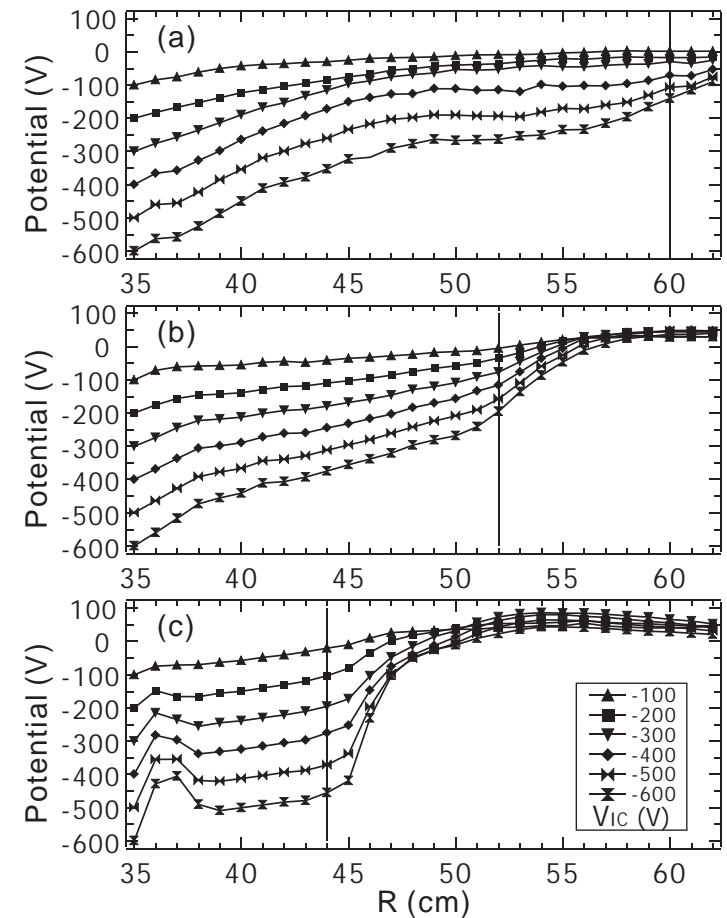
磁気面形状の変化と電位分布構造



ポロイダル断面における磁気面形状

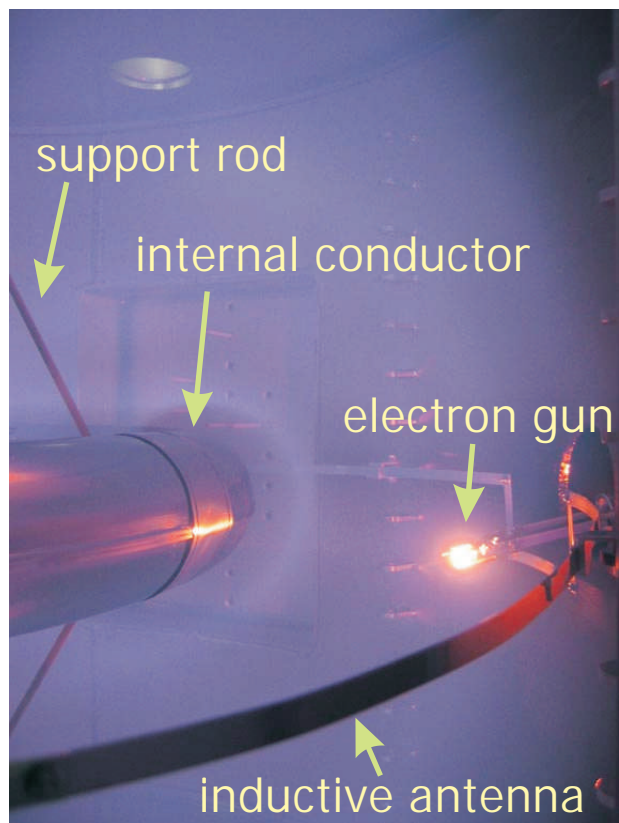
- (a) IIC=7kAT, IVF=0kAT, (b) IIC=7kAT, IVF=2.3kAT,
(c) IIC=7kAT, IVF=4.2kAT.

真空容器壁を横切る磁気面付近で急激な電位降下が観測されるが、プラズマ内部でも径方向電流に応じた電場が形成される。

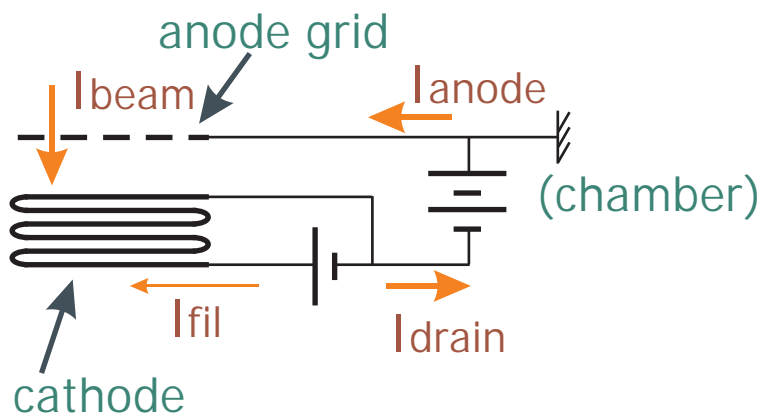
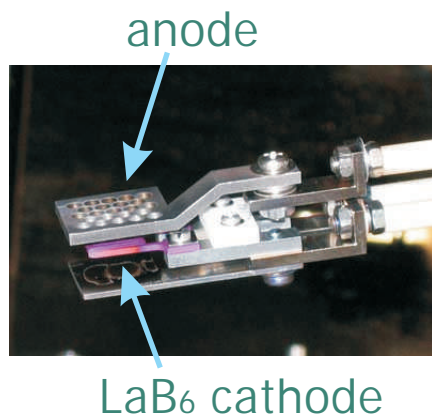


径方向の電位分布

プラズマ中への電子入射



電子入射中の装置内部



バイアスによる擾乱, 汚染の低減

・ 電子銃による入射

Cathode-anode間電位による初期加速

プラズマ外部/周辺部からの電子注入

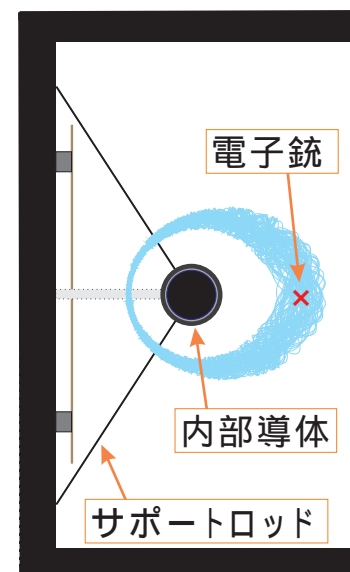
LaB₆カソード電子銃

引き出し電流 ~ 1A, 加速電圧 ~ 1kV

RFプラズマへの電子入射実験

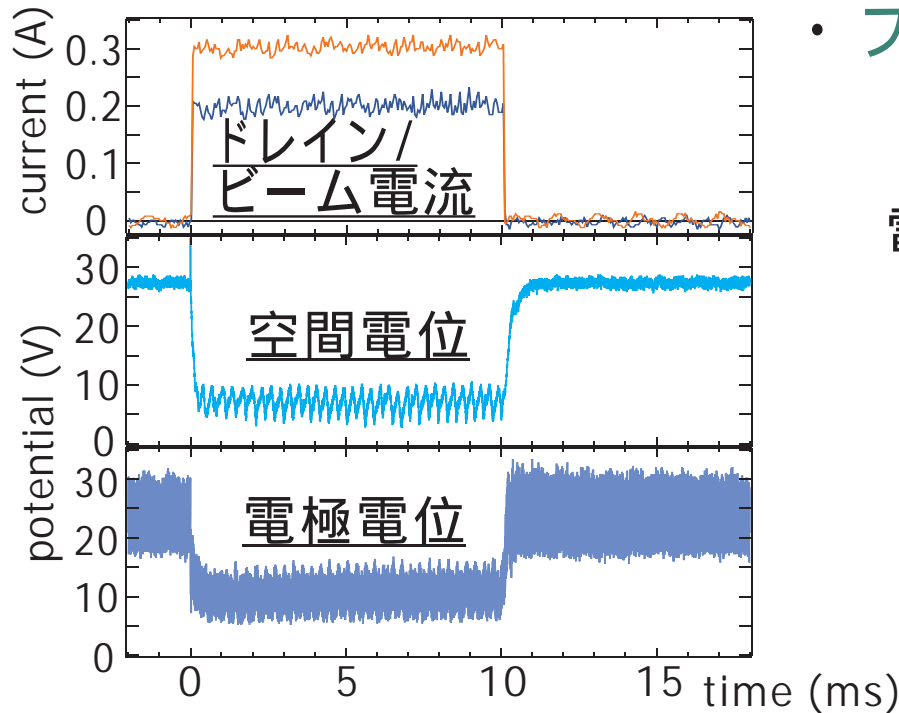
電子銃の構造と配置

13.56MHz rf による誘導結合
プラズマ中における電子銃

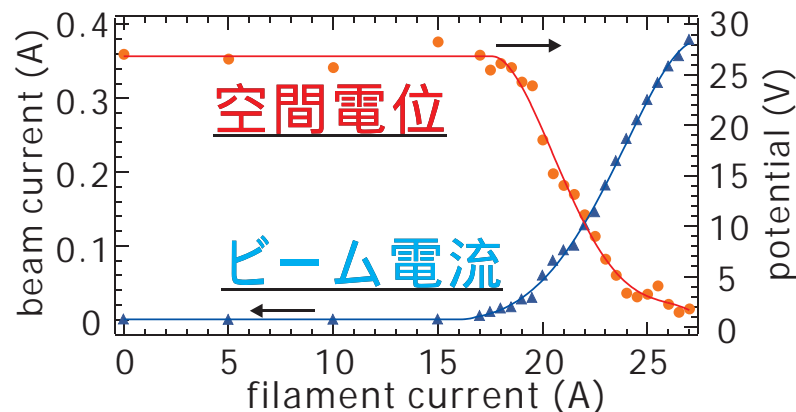


電子軌道 (電場無し)

電子入射中の電位分布



電子入射中のプラズマ電位の変化



ビーム電流と空間電位の飽和

- プラズマ周辺部からの電子入射

プラズマ空間電位の降下

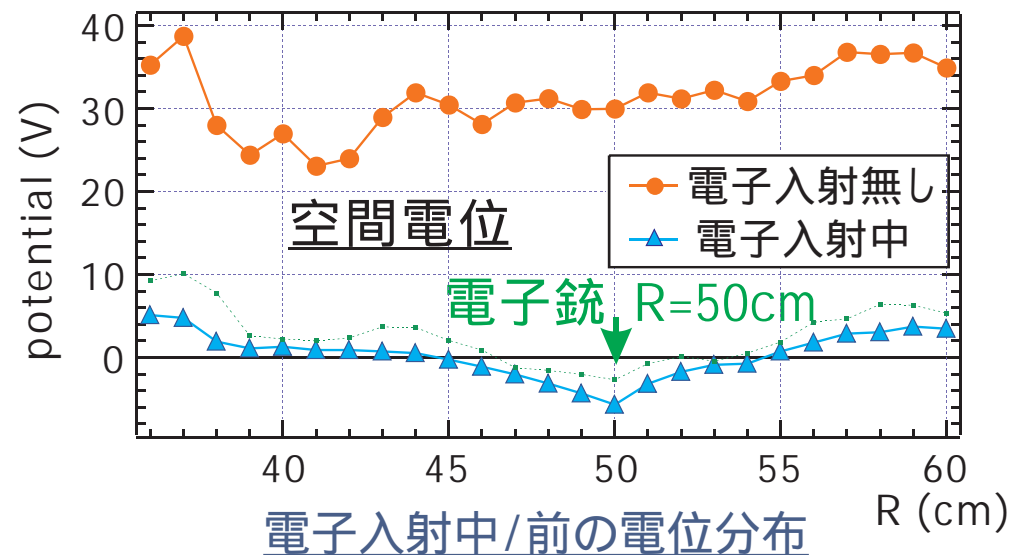
電位降下 $\sim 30\text{V}$, 電場 $\sim 50\text{V/m}$

空間電位はゼロ付近で飽和

(入射電子の加速電圧や
ビーム電流によらず)

磁場等による放電条件の変化

プラズマを介した電子損失



電子入射中/前の電位分布

内部電場を持つ中性プラズマ実験のまとめ

- ・ 内部導体型閉じ込め装置Proto-RTにおいて,
 1. 電極を用いた外部電場
 2. LaB₆カソード電子銃からの電子ビームの入射による径方向電場の生成実験を行った。
- ・ 粒子輸送には中性衝突が支配的 ($n_e = 10^{15} \text{m}^{-3}$, $T_e = 5 \text{eV}$), 電極バイアス時の電流値と径方向電場強度の傾向と一致。
- ・ 電極に負電位を与えた際, プラズマ内部に電位形成, トロイダル方向の流速 $\sim 10^5 \text{m/s}$ (イオン音速度 $\sim 10^4 \text{m/s}$)。
- ・ 電子入射によるプラズマの空間電位の降下は $\sim 30 \text{V}$ で, 空間電位の最低値はゼロ付近, プラズマを介した電子損失。

磁気面配位において、内部電場を持つプラズマの特性計測 (純電子プラズマ、水素プラズマを用いた実験研究)

- ・ トロイダル磁気面配位における電子プラズマの閉じ込め
古典拡散(中性粒子との衝突)が上限となる閉じ込め。
(背景圧力: $P=4 \times 10^{-7}$ Torr, 初期の電子密度: $n_e \sim 10^{13} \text{m}^{-3}$)
 $Q \sim 5 \times 10^{-9} \text{C} (3 \times 10^{10})$, $\sim 0.5 \text{sec}$ ($B \sim 100 \text{G}$ の dipole 磁場)
- ・ 中性プラズマ中の電場・流れ場の形成
超イオン音速のトロイダル流を形成
- ・ 電極に負電位を与えた際、プラズマ内部に電位形成、
トロイダル方向の流速 $\sim 10^5 \text{m/s}$ (イオン音速度 $\sim 10^4 \text{m/s}$) .

今後のプラズマ高密度化、低ガス圧力化により、高速流と
良好な閉じ込めを両立する為の基礎と位置付けられる。