

# 非一様磁場内で熱平衡状態にある 有限長非中性プラズマの生成実験

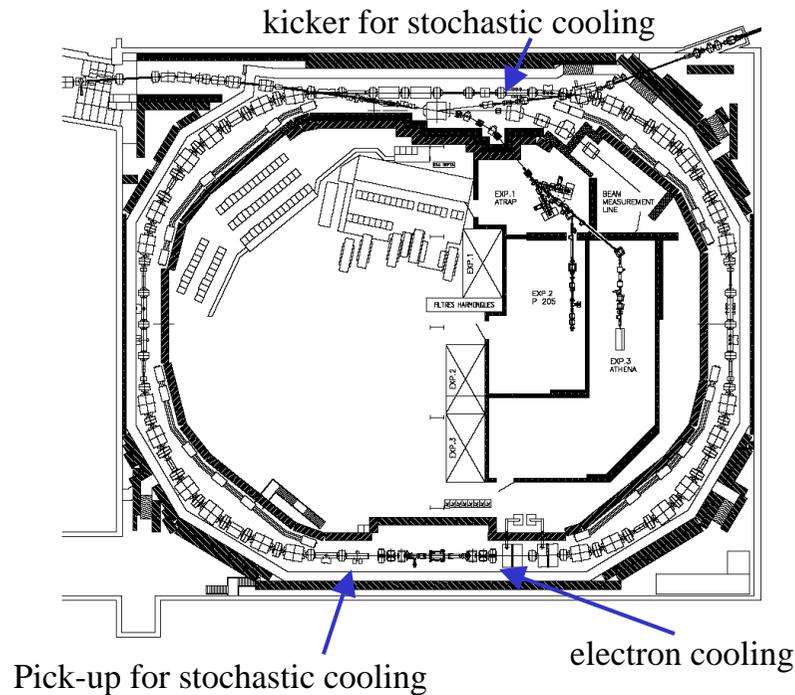
理研<sup>A</sup>, 東大総合文化<sup>B</sup>

齋藤晴彦<sup>A</sup>, 榎本嘉範<sup>B</sup>, 金井保之<sup>A</sup>, 毛利明博<sup>A</sup>, 山崎泰規<sup>AB</sup>

## 目次:

- ・ 研究背景と本研究の目的
- ・ Spindle cusp配位における純電子プラズマ閉じ込め実験
  - 閉じ込め時間とプラズマの空間分布
  - 電子温度と冷却時間
  - 回転電場によるプラズマの圧縮
- ・ まとめと今後の課題

# 研究背景と本研究の目的



AD (Antiproton Decelerator) facility at CERN

## ASACUSA collaboration\*

- ・低速反陽子ビームの引き出し
- ・トラップ中での反水素の合成
- ・磁場を用いた反水素原子の捕捉, 引き出し
- ・超微細構造測定によるCPT test

## カスプ装置を使用した反物質プラズマ研究\*\*

### 純電子プラズマによる基礎研究

- ・電子の効率的な入射と捕獲
- ・トラップ中でのプラズマの制御
- ・閉じ込め, 温度, 冷却, 他粒子との混合...

## カスプ装置における非中性プラズマ

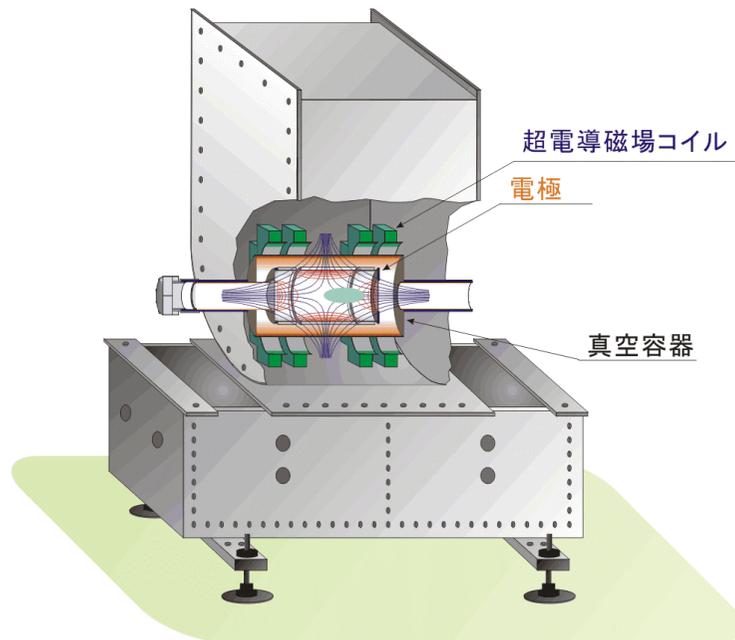
- ・閉じ込め性能のさらなる向上
- ・トラップ中での粒子混合への応用
- spindle cusp配位での閉じ込め特性
- ・平衡の存在\*\*\*の実験的検証
- ・非一様磁場中の非中性プラズマの特性

\*Y. Yamazaki, NIM B **154** 174 (1999).

\*\*A. Mohri and Y. Yamazaki, Europhys. Lett. **63** 207 (2003).

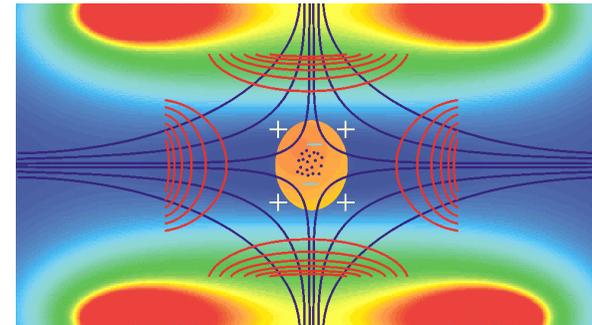
\*\*\*A. Mohri et al., 講演 22aWG-12

# Cusp Trap中の非中性プラズマの閉じ込め

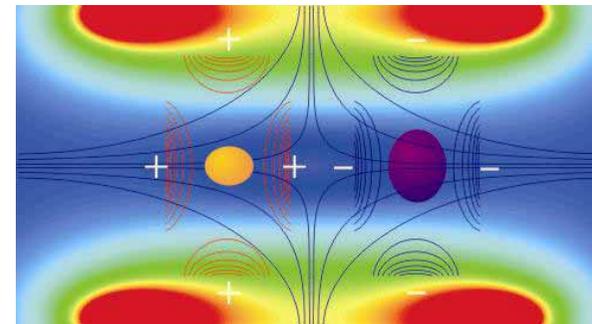


カスプトラップの俯瞰図と内部の12分割電極

## 磁場null点付近へのプラズマの閉じ込め



## 非対称な電場配位の利用

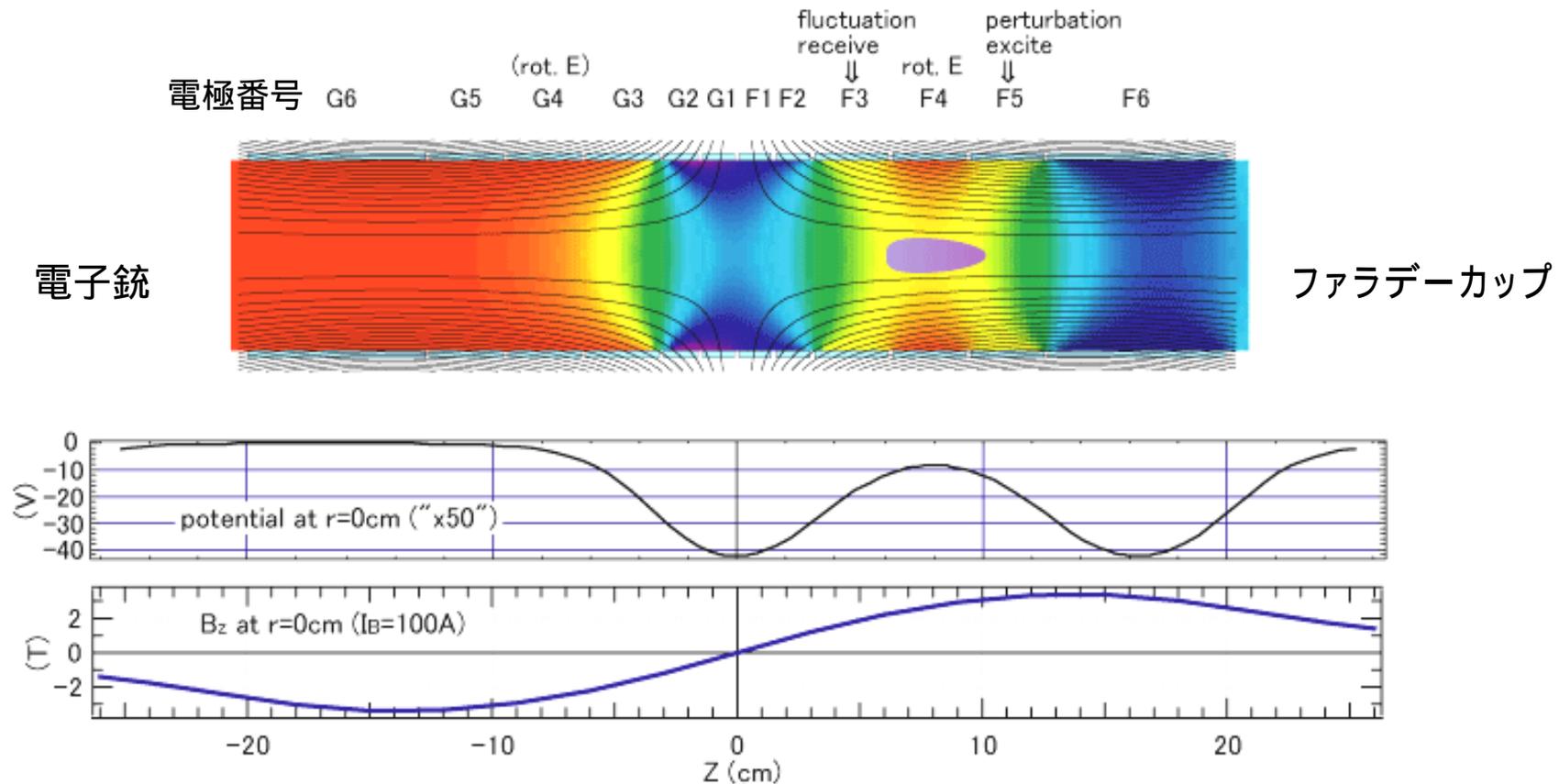


磁場強度分布と磁力線, プラズマの模式図

- ・磁場の上昇による閉じ込め改善
- ・各粒子群の分離による自由度の向上 (回転電場制御, 閉じ込め電磁場等) が期待される.

片側で純電子プラズマによる基礎実験

# Spindle Cuspの非中性プラズマ閉じ込め電磁場配位

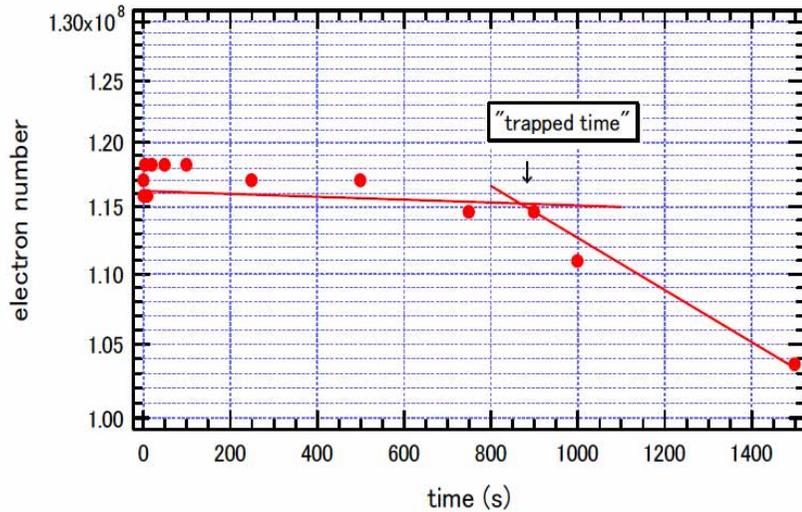


(上)トラップ内の電位分布と磁力線, (中)軸上の電位分布と(下)磁場強度分布

- ・純電子プラズマの閉じ込め領域を $Z=0$ の磁場null点近傍から移動
- ・4分割電極による回転電場印加, 軸方向への波動励起
- ・Faraday cupによる電子プラズマの分布計測

閉じ込め時間, 電子温度, 波動励起, 回転電場の効果等を測定

# 閉じ込め電荷とプラズマ分布の時間発展

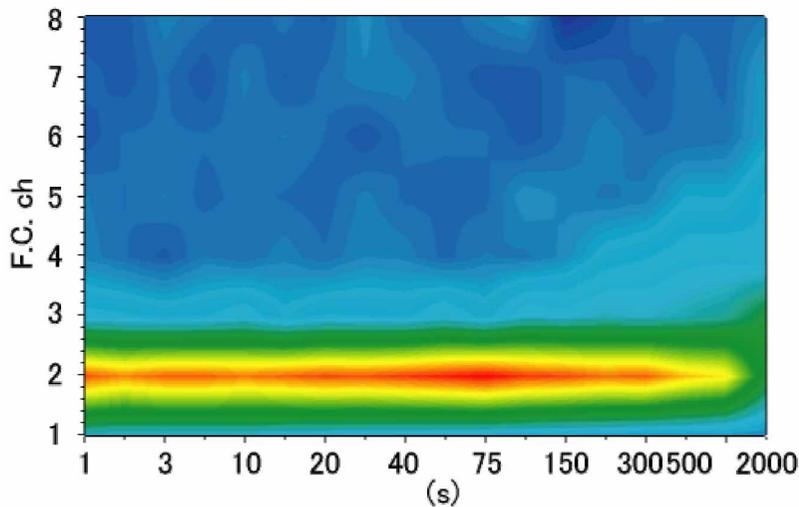


$I_B=80A(B_{max}=3T)$ 初期電子数 $1.2 \times 10^8$ 時の閉じ込め電荷

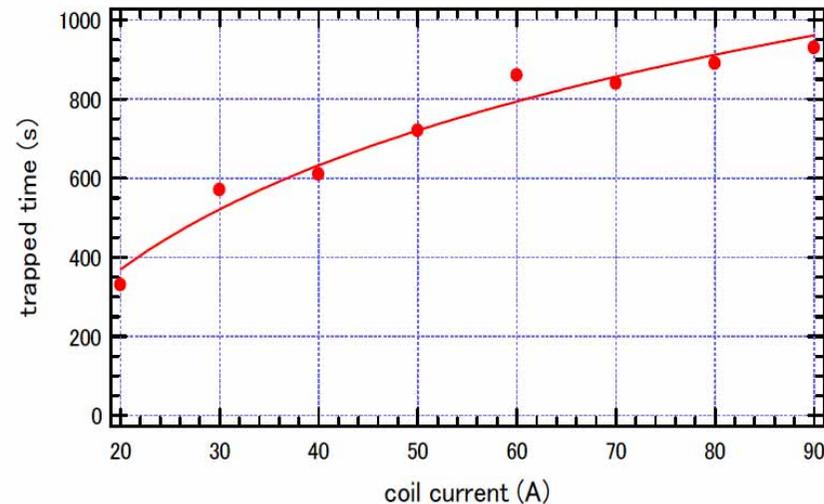
## ・ トラップ領域の強磁場側への移動

- ・閉じ込め時間は5倍程度以上まで延長
- ・Faraday cupによる電子プラズマの分布計測  
プラズマが膨張し、外壁に達するまで電荷が安定に保持される。

$1.2 \times 10^8$ 個の電子雲 (密度 $1.5 \times 10^8/cc$ )  
を最大で1000秒程度トラップ  
( $P=5 \times 10^{-10}Torr, B_{max}=3.5T$ )

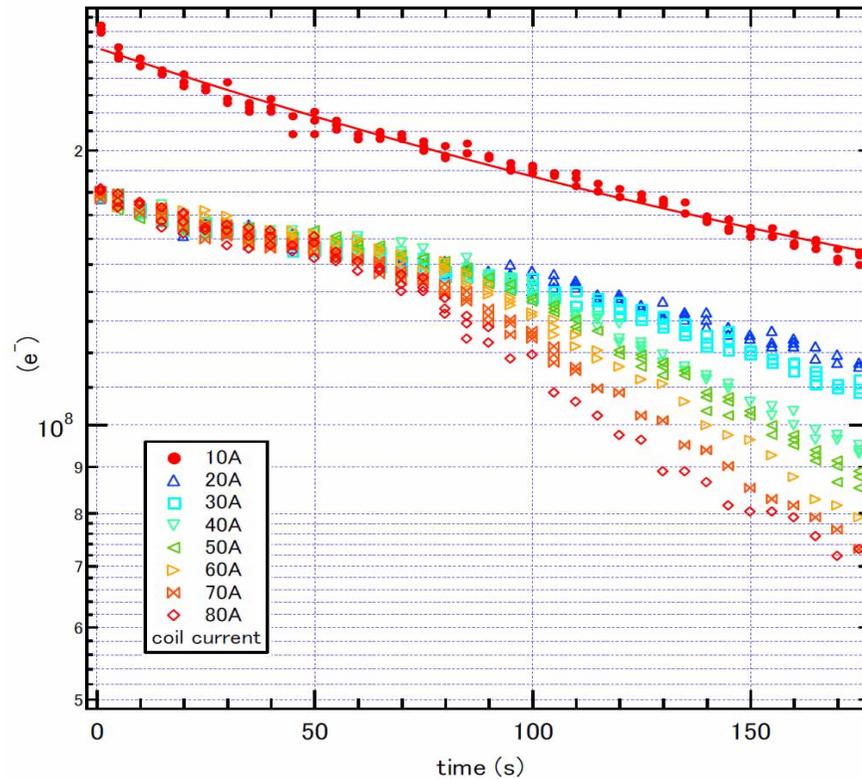


Faraday cup各電極の捕集電荷の時間変化



閉じ込め時間の磁場強度依存

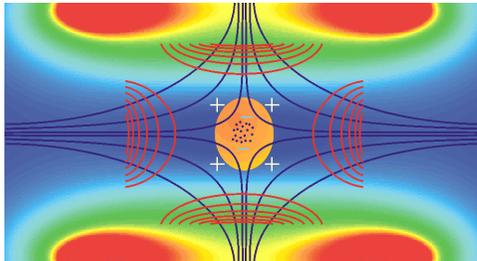
# 磁場null点付近の閉じ込め配位(従来)との比較



- ・同一電荷の条件で, 安定な閉じ込め時間は150秒程度.
- ・特に電荷が大きい時に閉じ込め性能が悪化(最初から壁に接触)

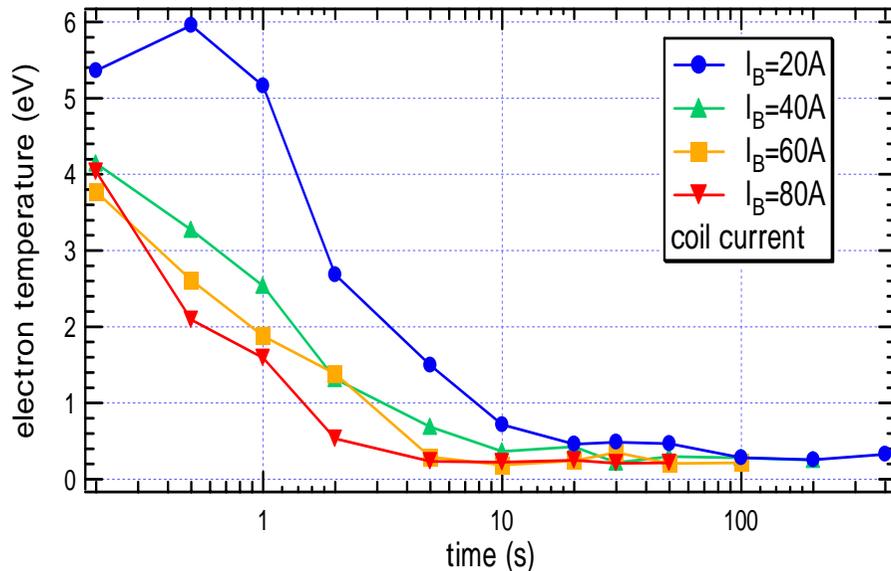
閉じ込め領域を磁場ヌル点から移動させる事で改善可能

磁場ヌル点付近にトラップした電荷の時間発展  
(真空度, 磁場強度他のパラメータは同一)



(磁場ヌル点付近の閉じ込め配位)

# 電子温度



電子温度の時間発展

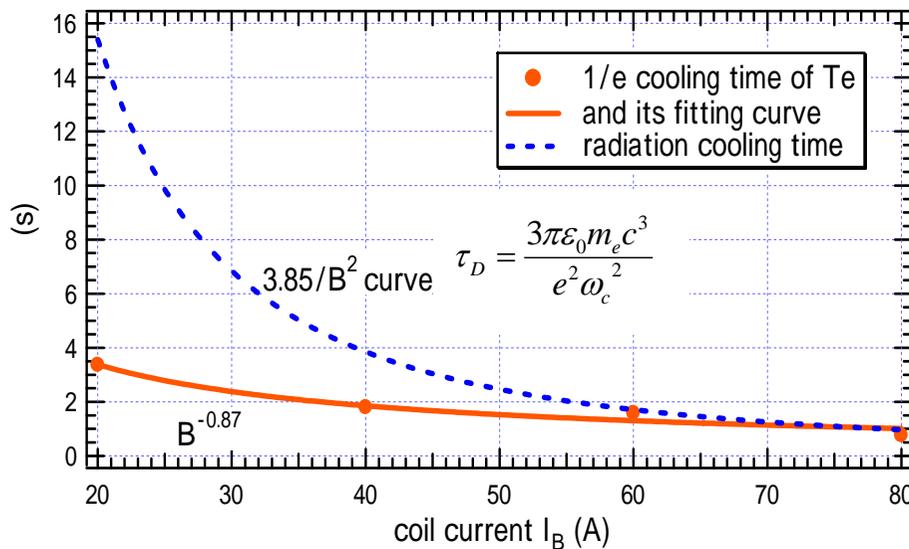
- ・再結合による反水素の合成
- ・反水素の捕獲・制御

を行う上で粒子群の冷却が重要.

- ・入射から0.2sの電子温度は~5eV, 10秒程度で~0.2eV.

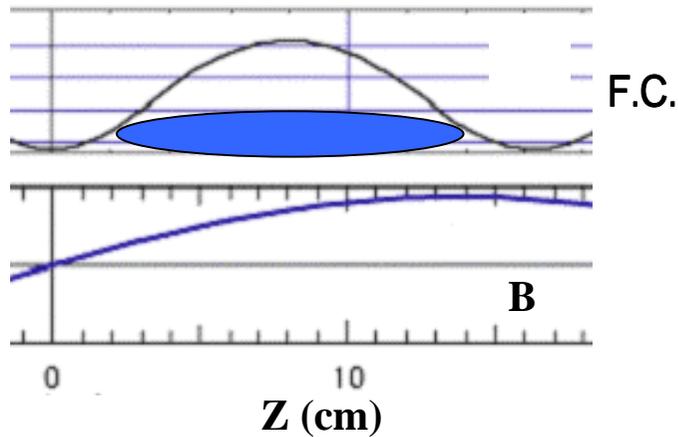
- ・~0.2eV以下には温度低下しない, ノイズ等の影響?

- ・冷却時間の磁場強度依存性  
シンクロトロン冷却時間より早い?

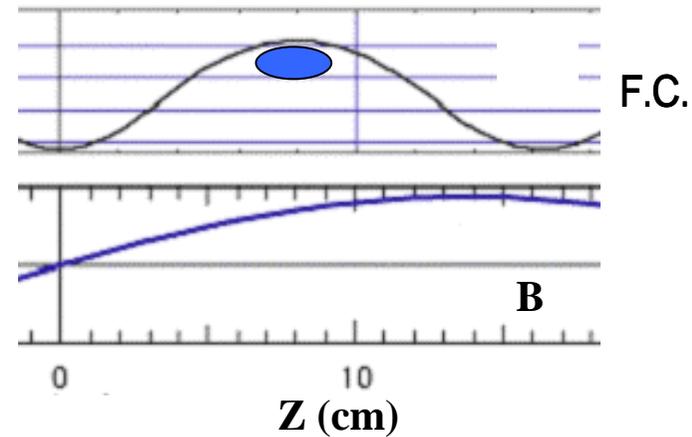


シンクロトロン輻射冷却時間との比較

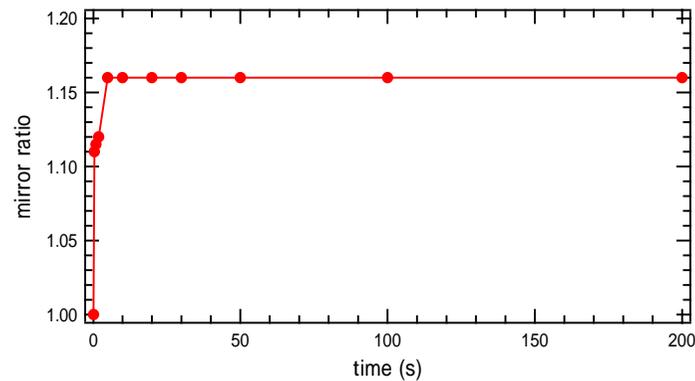
# ミラー効果を考慮した冷却時間の補正



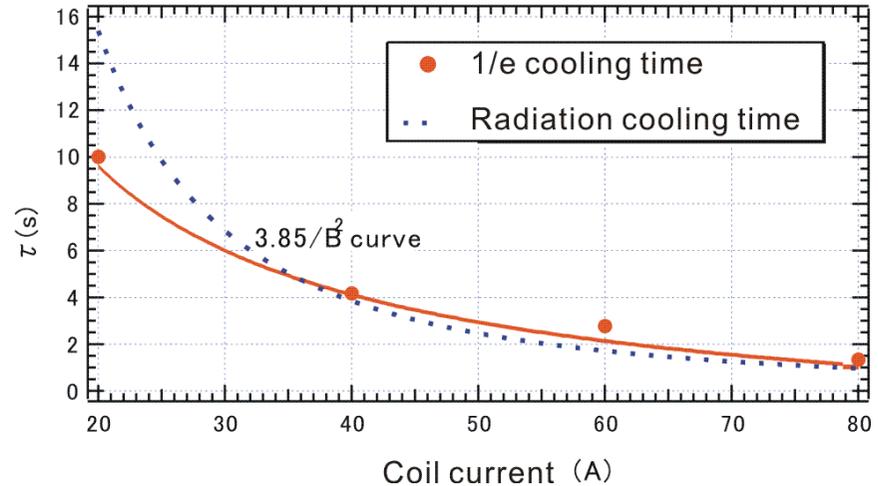
閉じ込め初期の高温時



閉じ込め時間経過後の低温時



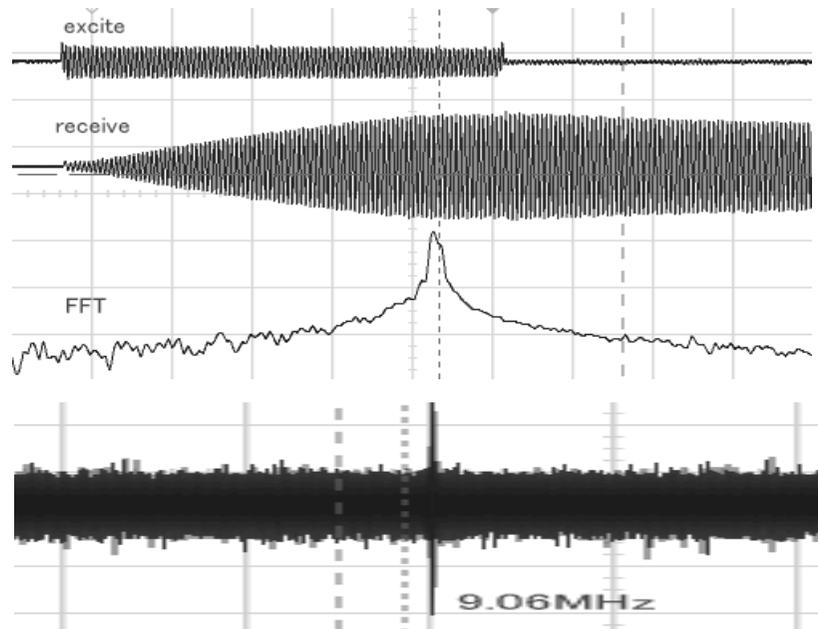
電子端部における磁場強度のミラー比



補正した冷却時間の磁場強度依存

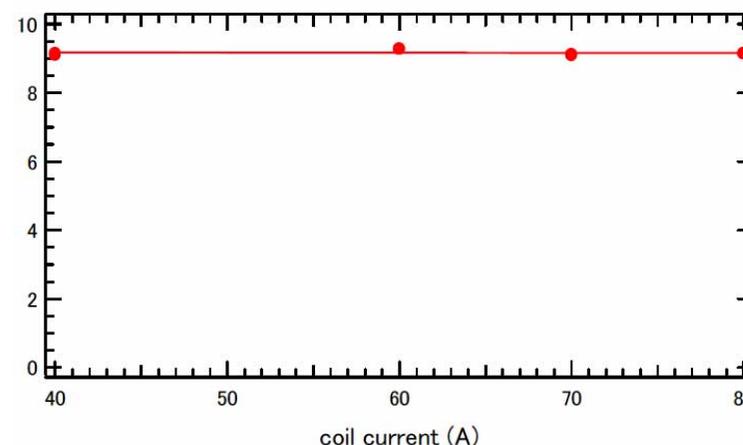
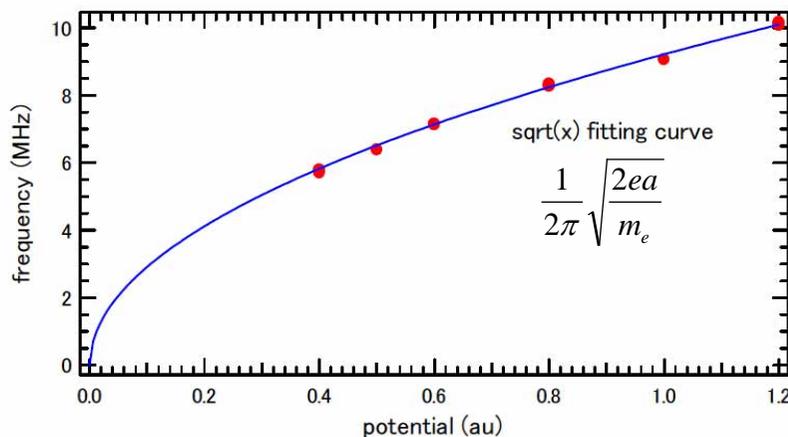
時定数は3倍程度に延長． 測定誤差や非一様磁場の影響？

# 外部RF印加による波動の励起



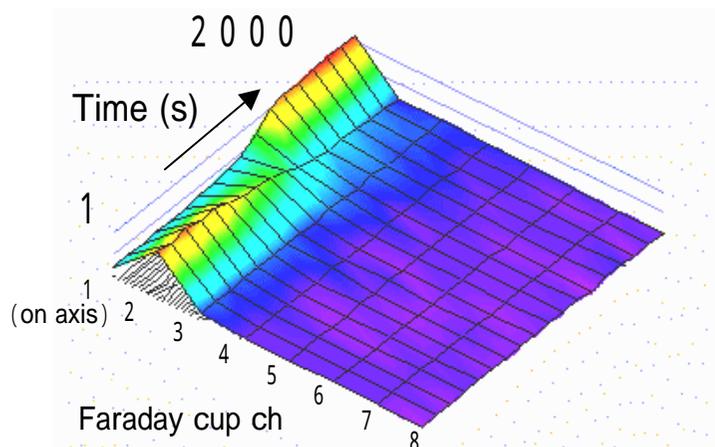
- ・外部より軸方向にRF印加 共鳴周波数
- ・ $B \sim 1T$ , 電位井戸  $\sim 50V$ の条件で, 励起可能な周波数は $f=5 \sim 10MHz$ に唯一つ存在 ( $\Delta f \sim 20kHz$ ).
- ・周波数の依存性は $f \propto \sqrt{1/2}B^0$
- ・静電井戸中の電子のbounceに一致
- ・それ以外のモードは観測されない.

## 外部からの揺動励起と、周波数掃引(5-15MHz)時のプラズマの応答

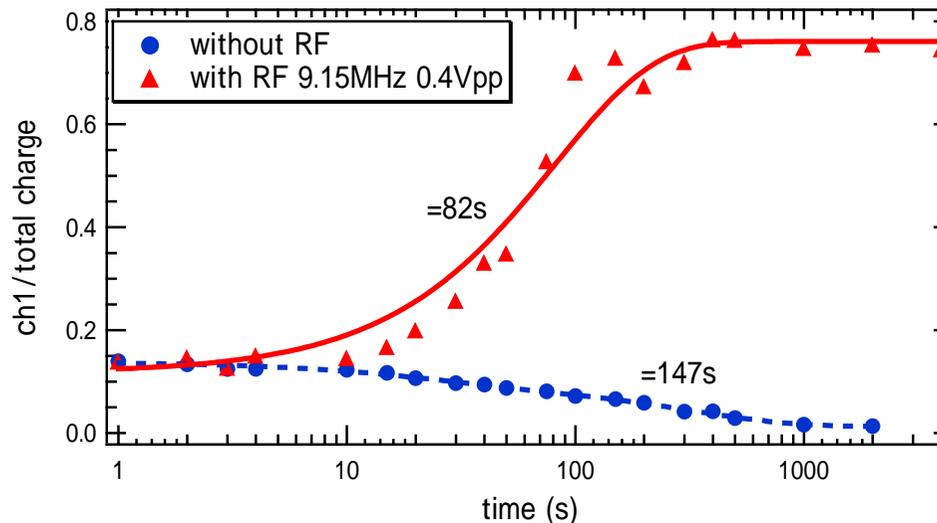


Resonance frequencyの(左)外部電場強度(右)磁場強度に対する依存性

# 回転電場の印加によるプラズマの圧縮

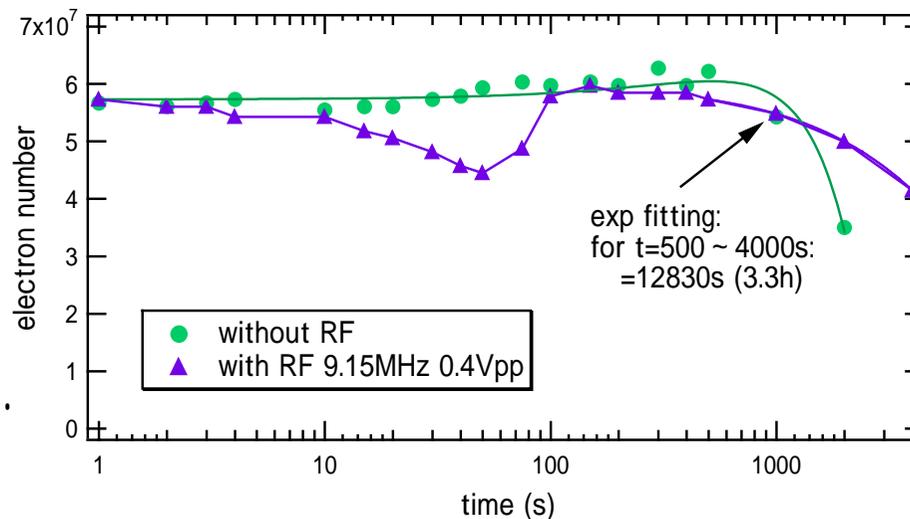


RF印加時のFaraday cup各電極の捕集電荷 (t=1 ~ 2000s)



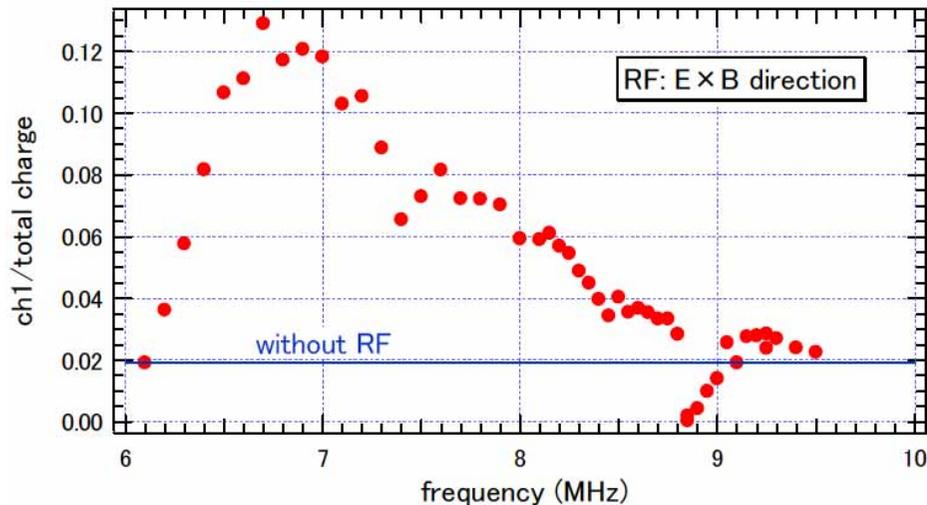
Ch1電荷 / 総電荷 (圧縮度合い) の時間発展

- ・共鳴周波数付近の回転電場の引加  
プラズマは径方向に圧縮
- ・閉じ込め特性:  
RF非印加時:  
プラズマは膨張し, 端部が容器壁に接触する付近から急速に電荷が減衰.
- RF印加時:  
圧縮後の電荷減衰が非常に小さく,  
閉じ込め時間が大きく改善.

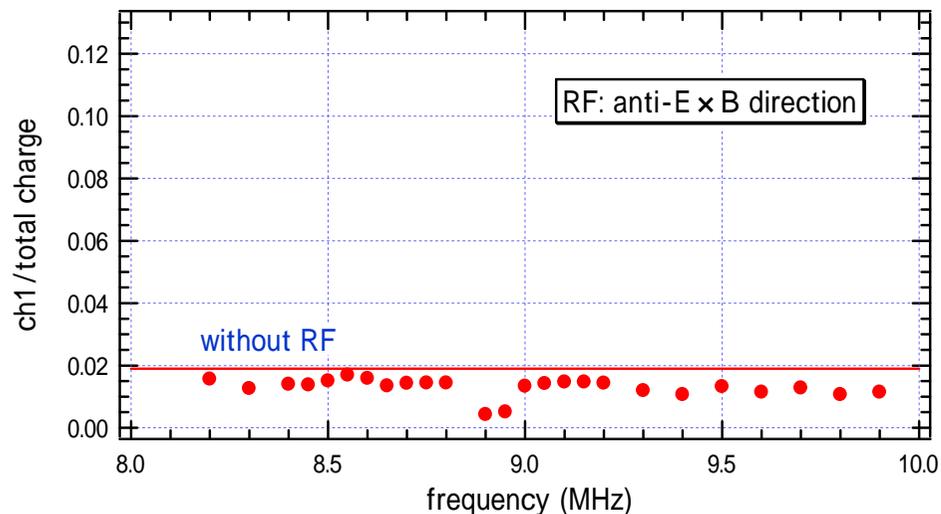


プラズマ電荷の時間発展

# プラズマ圧縮の周波数特性



E × B方向への回転電場印加時の圧縮



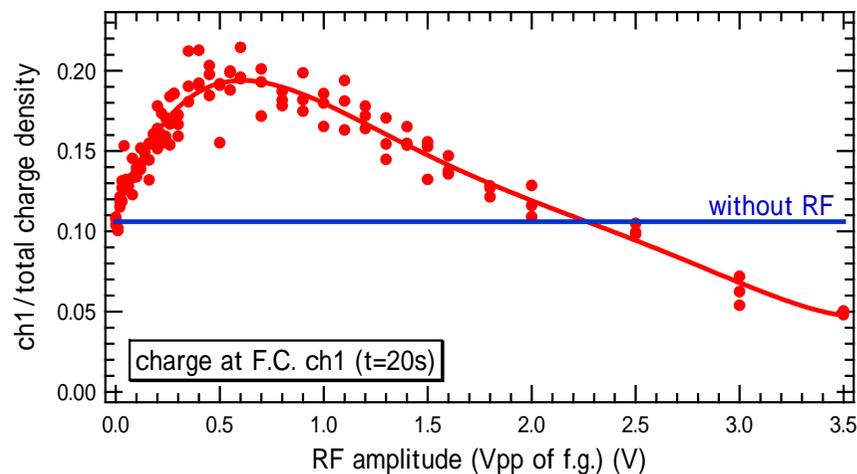
Anti-E × B方向への回転電場印加時の圧縮

最も圧縮の効果が良好な条件で、  
t=20sまで回転電場を印加したケース  
(下図参照)の周波数依存性。

圧縮が観測されるのは：

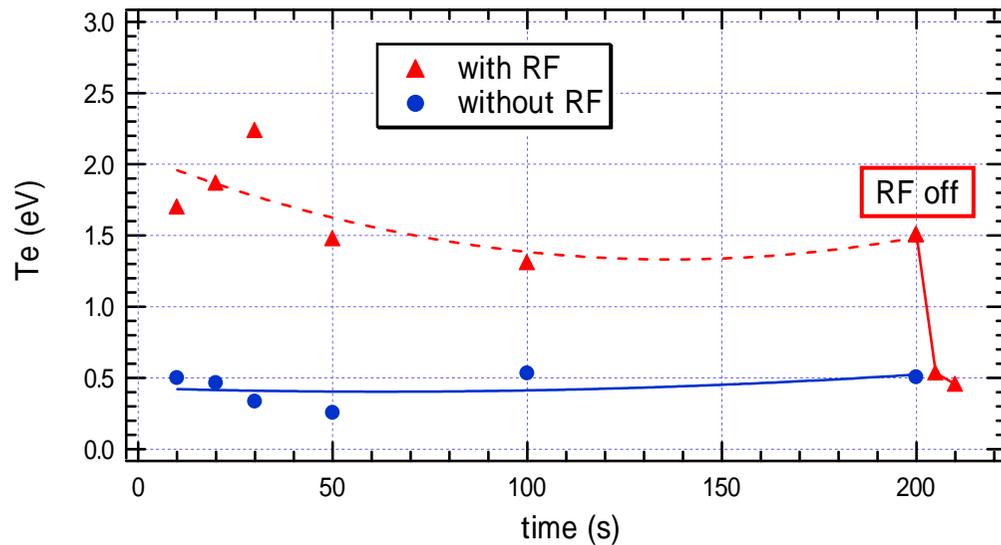
- ・プラズマのE × B回転と同方向の電場
- ・共鳴周波数の両側に広い圧縮可能領域。

cf)  $f_{\text{rotation}} \sim 200\text{kHz}$ ,  $f_{\text{resonance}} = 8.9\text{MHz}$



引加電圧の絶対値と圧縮

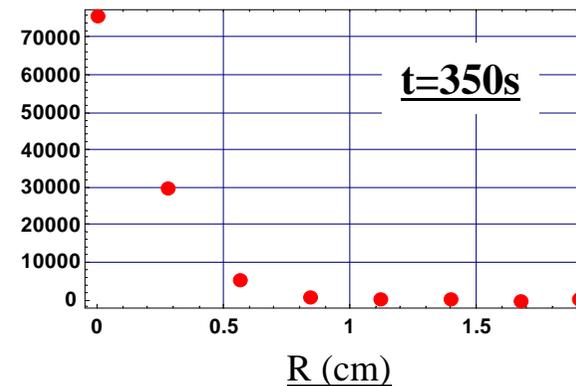
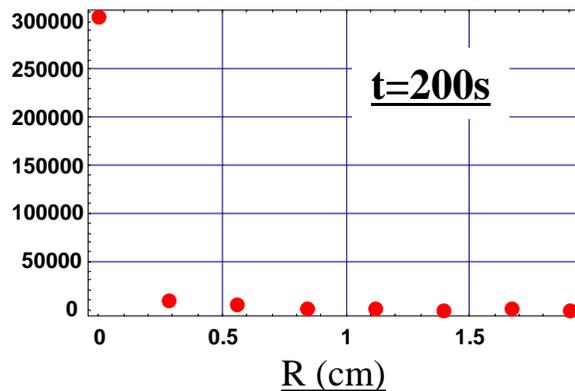
# 回転電場の印加と電子温度



- ・RF印加によるプラズマの加熱
- ・特に圧縮に有効な強度のRF印加時には,  $T_e \sim 1.5\text{eV}$ .
- ・一方, 圧縮後の分布は  $\sim 100$  秒程度以上維持される.

回転電場の印加 / 非印加時の電子温度の時間変化

圧縮後, 径方向に拡散する前にプラズマの冷却が可能

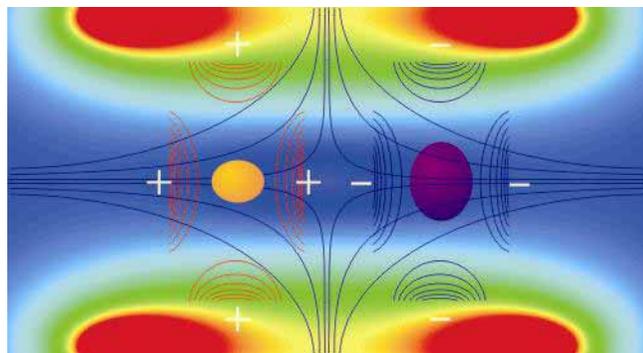


回転電場の(左)停止直後, (右)停止後150sの径方向密度分布

## まとめと今後の課題

Spindle cuspにおける非中性プラズマ生成。  
(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)

- ・ 強磁場側に閉じ込め領域を移動する事により、閉じ込め性能がさらに改善。  
 $B_{\max}=3\text{T}$ ,  $1.2 \times 10^8$ 個の電子雲(密度 $1.5 \times 10^8/\text{cc}$ )の閉じ込め時間 $\sim 1000$ 秒。
- ・ 回転電場を用いた圧縮の効果を確認。  
回転方向にプラズマの回転周波数(数百kHz)の数十倍程度の周波数のRF  
その際の閉じ込め時間は数時間程度。



- ・ 今後の課題:
  - ・ プラズマ圧縮の機構の理解。
  - ・ 電子温度の下限の原因特定。
  - ・ 異種粒子群の効果的な入射, 混合方法。

反水素原子の合成に適した配位の実現