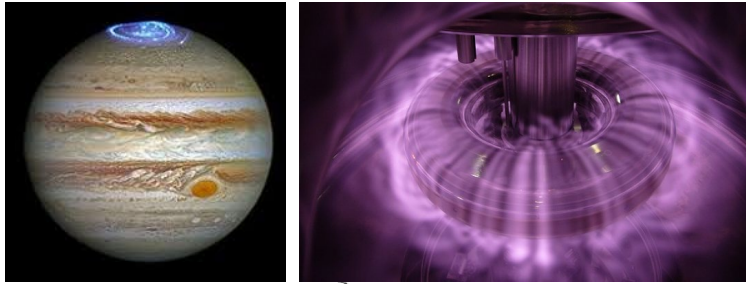


# 高温超伝導小型巻線を用いたダイポール磁場 荷電粒子トラップの開発計画

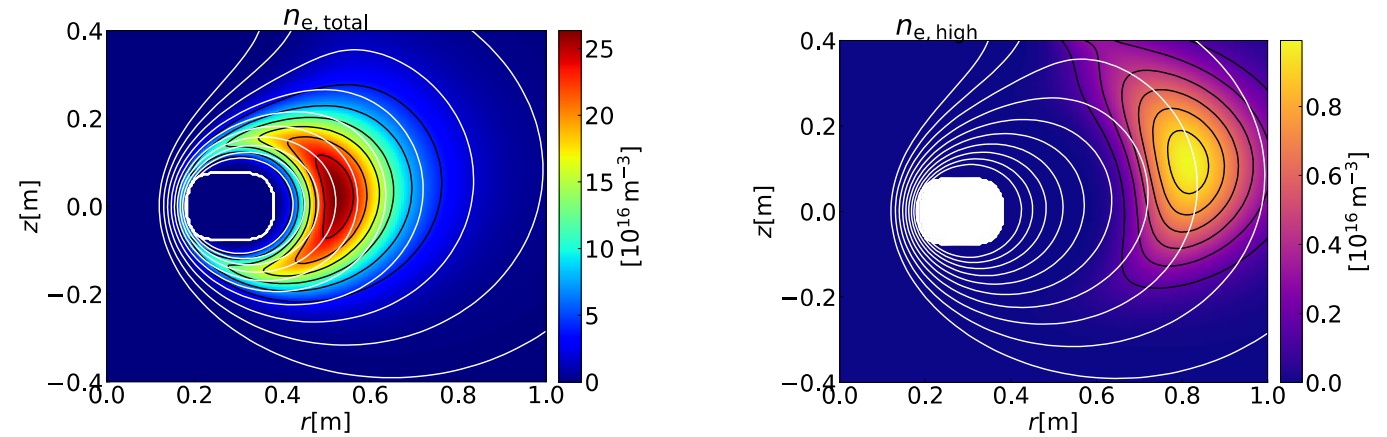
東大新流域, 核融合研<sup>A</sup>  
齋藤晴彦, 谷岡樹, 西浦正樹<sup>A</sup>, 吉田善章

# ダイポール磁場配位では、高 $\beta$ プラズマ、非中性(純電子)プラズマ、 また陽電子の高性能閉じ込めが観測・実現された

2010 Z. Yoshida+ Phys. Rev. Lett. **104**, 235004.  
2019 M. Nishiura+ Nucl. Fusion **59**, 096005.

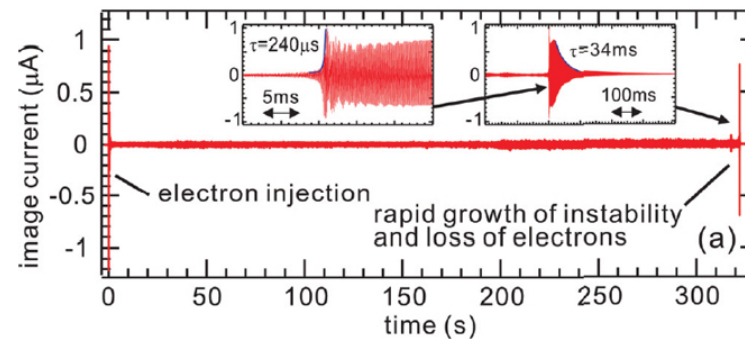


## ● 先進核融合を目指す超高 $\beta$ プラズマ平衡

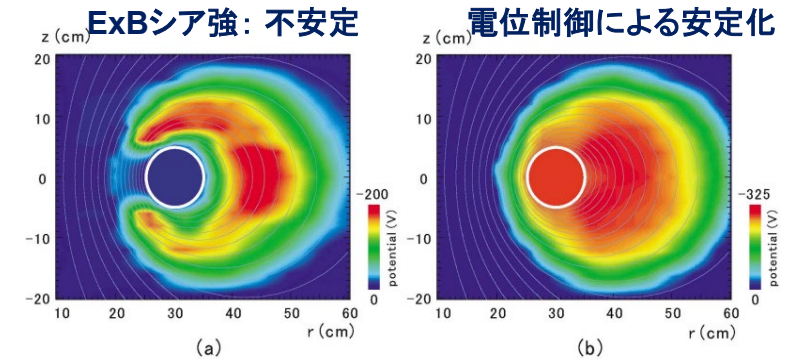


超高 $\beta$ ( $\sim 100\%$ , 高温電子が圧力を担う)プラズマの安定生成(>1s)

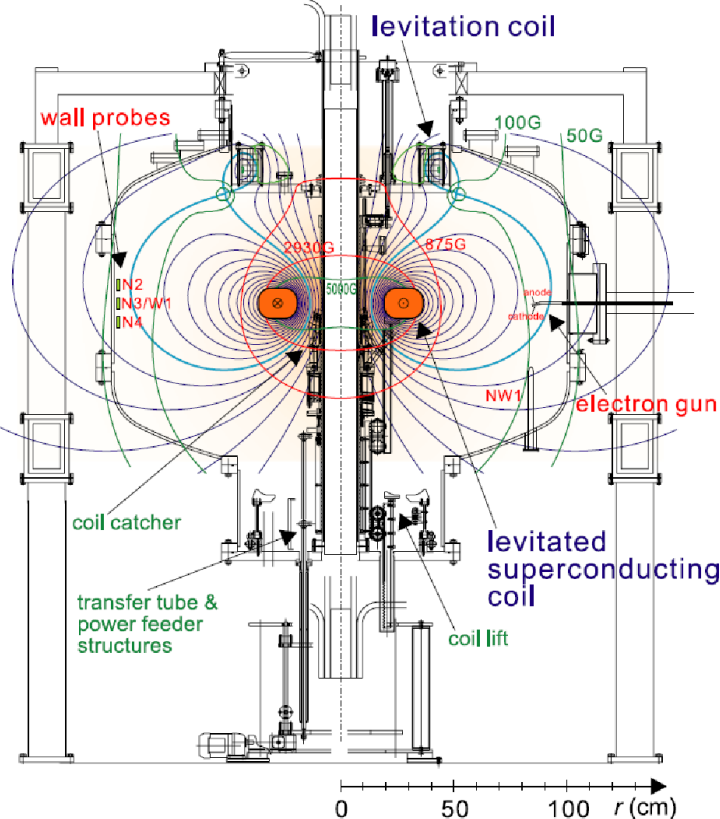
## ● トロイダル配位による「非中性」プラズマ閉じ込め



純電子プラズマの300秒以上の閉じ込め



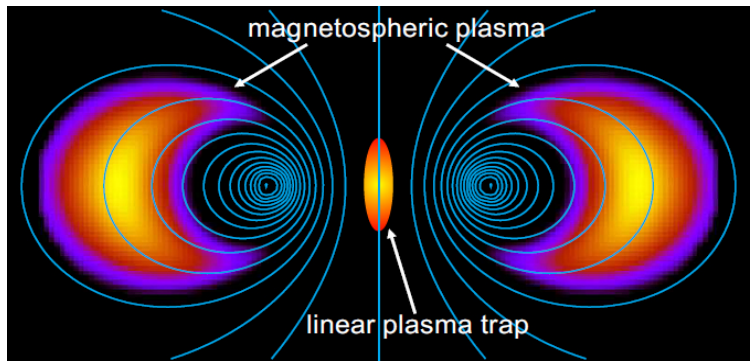
シア流の抑制によるプラズマ安定化



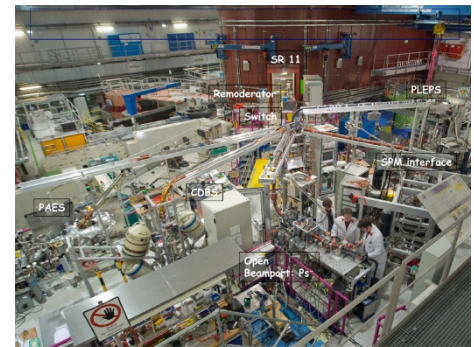
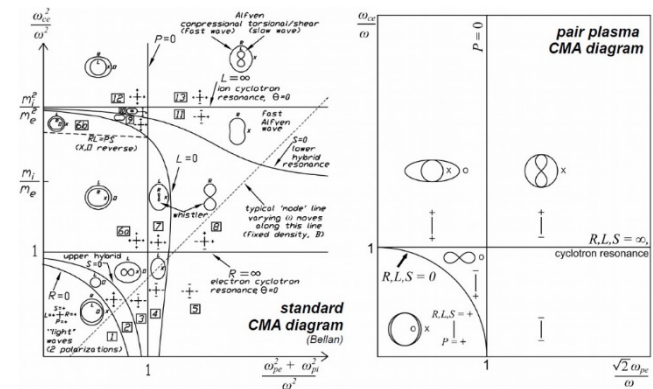
磁気浮上超伝導コイルによる人工磁気圏RT1

# 閉じ込め性能と運転性に優れたコンパクトな装置開発により, ダイポール 3/11 磁場配位においてプラズマ/原子分子の実験研究展開を目指している

- 反物質(電子陽電子ペアプラズマ, 反水素)や新奇的な組み合わせのイオン種閉じ込めと物性研究



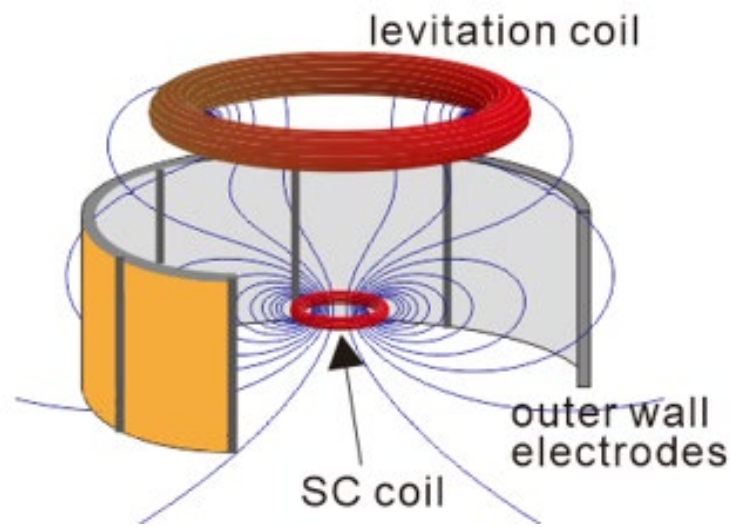
「直線型」と「ダイポール型」閉じ込めの概念図



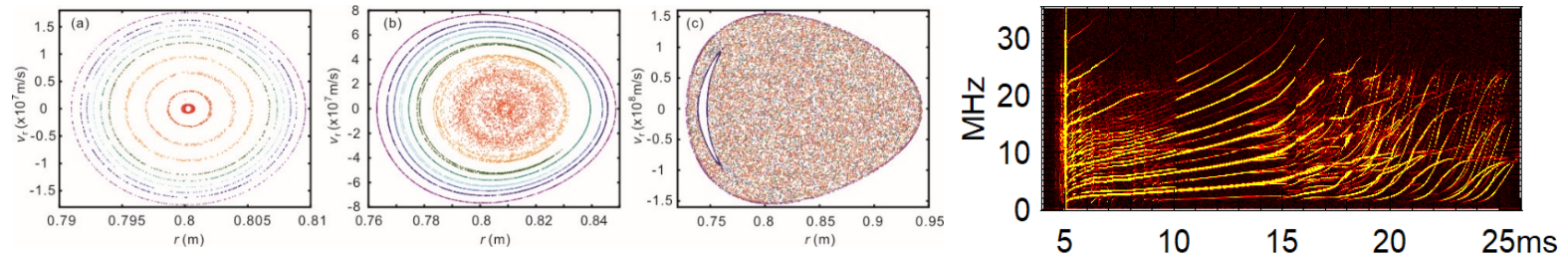
電子陽電子 2017 E.V. Stenson, T. Sunn Pedersen + J. Plasma Phys. 83, 59580106.

宇宙の分子進化(静電イオン蓄積リングとの補完的な研究の可能性)

- 軌道カオスを介した輸送の精密計測(消滅ガンマ線利用)
- 高エネルギー粒子が介在する磁気圏現象の研究



超伝導磁気浮上コイルによるダイポール配位



希少粒子の高密度化や高エネルギー密度化には小型配位が有利

- 開発目標と研究の最終目的

トロイダル系で荷電粒子群の安定生成が可能なダイポール磁場配位を、  
運転性と製作性に優れたtable top装置として開発する

小体積のコンパクトな閉じ込め配位を活用して、電子陽電子プラズマに加えて  
各種イオン実験やプラズマの波動相互作用の研究を可能にすることが目標

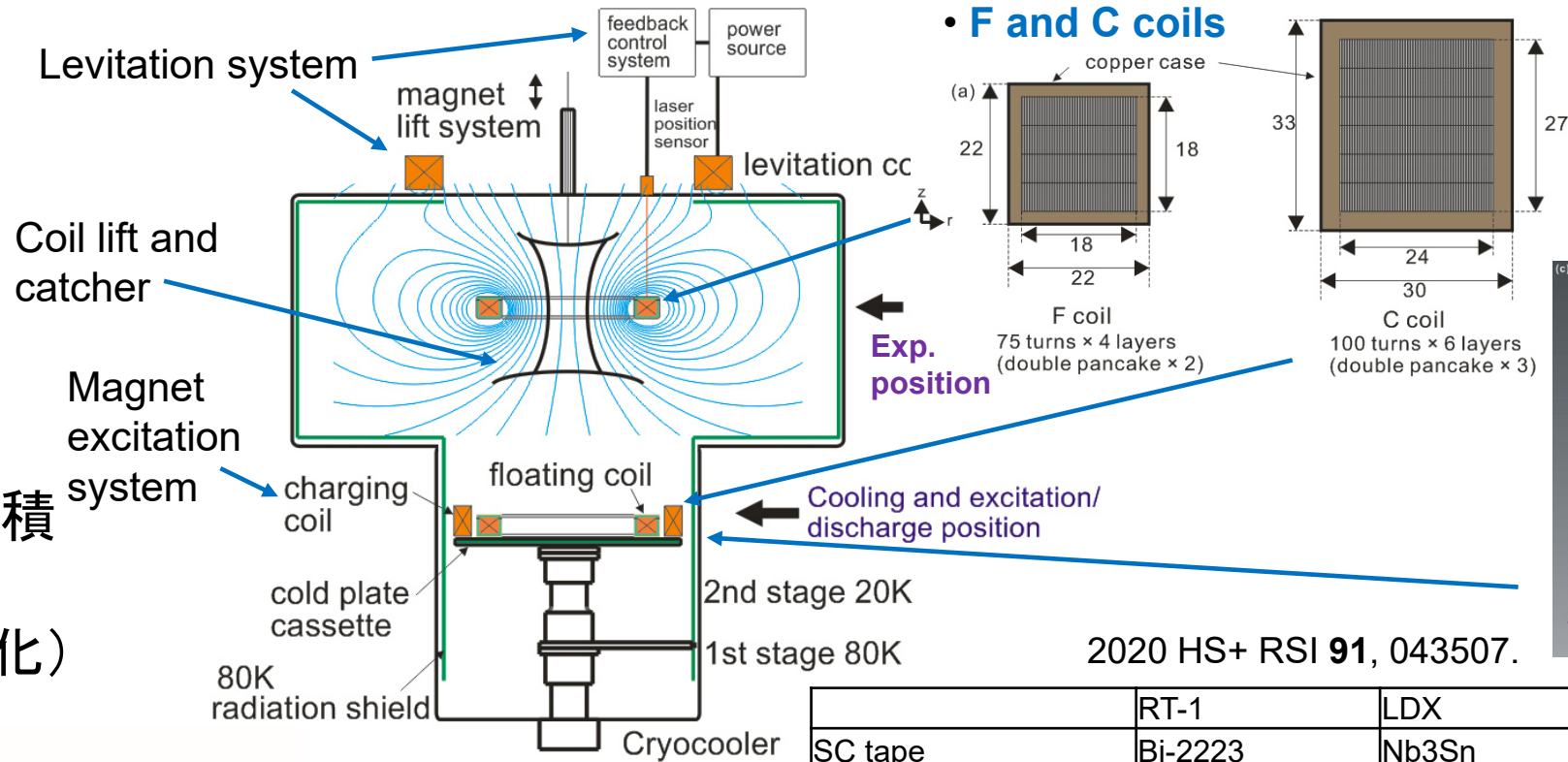
- 本講演のアウトライン

- 開発を進めている小型ダイポール装置の概念と装置パラメータ
- プロトタイプ装置における低速陽電子ビームの入射と閉じ込め実験の進展
- 磁気浮上コイルへの置き換えによる閉じ込め改善の評価
- 開発状況の進展と今後の予定

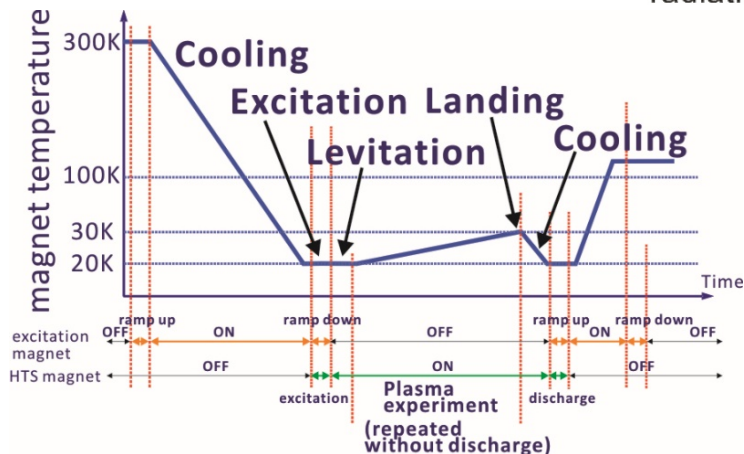
# 閉じ込め装置の概念図とパラメータ:

## 汎用性の高いコンパクトな磁気浮上型ダイポール磁場装置の実現へ

- 高温超伝導の活用 (Bi-2223 or YBCO)
- ガス循環によらない 直接冷却/希薄He槽による冷却方式
- 小型巻線による小体積の閉じ込め装置 (希少粒子の高密度化)



2020 HS+ RSI 91, 043507.

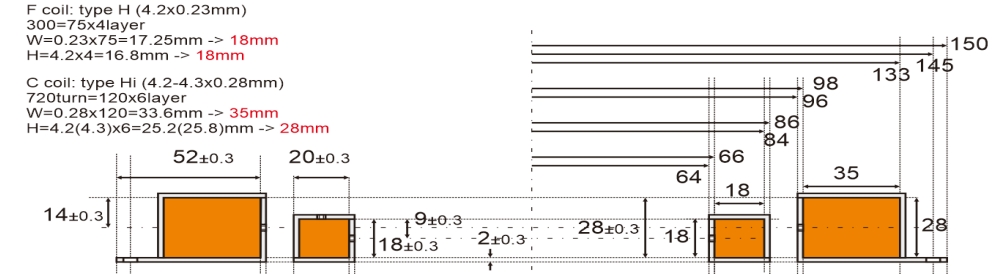
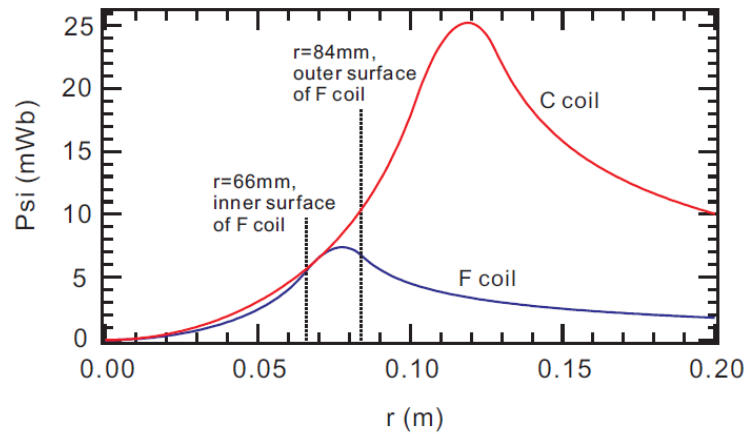


- coil cooling and excitation cycle

	RT-1	LDX	CompactDipole
SC tape	Bi-2223	Nb3Sn	Bi or ReBCO
Rcoil	250 mm	300 mm	75 mm
current	116 A	1820 A	100 A
turn	2160 turns	714 turns	300 turns
total current	250 kA	1400 kA	30 kA
operation temperature	20-30 K	4 K	20-50 K
coil weight	110 kg	580 kg	2 kg
cooling method	He gas	He	thermal contact
excitation method	direct (PCS)	induction	induction
thermal shield	coil	coil (He)	chamber

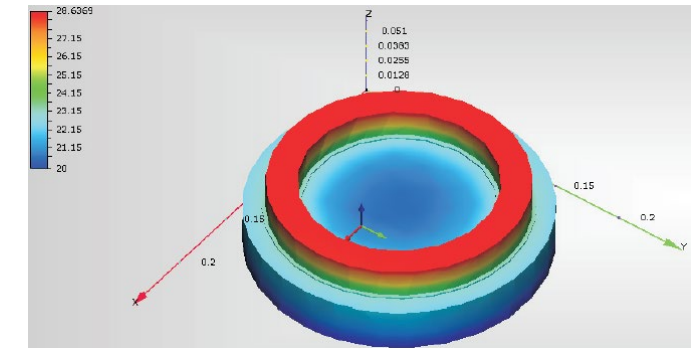
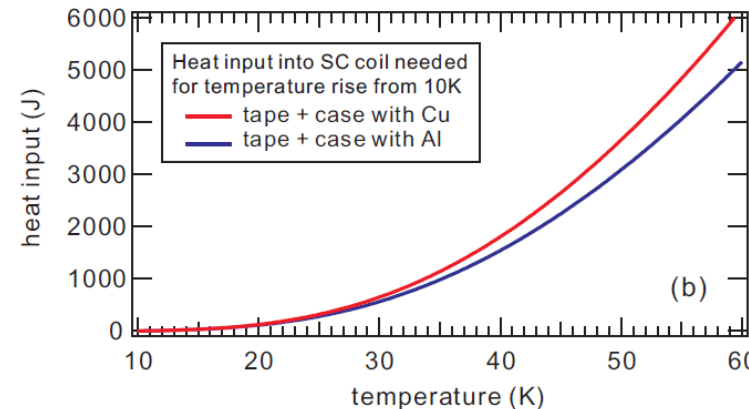
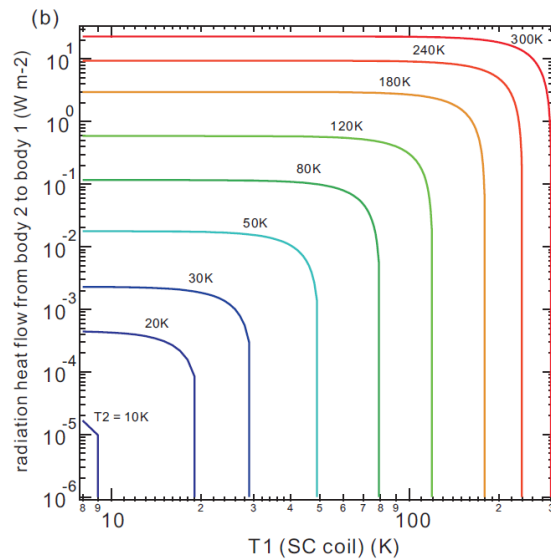
# 小型装置に適した励磁消磁方式(誘導による)と、低温状態/永久電流保持と直接冷却を両立する熱遮蔽系

- 磁束保存を利用した永久電流の**誘導励起**: 100A通電による必要電流の励起が可能



外部電源に接続した励磁用コイルを使用して closed loopの浮上コイルの励磁消磁を実施

- **直接熱接触による冷却**, 真空容器近傍での80K熱遮蔽による低温保持

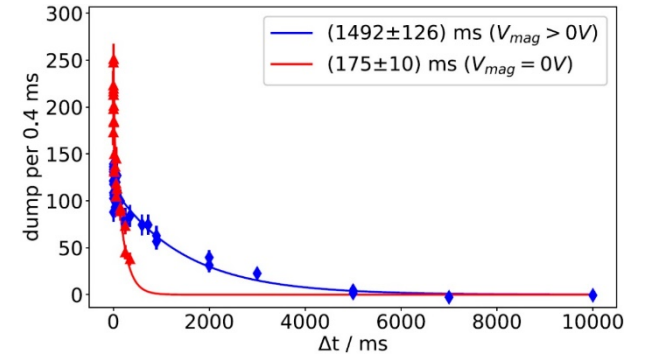
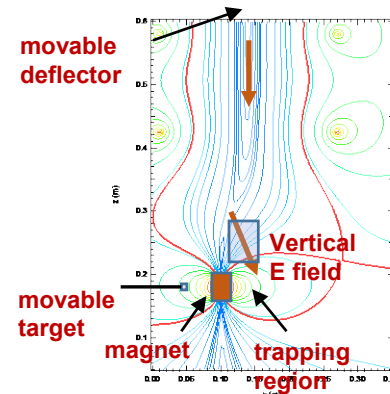
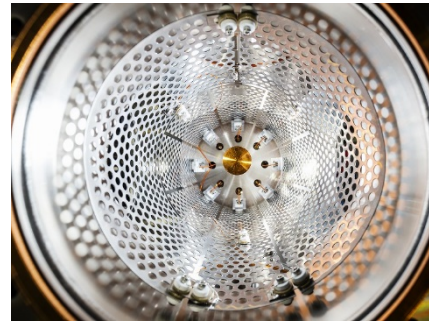
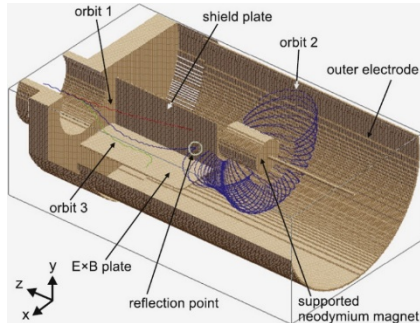


真空容器壁近傍に80K熱遮蔽を設置(反粒子等の低密度プラズマを想定)して コイル熱侵入を1W程度に抑制し、低温到達と1時間程度の運転時間が見込まれる

# プロトタイプ装置(支持マグネット式)による陽電子閉じ込めの先行研究と、磁気浮上コイルシステムへの置き換えの必要性

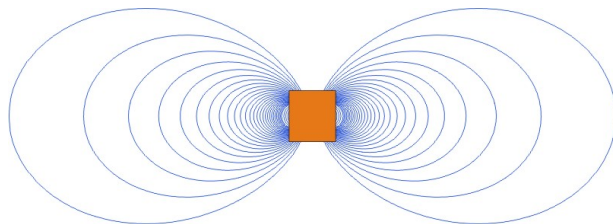
## 先行研究: プロトタイプ装置(永久磁石)による陽電子捕獲

- ExBドリフト板電圧をgating(閉じ込め中接地)  $\tau \sim 0.1\text{ms} \rightarrow \sim 10\text{ms}$  に改善
- その他の入射用電極電位もgating  $\rightarrow \tau \sim 100\text{ms}$       軸対称性の向上: 中性衝突によるロスコーン内への移動と損失
- マグネットを正バイアスしミラー損失を抑制  $\rightarrow \tau \sim 1\text{s}$       残存する非対称性(特に磁場)が閉じ込めの限界を規定

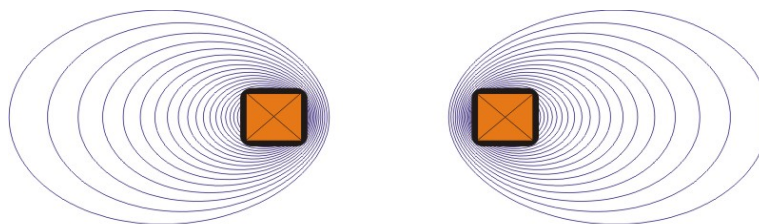


2018 Horn-Stanja+ Phys. Rev. Lett. **121**, 235003.

## プロトタイプ装置(永久磁石)から超伝導コイル配位へ



マグネット+静電バイアスによる閉じ込め



閉じた磁気面による純磁場閉じ込め

擾乱を抑制した環境下で  
複数種粒子の同時閉じ込め  
が可能になる

# 長時間閉じ込めで支配的になると予想される, 中性粒子衝突によるロスコーンへの落ち込みによる粒子損失の評価

- 基本的な閉じ込め特性を軌道解析で評価

$$\frac{\mathbf{u}^{n+1/2} - \mathbf{u}^{n-1/2}}{\Delta t} = \frac{q}{m} \left( \mathbf{E}^n + \frac{\mathbf{u}^{n+1/2} + \mathbf{u}^{n-1/2}}{2\gamma^n} \times \mathbf{B}^n \right),$$

$$\frac{\mathbf{x}^{n+1} - \mathbf{x}^n}{\Delta t} = \frac{\mathbf{u}^{n+1/2}}{\gamma^{n+1/2}}.$$

$$\mathbf{u}^* = \mathbf{u}^- + \mathbf{u}^+ \times \mathbf{T},$$

$$\mathbf{u}^+ = \mathbf{u}^- + \mathbf{u}^* \times \mathbf{S},$$

By introducing

$$\mathbf{u}^- = \mathbf{u}^{n-1/2} + \frac{q}{m} \mathbf{E}^n \frac{\Delta t}{2}, \quad \text{where}$$

$$\mathbf{u}^+ = \mathbf{u}^{n+1/2} - \frac{q}{m} \mathbf{E}^n \frac{\Delta t}{2},$$

we have

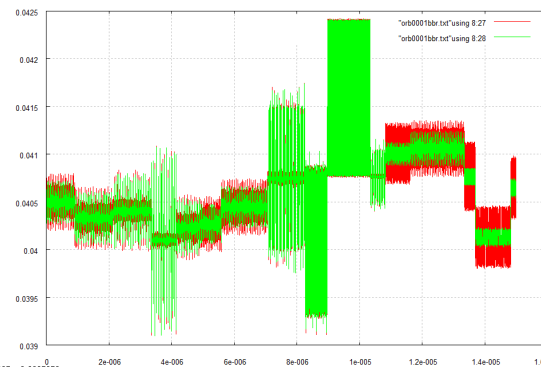
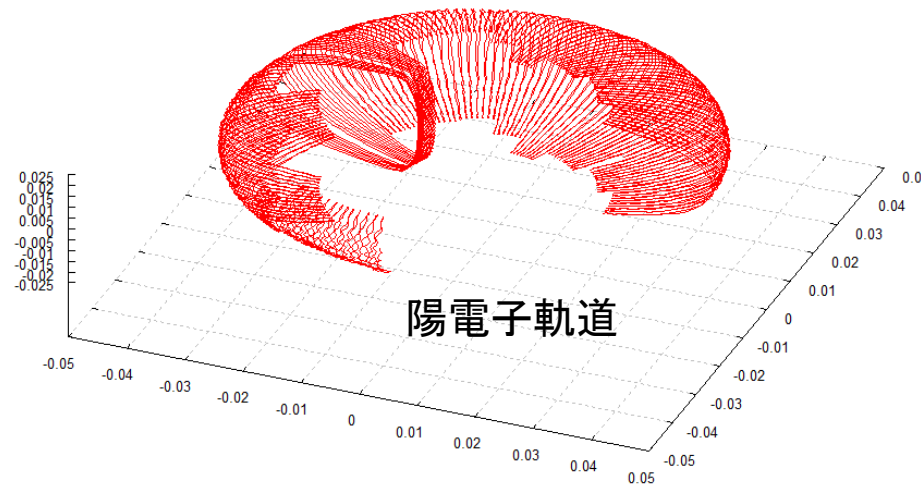
$$\frac{\mathbf{u}^+ - \mathbf{u}^-}{\Delta t} = \frac{q}{2\gamma^n m} (\mathbf{u}^+ + \mathbf{u}^-) \times \mathbf{B}^n.$$

Then we can obtain the next step values as

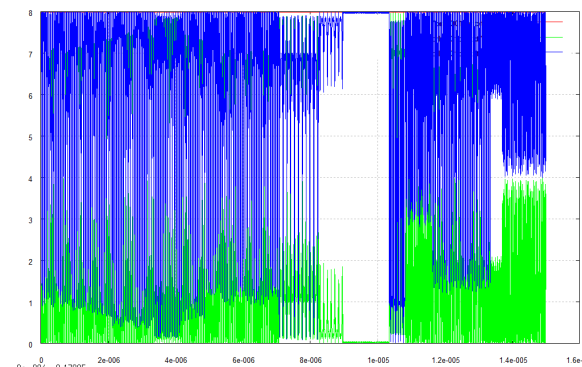
$$\mathbf{u}^{n+1/2} = \mathbf{u}^+ + \frac{q}{m} \mathbf{E}^n \frac{\Delta t}{2},$$

$$\mathbf{x}^{n+1} = \mathbf{x}^n + \frac{\mathbf{u}^{n+1/2}}{\gamma^{n+1/2}} \Delta t.$$

弱相対論的Buneman-Boris法のcodeにランダム(ただしmean free timeを調整)な弾性衝突の効果を追加して使用



粒子のR位置の時間変化

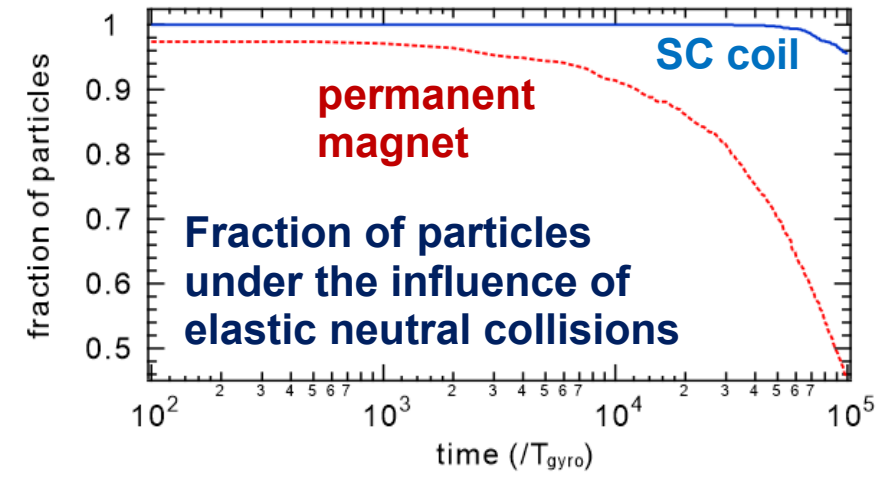
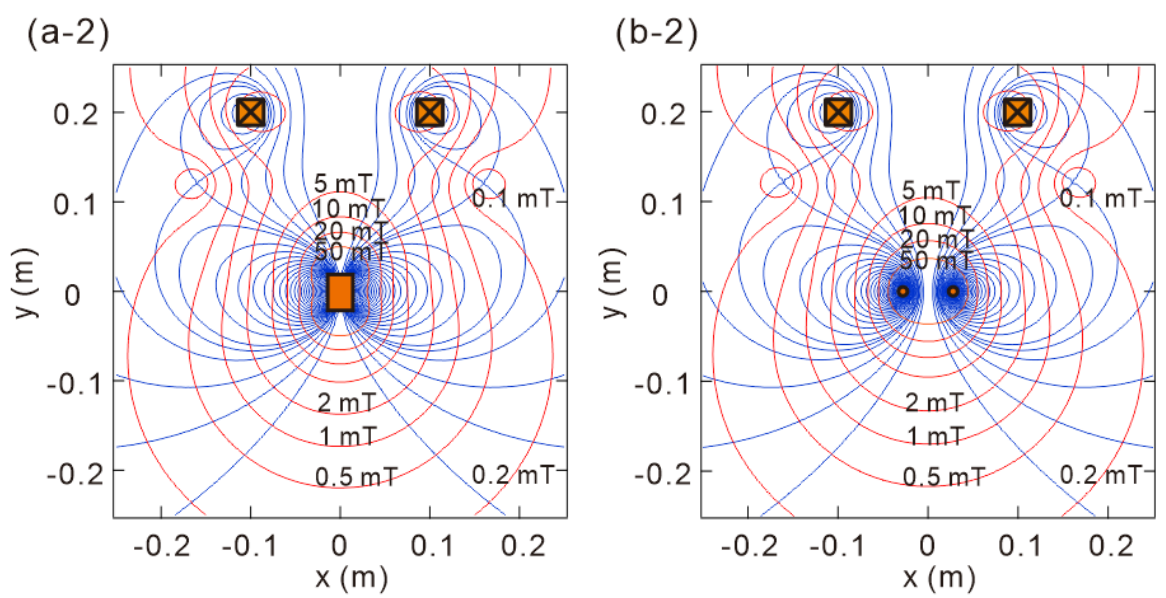
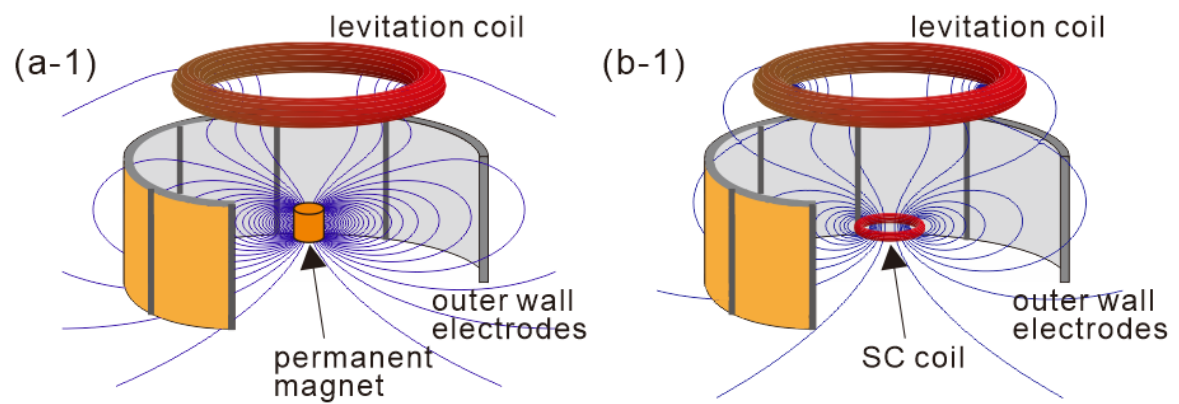


Kpara(青)とKperp(緑)の時間変化

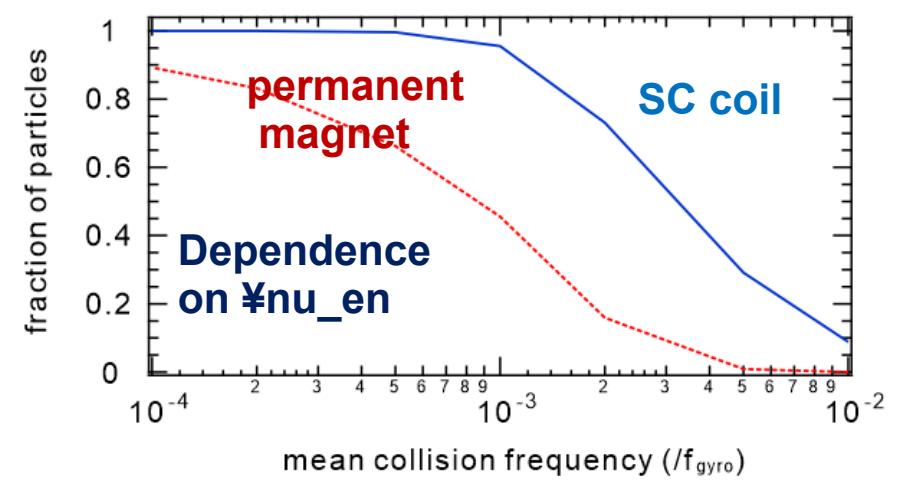
マグネットやコイル, 真空容器での再結合による損失や, 不正磁場による閉じ込め悪化を計算



# プロトタイプ装置(支持マグネット式)から浮上コイルへの置き換えにより 閉じ込めの改善が実現される



残存粒子の割合の時間発展の比較

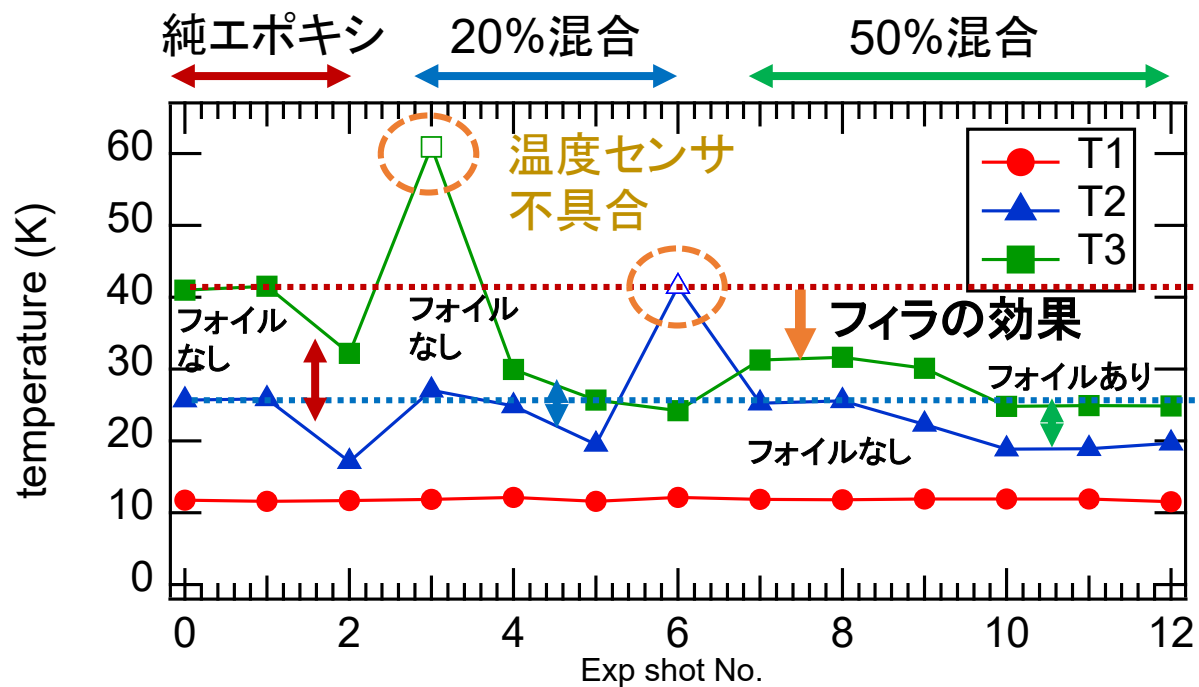


プロトタイプ装置と、同程度の磁場を発生する浮上コイル装置

10<sup>5</sup> T<sub>gyro</sub>後の残存粒子の比較

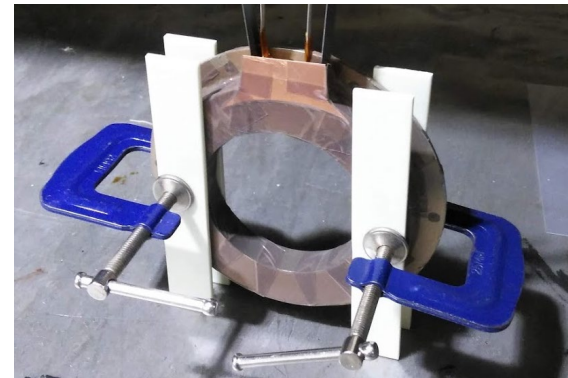
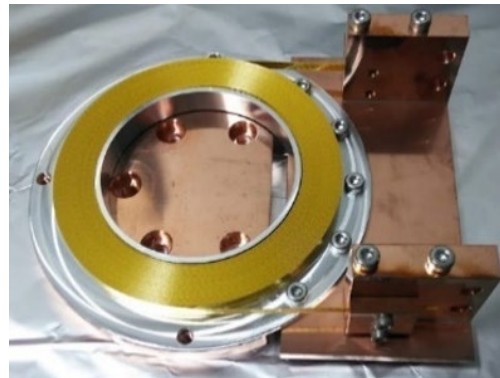
# 熱接触冷却を行う試験巻線の含浸に先立ち、サンプル線材を用いて 高熱伝導フィラ(窒化アルミ)による特性改善を進め、30K以下を達成した

- 最も過酷な条件(室温の真空容器壁に曝露)を想定した試験で、接触冷却による到達温度改善



純エポキシ, foilなし  
total改善  
フィラ混合, foilあり

T1: cold head  
T2: アルミ棒  
T3: 線材



励磁用コイルの100A通電に要求される目標温度30K到達。  
サンプル試験に基づき、試験巻線の含浸と冷却試験予定。

## まとめと今後の課題

- 軸対称なトロイダル配位であるダイポール磁場はプラズマ閉じ込め性能に優れ、超高 $\beta$ 状態の実現による先進核融合を目指す研究が展開されている。
- 電子陽電子ペアや各種イオン，また波動粒子相互作用の研究への活用を目指して，運転性の良好な小型ダイポール磁場装置の開発を進めている。
- 永久磁石装置での陽電子閉じ込めの先行研究に基づき，超伝導コイル化による閉じ込め改善（や不正磁場）の効果を粒子軌道解析による評価を行っている。
- 装置製作について，Bi-2223線材による小型巻線を励磁及び浮上コイルに使用する計画を進めており，直接冷却による必要温度到達が見込まれる。
- サンプル巻線による冷却試験後は，励磁コイルと浮上コイルの冷却励磁（後者は別方式）を実現し，浮上運転と電子ビーム閉じ込め試験を計画している。