

磁気圏型装置における 陽電子群の空間分布と閉じ込め特性

東大新領域

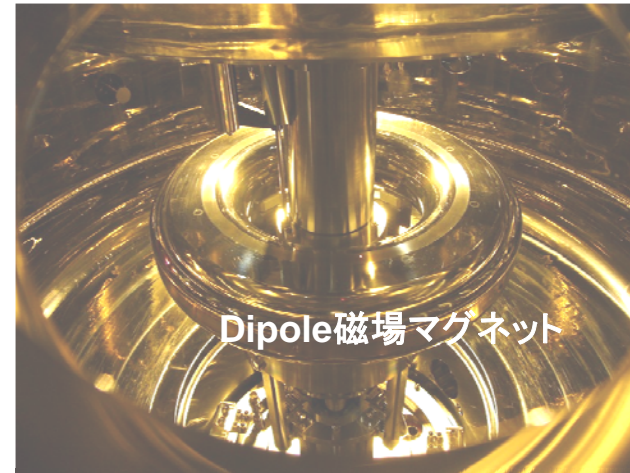
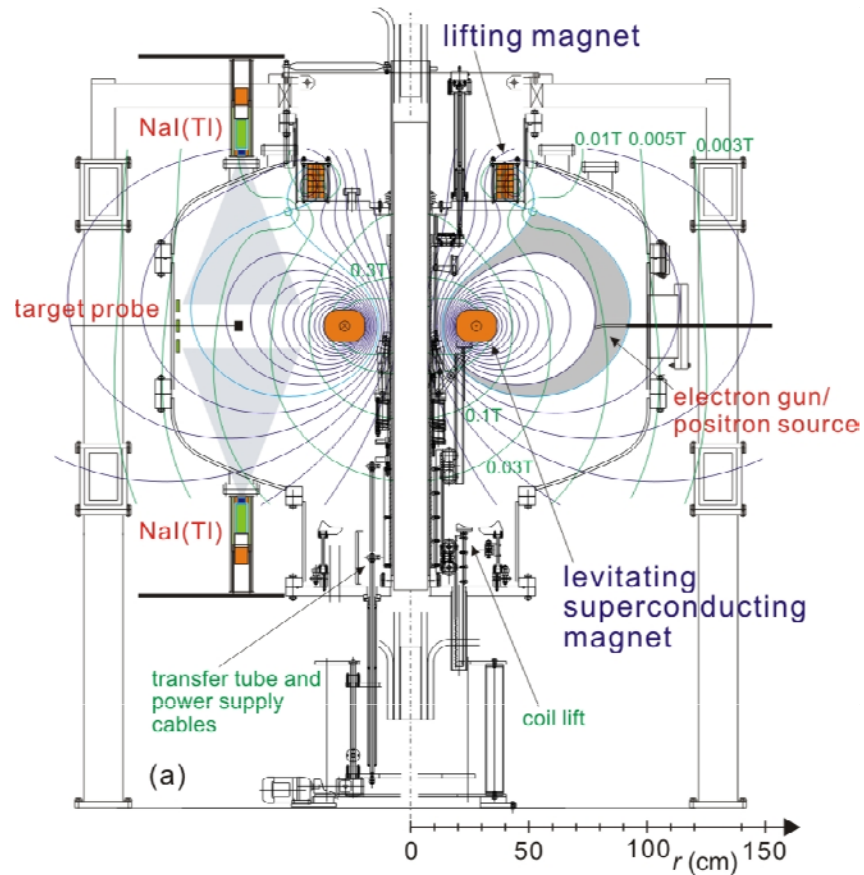
齋藤晴彦, 吉田善章, 矢野善久, 森川惇二, 笠岡紀和, 坂本渉

- 目次
1. 磁気圏型配位RT-1における非中性プラズマ研究
 2. 研究背景と本研究の目的
 3. Dipole磁場中の陽電子のカオス的挙動
 4. 小型線源による軌道計算と電場印加効果の検証
 5. まとめと今後の課題



磁気圏型装置RT-1 (Ring Trap 1)における dipole磁場配位を用いた高性能プラズマ閉じ込め研究の進展

2/10



- **高温超伝導Bi-2223マグネット**
0.25MA, 112kg
フィードバック制御により磁気浮上し、
無冷却状態で6時間の浮上運転

2010 Yoshida *et al.*, Phys.Rev.Lett. 104, 235004.
2009 Ogawa *et al.*, Plasma Fusion Res. 4, 020.

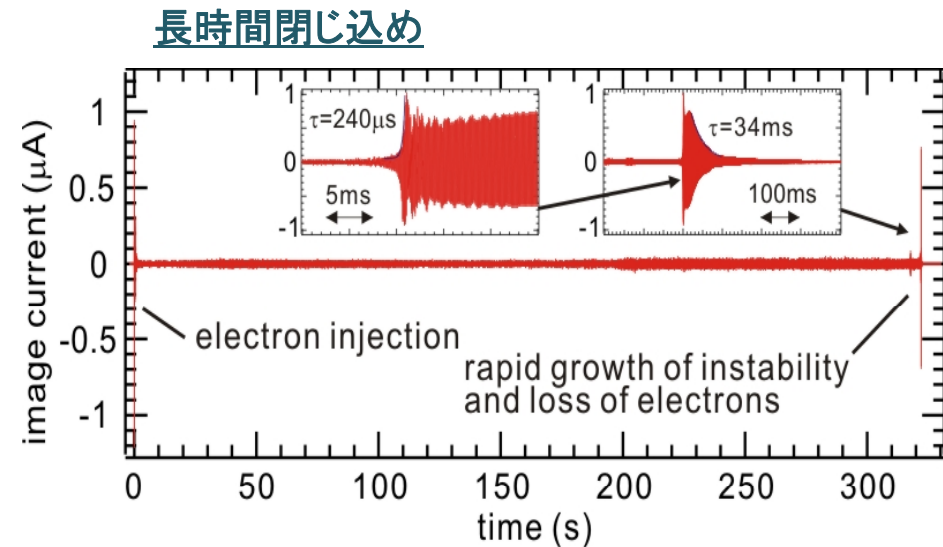
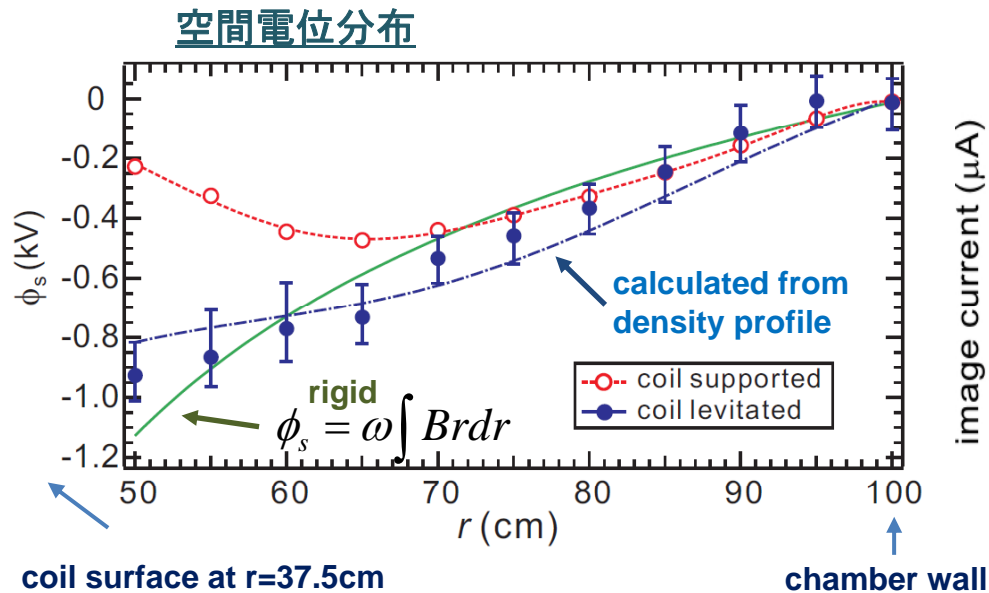
- **トロイダル非中性プラズマの閉じ込め**

純電子群の安定閉じ込め, 剛体回転平衡の自己組織化, 反物質捕獲への応用

- **先進的核融合を目指す超高 β プラズマの安定生成 (矢野18aFA-1, IAEA2012)**

局所 $\beta \sim 70\%$, 閉じ込め時間 $>0.1s$, 内向き輸送, イオン加熱(流れ駆動)実験を開始

超伝導マグネットの磁気浮上により, RT-1ではトロイダル非中性 (純電子) プラズマの長時間閉じ込めが実現されている



- マグネットを磁気浮上しない時

- ホロー状の電位分布 (○) → プラズマ流は強いシアを持ち, 不安定 (toroidal ExB flow)

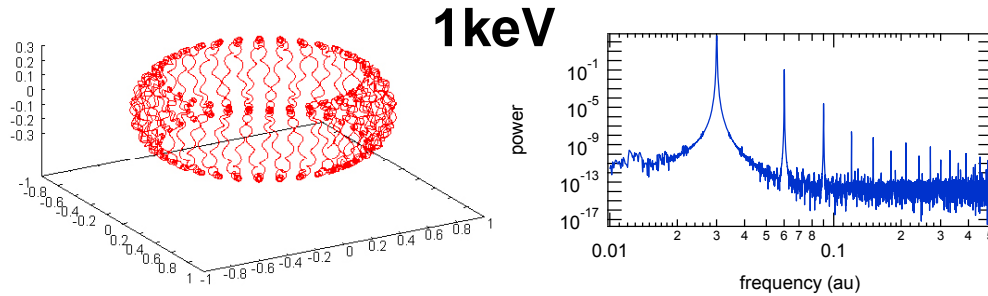
- マグネットの磁気浮上による閉じ込め改善

- 剛体回転に近い分布 (●) が自発形成され, 長時間閉じ込めが実現される

~ $10^{11}/\text{m}^3$, 300秒以上の安定閉じ込め

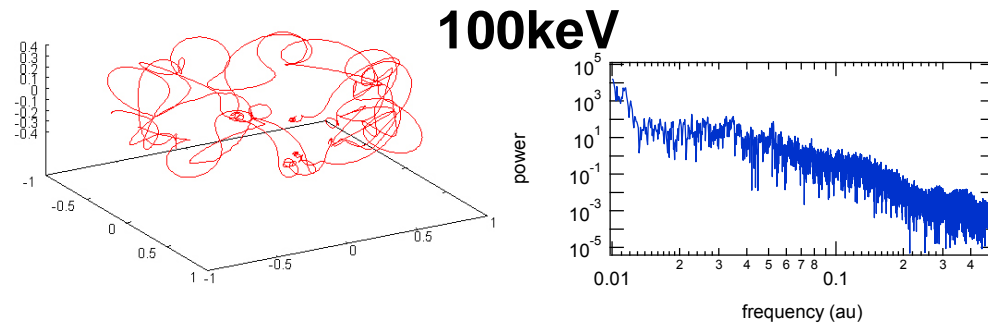
- RT-1のdipole磁場中で純電子プラズマの安定閉じ込め(>300s)が実現された
⇒ 原理的には、反粒子である陽電子のプラズマの閉じ込めが可能
- トロイダル系では、荷電粒子を電荷に依存せず閉じ込め可能であり、陽電子と電子をペアプラズマとして同時に閉じ込めが可能(天体現象の基礎研究)
- しかし、線源等から減速材を使用して得られる陽電子ビームは非常に弱い
~GBqクラスの ^{22}Na 線源+希ガス冷却減速材: 10^6 e+/s (効率~0.1%)
- そこで、減速材を使用せず、放射線源からの高エネルギーの陽電子を直接dipole磁場中に入射し、高効率で捕獲する新しい方式の原理確立を目指す
 - 高エネルギー陽電子のカオスの軌道を利用して、長い軌道長を得る
軌道計算によるカオスの効果の評価: 小型線源+消滅ガンマ線計測による検証
 - 回転電場を印加し、再結合の前に強磁場領域への内向き輸送を発生させる
テスト電極による電場印加効果の確認 ⇒ 回転電場による径方向輸送の実現
 - 強磁場領域での放射冷却により、低温の陽電子として捕獲する

- 低エネルギー時: 運動の恒量が4つ存在 ($\mu, J, E, P_\theta \sim \Phi$)

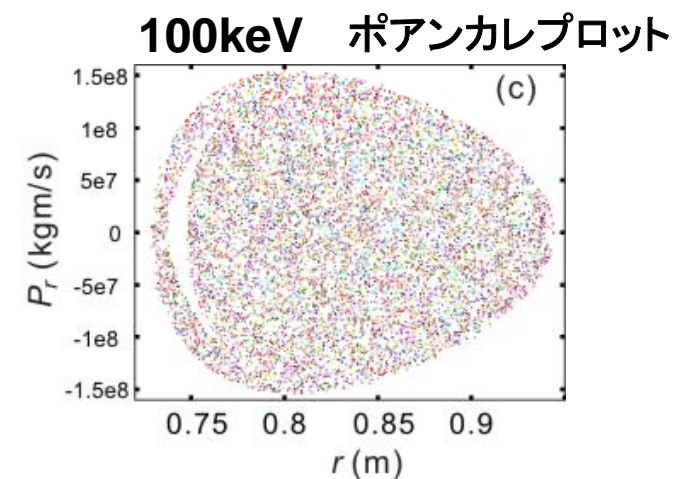
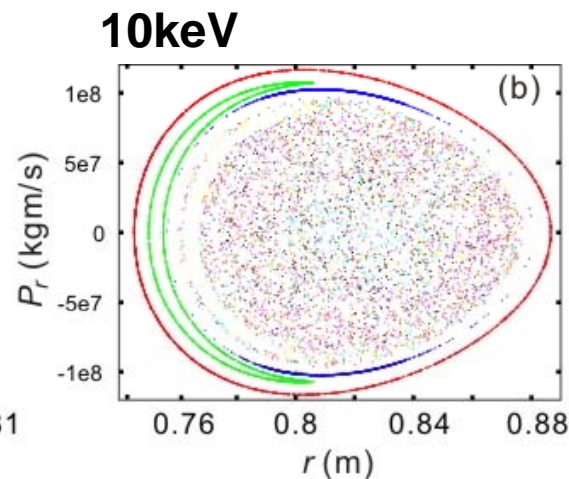
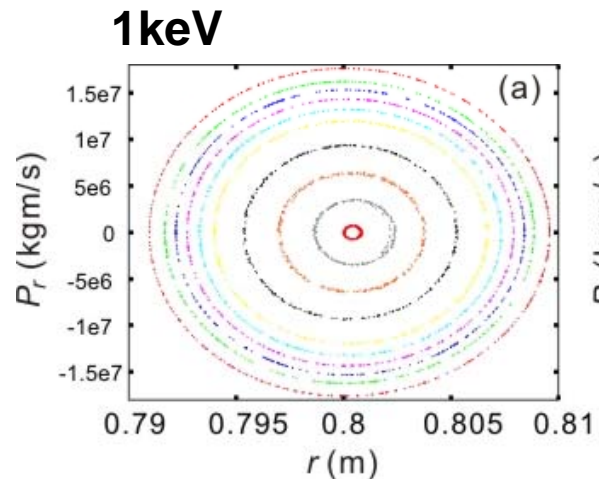


- 軌道は可積分, 周期的運動
- 短時間で線源に戻り再結合
- 磁力線方向の1回程度のバウンス

- 高エネルギー時 (^{22}Na からの陽電子の大半): 運動の恒量は2つ (E, P_θ)

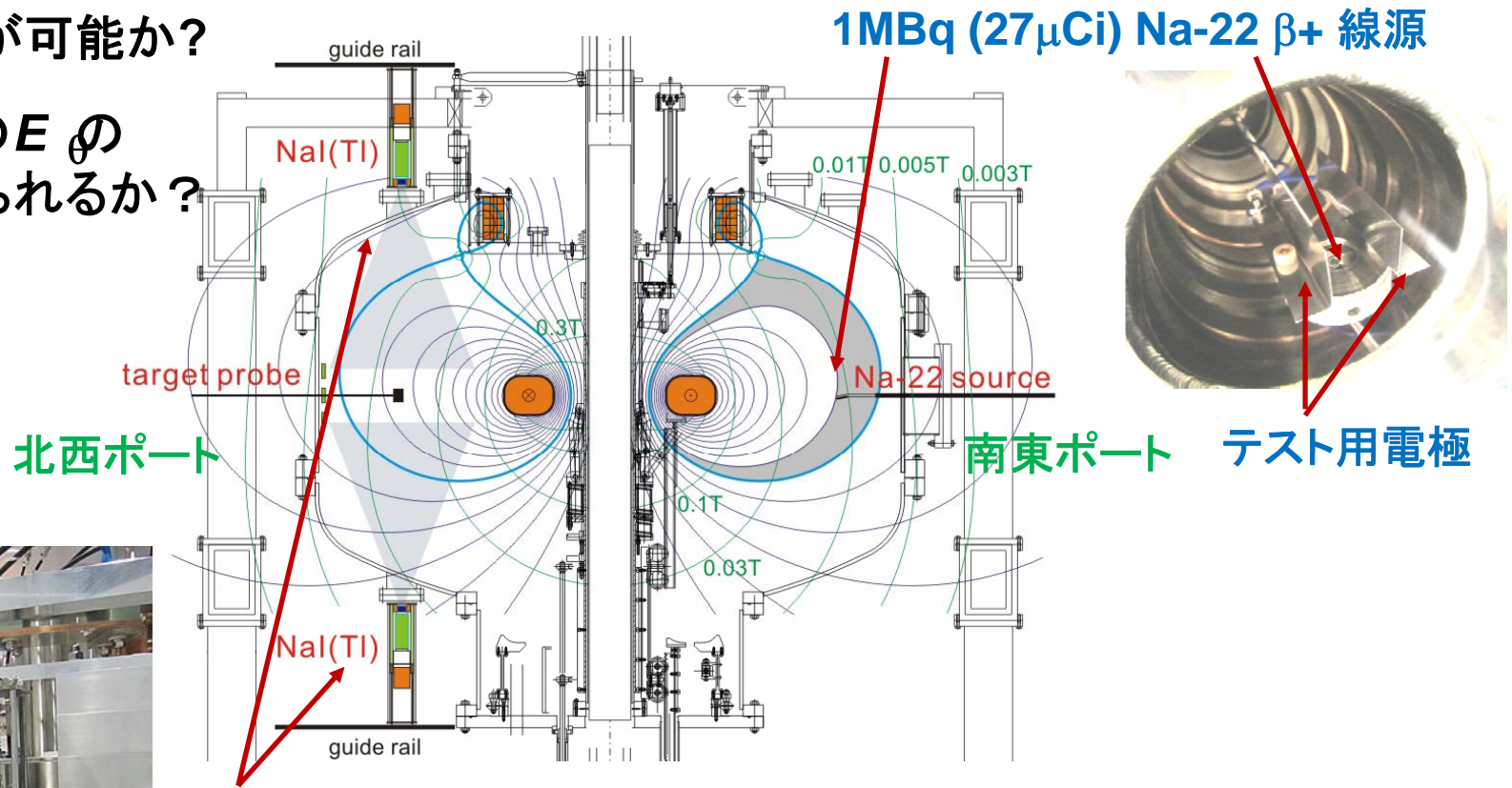


- 非可積分, 非周期的運動
- 再結合前に長時間の飛行
- トロイダル方向の周回運動が可能
- ⇒ 回転電場により内向き輸送が可能



小型(1MBq)線源を使用してdipole磁場中へ陽電子の入射と検出を行い, 6/10 軌道計算の妥当性を評価すると共に, 電場印加の効果調べる

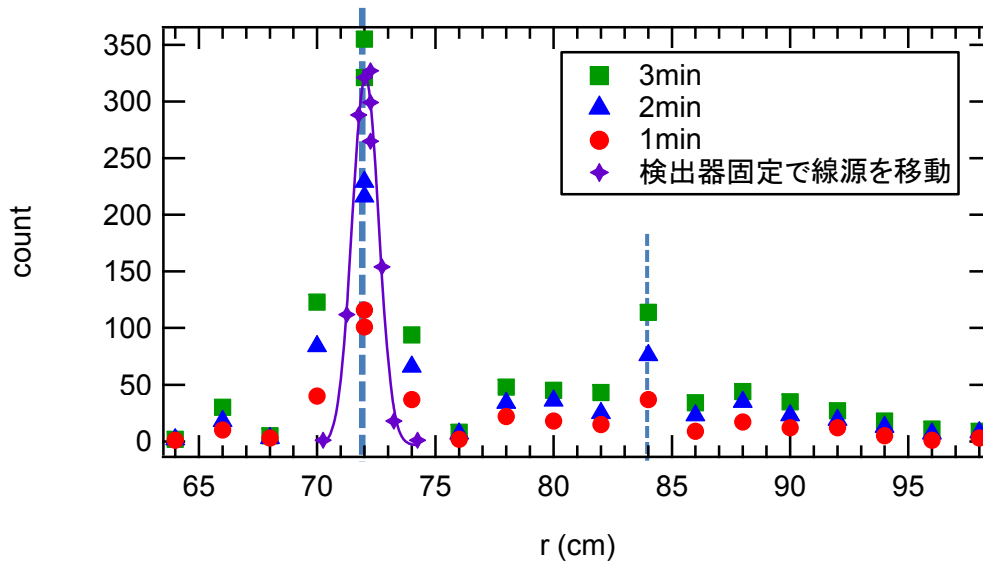
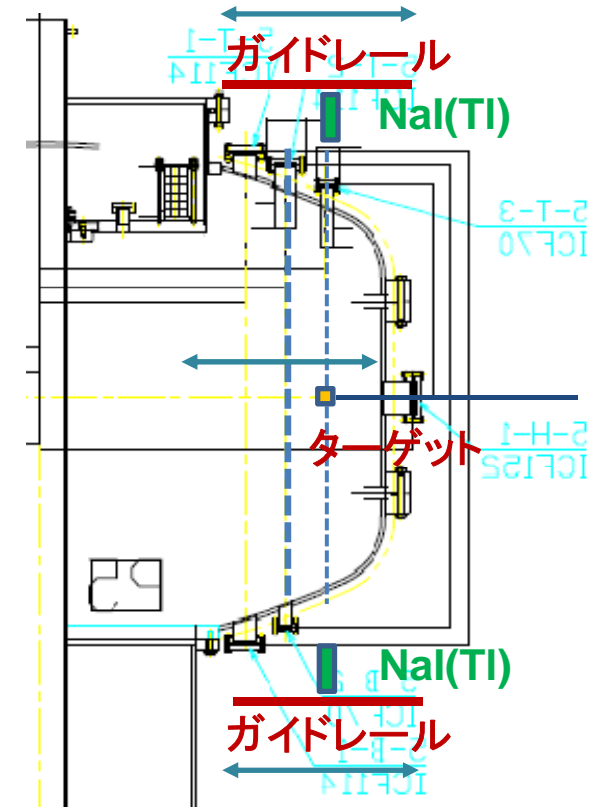
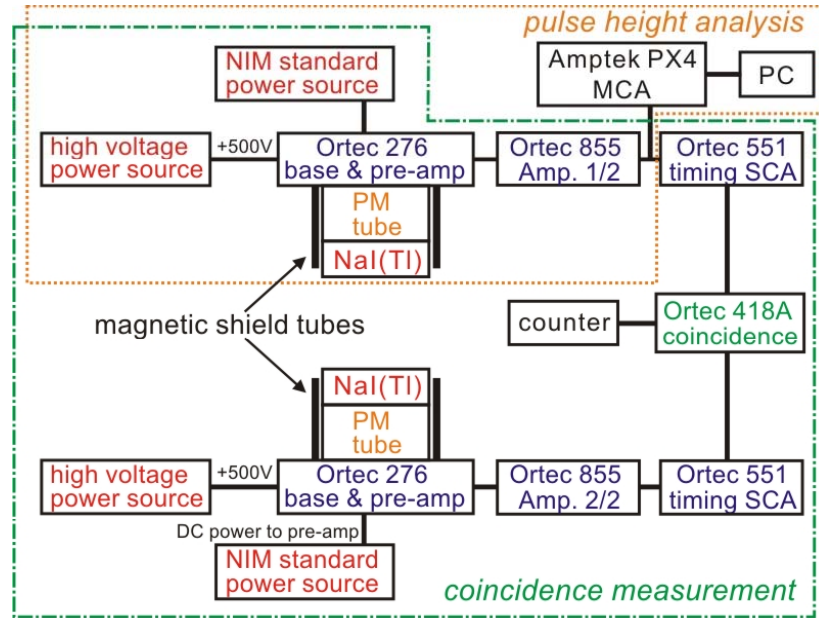
- Dipole磁場中で捕獲され
周回運動が可能か?
- 計算通りのEの
効果が得られるか?



NaI(Tl)シンチレータ+ホトマル (可動式)

- 可動式ターゲット上で発生する511keVの消滅γ線を計測
- 電場印加の評価のために, 精密な消滅位置の検出が必要
⇒ 波高分析に加え, 今回コインシデンス計測を実施

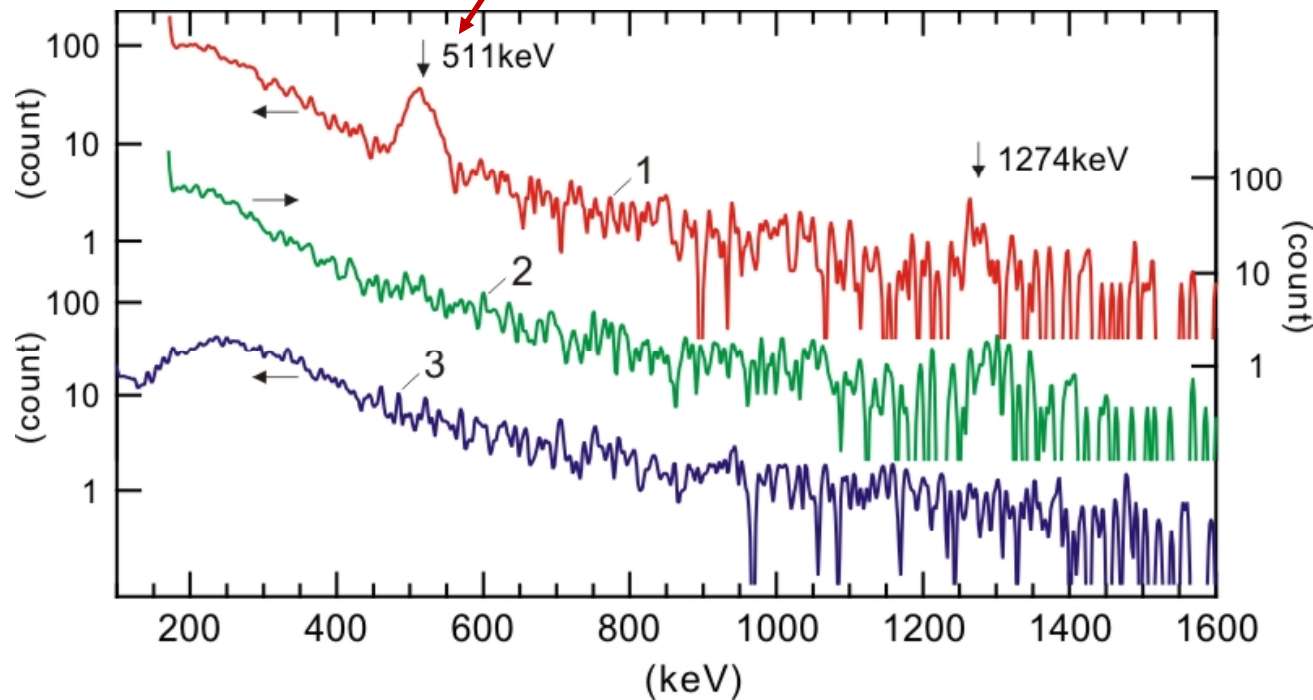
ガンマ線の波高分析に加え、コインシデンス計測システムを導入し、消滅ガンマ線の発生位置の正確な計測を可能にした



- ターゲット上に線源を置き校正
- ⇒ Viewport位置では、小型線源からの入射に対して良好な感度を得られ、この位置に固定して計測した

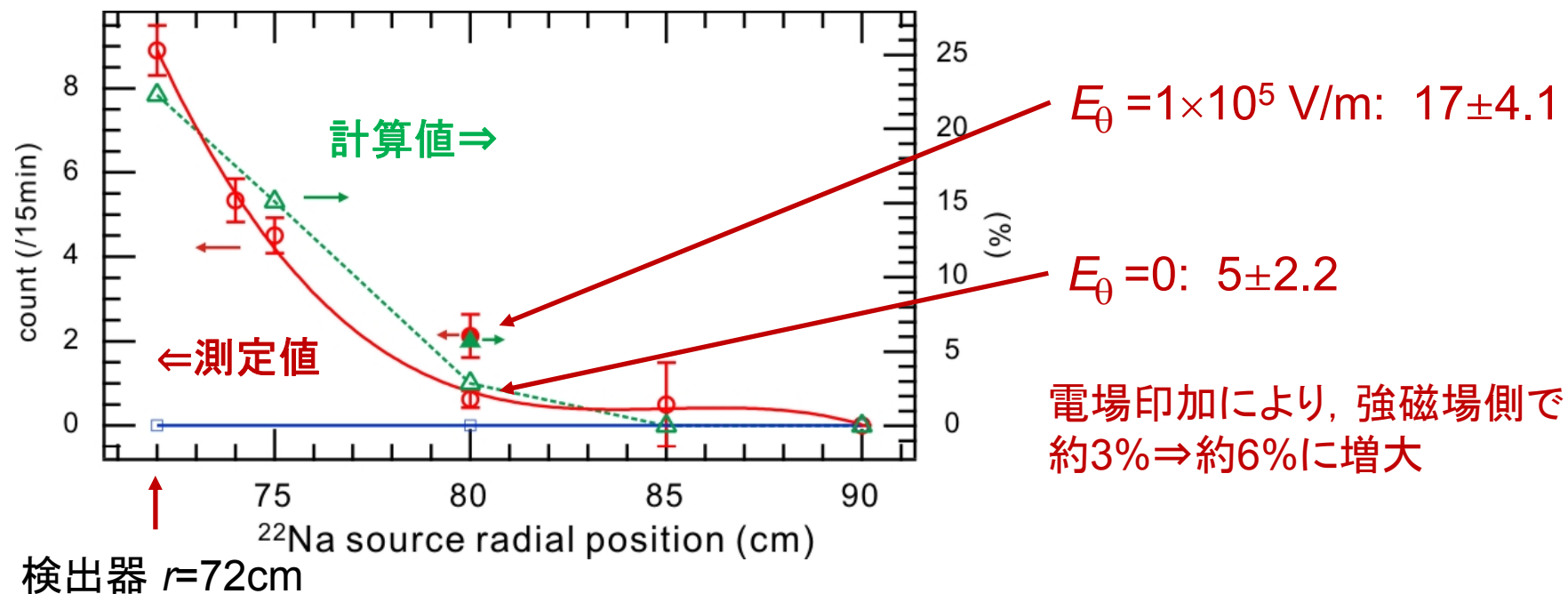
ターゲット上で発生するガンマ線のみを計測(シンチレータを線源から遮蔽) 8/10
し, 陽電子がdipole磁場中に捕獲されトロイダル方向に周回する事を確認した

線源で再結合せずターゲットに到達した陽電子の消滅ガンマ
~ 3×10^4 e+/s, 線源からの4%程度

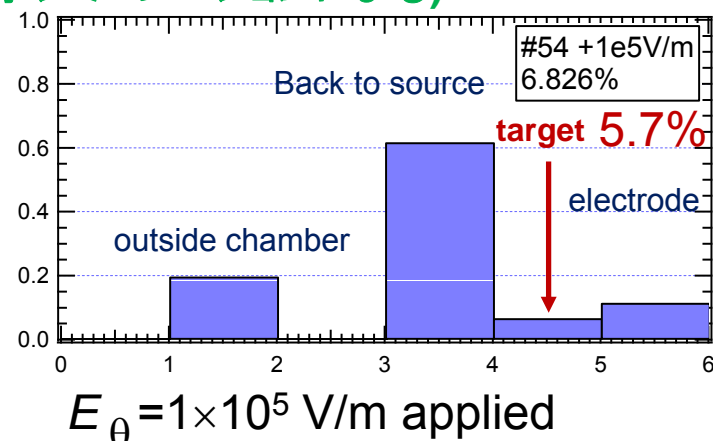
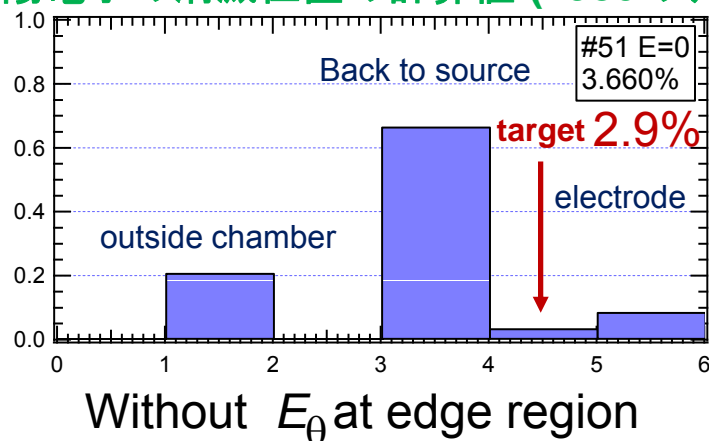


1. ^{22}Na 線源, ターゲットプローブ, シンチレータ共に真空容器内の $r=72\text{cm}$
- 2: ターゲットプローブを真空容器外に配置
- 3: dipole磁場なし(マグネットを冷却励磁位置に配置)

ターゲットでの発生ガンマ線量は軌道計算結果と一致する傾向を示し、
電場印加により内向き輸送される陽電子は計算通り増大する



陽電子の消滅位置の計算値 (1980のテスト粒子シミュレーションによる)



まとめ

- 線源からの陽電子をRT-1のdipole磁場配位に直接補足可能である事を示した
 - ^{22}Na からの約70%の陽電子はカオスにより長い軌道長を持つ(μ , J非保存)
 - それにより, 一部の陽電子は線源での再結合を免れ, トロイダル周回する
 - ターゲット上の消滅 γ 数は, テスト粒子による消滅位置計算と一致する傾向
- テスト電極を使用して, 方位角方向の電場 E_θ 印加の効果を確認した
 - 消滅位置の精密な計測のために, コインシデンス計測システムを導入した
 - それにより, 電場印加による陽電子の内向き輸送の効果を検出した

今後の課題

- 閉じ込め領域への効率的な内向き輸送と長時間閉じ込めの実現
 - 現状で大きい, 線源とターゲットでの吸収による損失の抑制
 - トロイダル周回運動する陽電子への電場印加方法の最適化
 - 長時間閉じ込めにより低エネルギー状態の陽電子閉じ込めの実現