

# サイクロトロン NIRS-930における ビームのシミュレーション

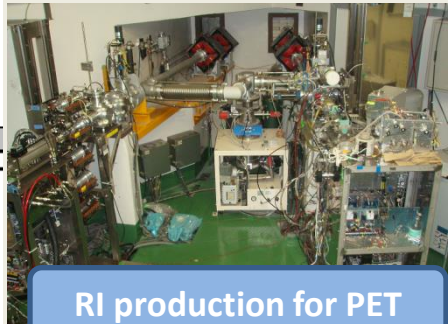
中尾政夫, 北條悟, 片桐健, 杉浦彰則, 涌井崇志,  
野田章 (放医研), 後藤彰(山形大学), Smirnov Victor,  
Vorozhtsov Sergey (JINR)



NIRS-930

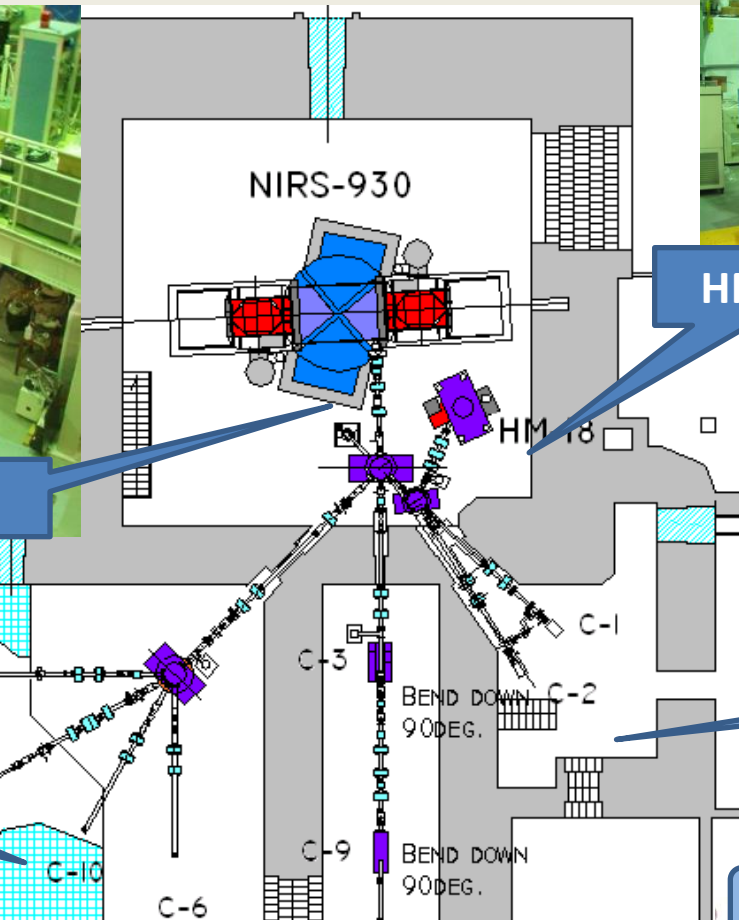


HM-18



RI production for PET

General experiment

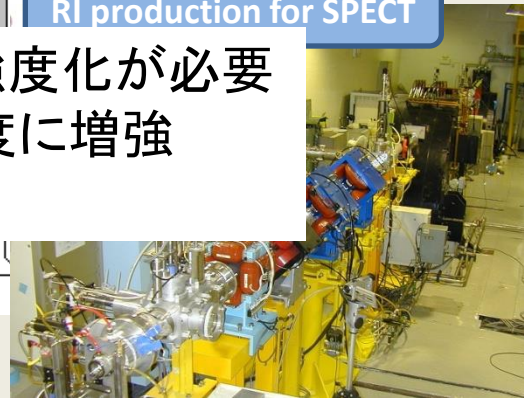


RI production for SPECT

医療用のRI生産量を増やすためにビームの大強度化が必要  
例えば現在 proton 18MeVで最大20μAを2倍程度に増強  
入射・出射の効率を向上する



RI production <sup>124</sup>I, <sup>76</sup>Br, etc.  
(Basement)



# シミュレーションの目的

サイクロトロンの大強度化のために、ビームの挙動を把握する

1. SNOPについて
2. バンチャー位相による入射・出射量の変化
3. 出射系の最適化

# シミュレーションの目的

サイクロトロンの大強度化のために、ビームの挙動を把握する

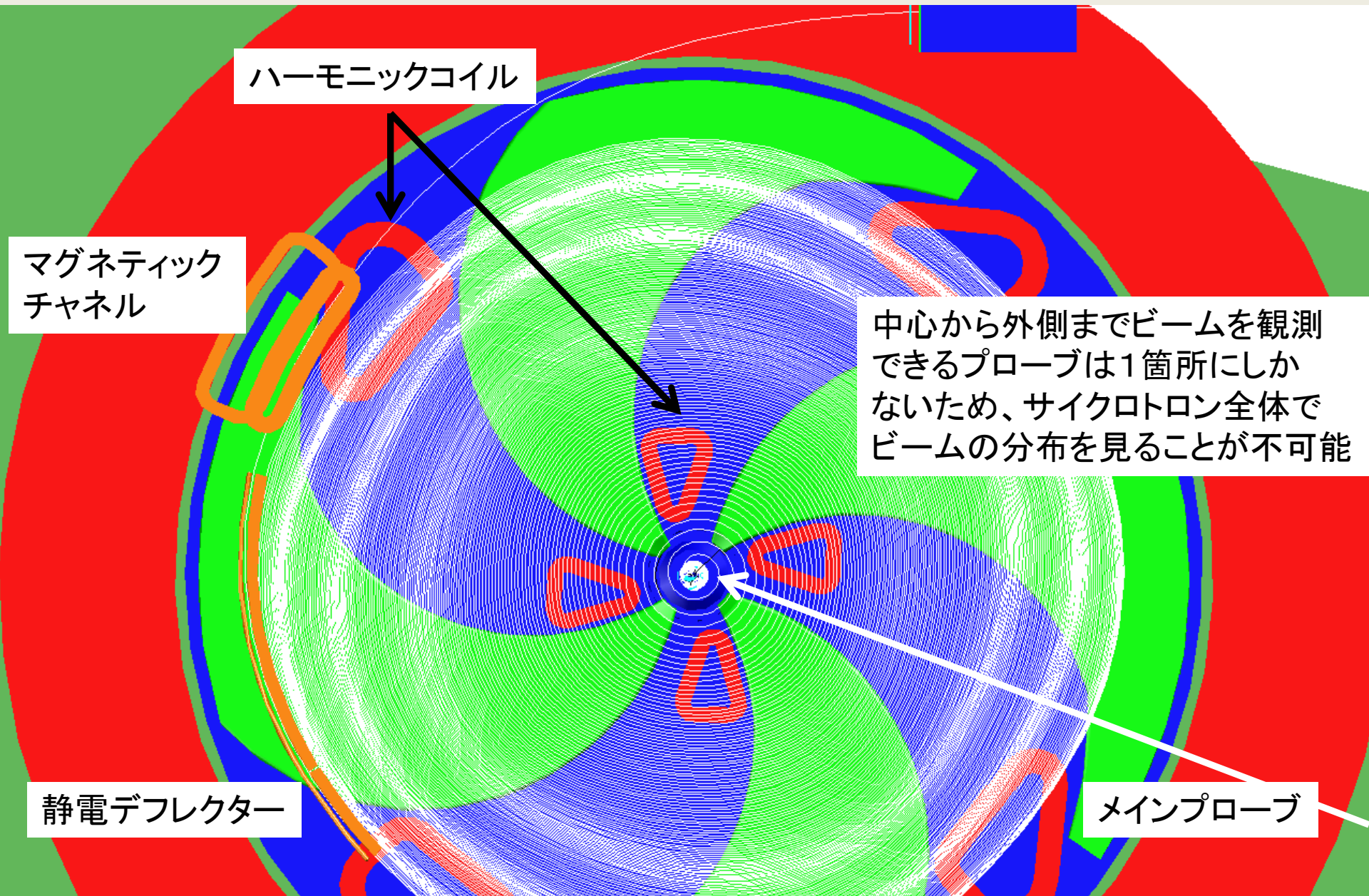
1. SNOPについて
2. バンチャー位相による入射・出射量の変化
3. 出射系の最適化

# SNOP

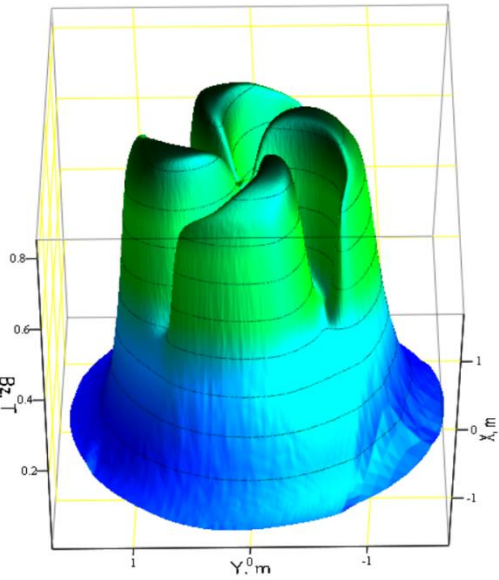
- ロシアJINRのV. Smirnov とS. Vorozhtsovによって作成されたサイクロトロンのビームシミュレーションプログラム。TOSCAで計算した3次元の電場・磁場データを用いる。
- 4次のルンゲクッタ法を用いて粒子の軌道を入射から出射まで計算する。
- Particle In Cell法を用いて多数の粒子の空間電荷効果を計算できる。
- 既にNIRS-930で陽子、30MeVの条件のシミュレーションを行い、実際のパラメータ(位相、効率)を再現したことを確認した。
- 18MeVの陽子について同様のシミュレーションを行っている。



# SNOPが計算したビーム軌道



# 等時性磁場の作成



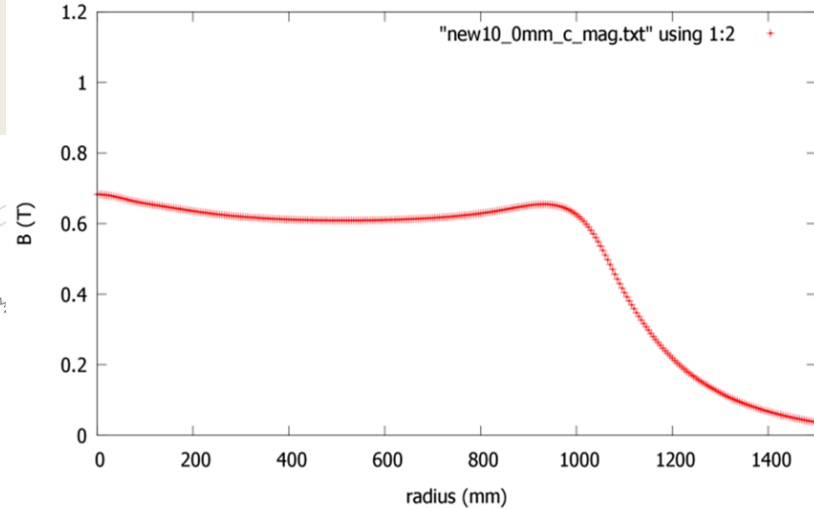
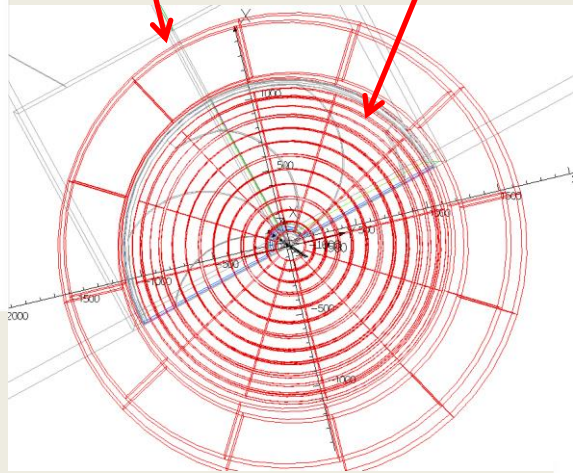
Magnetic field in median plane

一周平均

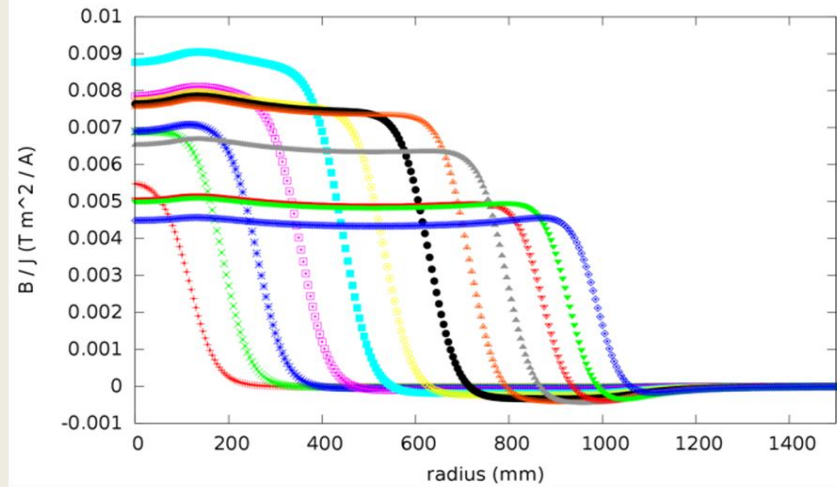
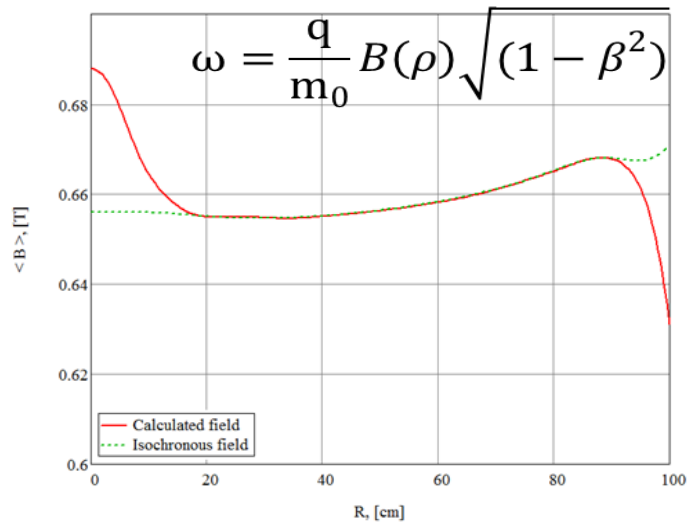


メインコイル

12対のトリムコイル



メインコイルのみによる平均磁場

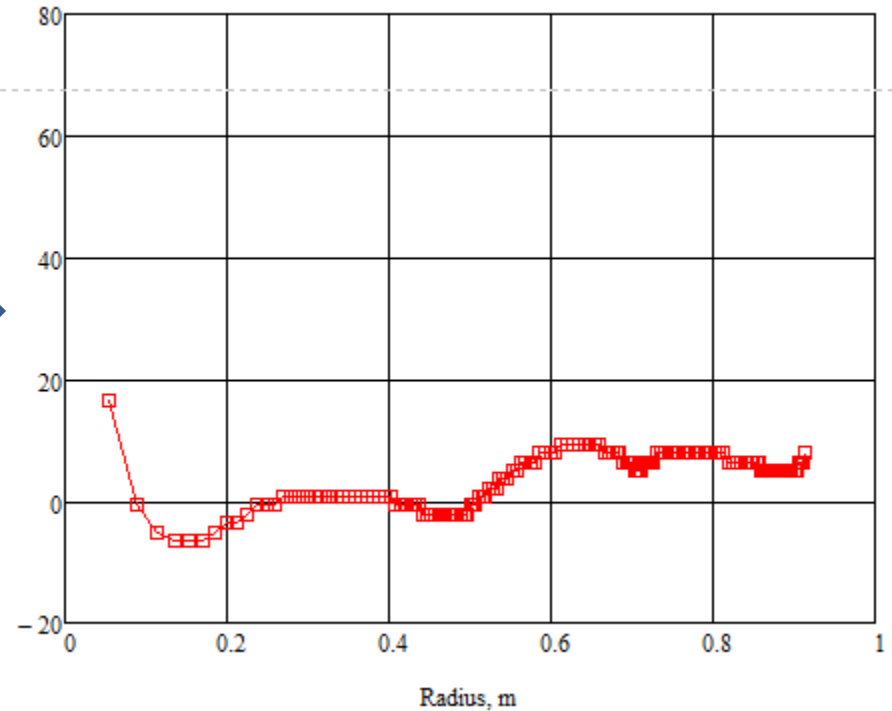
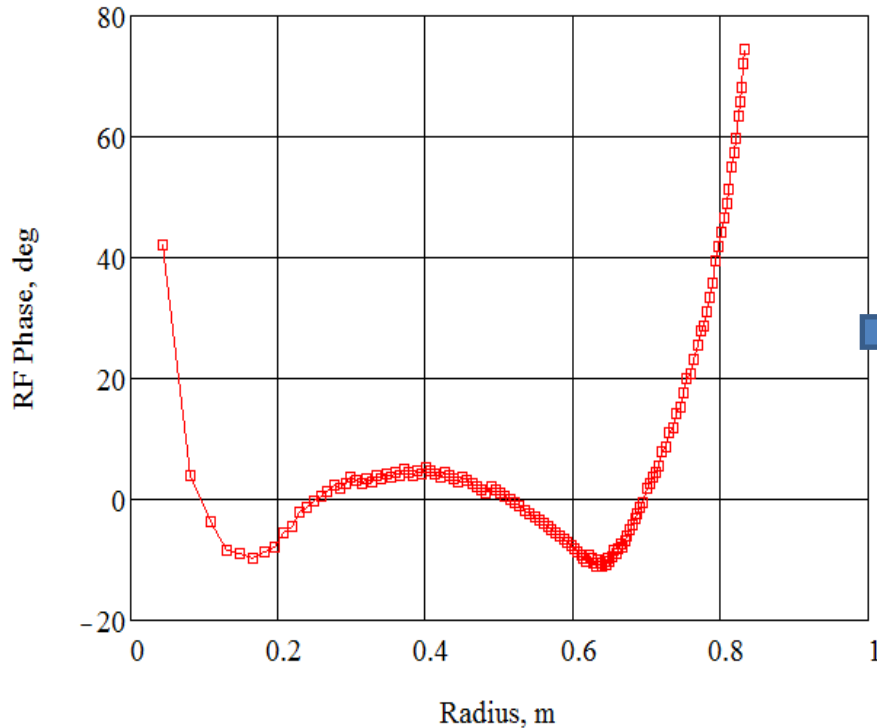


各トリムコイルに流した電流あたりの磁場変化

# トリムコイルによる等時性磁場の最適化

最適化前の粒子の位相

最適化後の粒子の位相



粒子がDee電極の中心を通る時のRFの位相。正であれば粒子の到達する時間が遅いことを示している。等時性磁場を最適化することで、ずれは減少した。

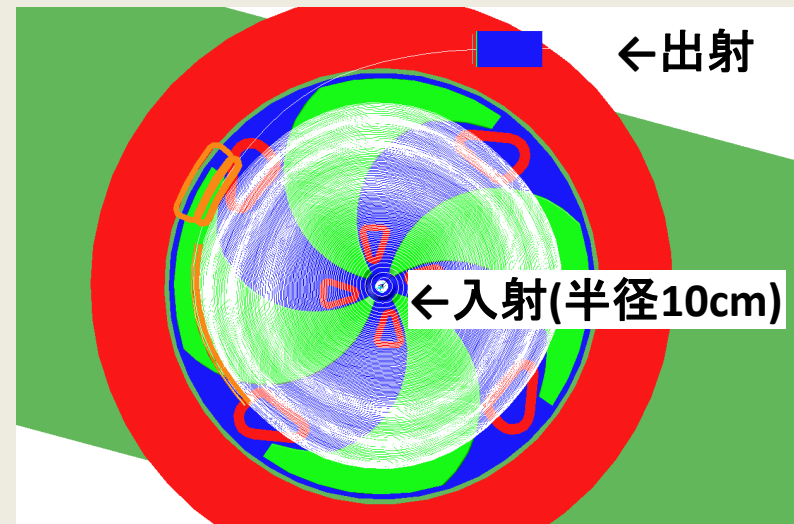
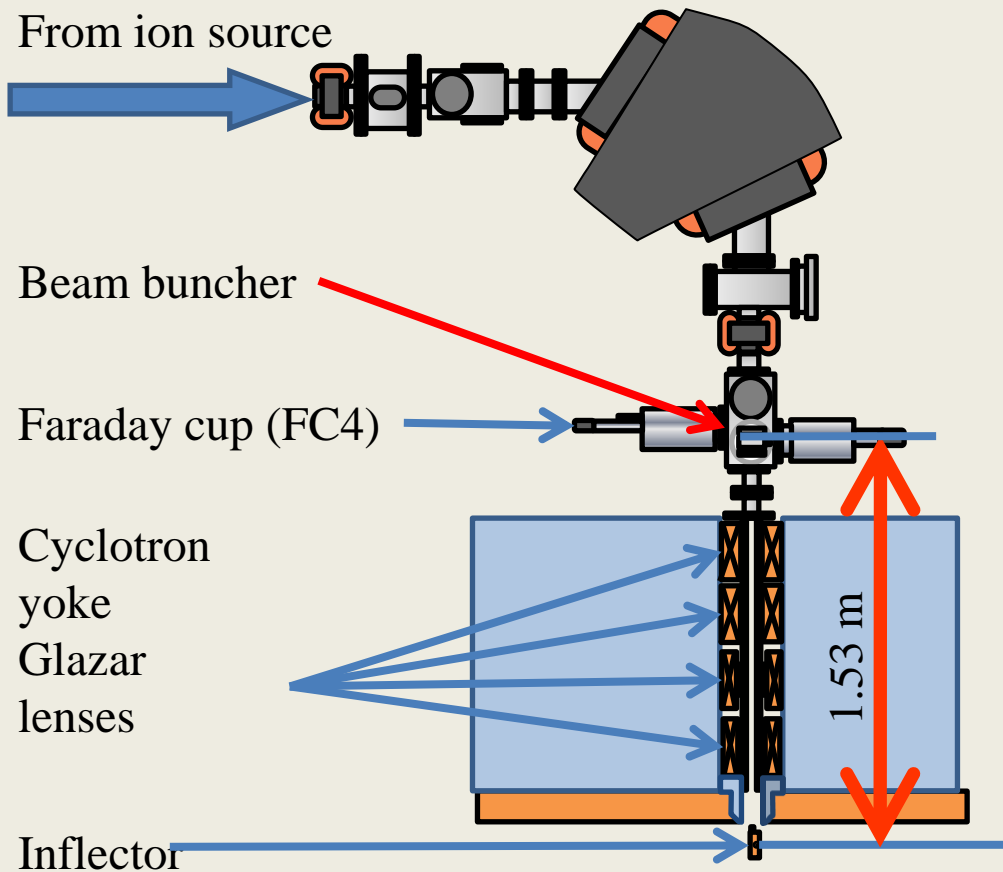


# シミュレーションの目的

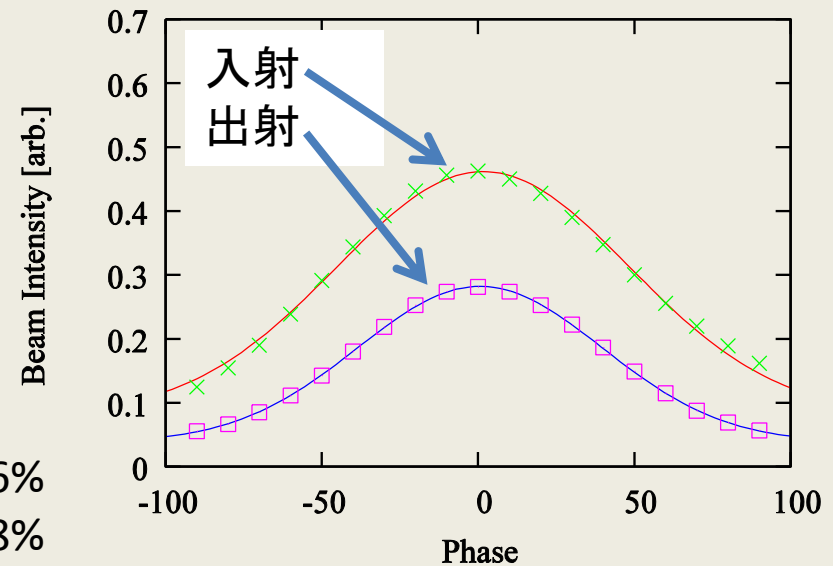
サイクロトロンの大強度化のために、ビームの挙動を把握する

1. SNOPについて
2. バンチャー位相による入射・出射量の変化
3. 出射系の最適化

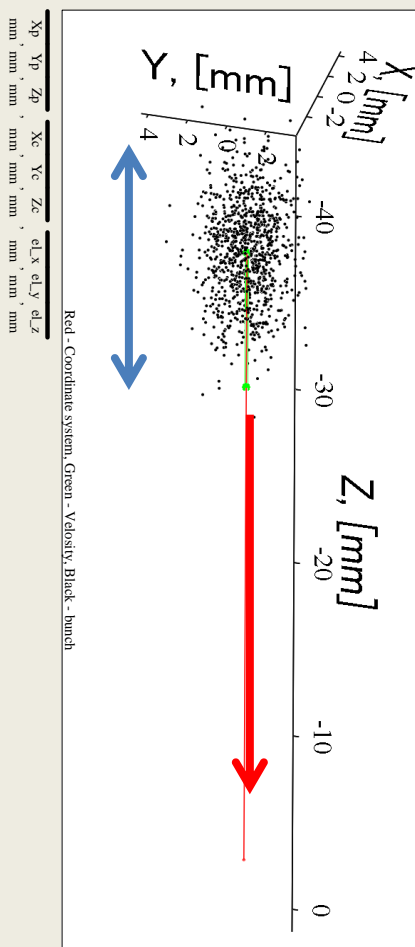
# 入射・出射ビーム量のバンチャー位相依存性



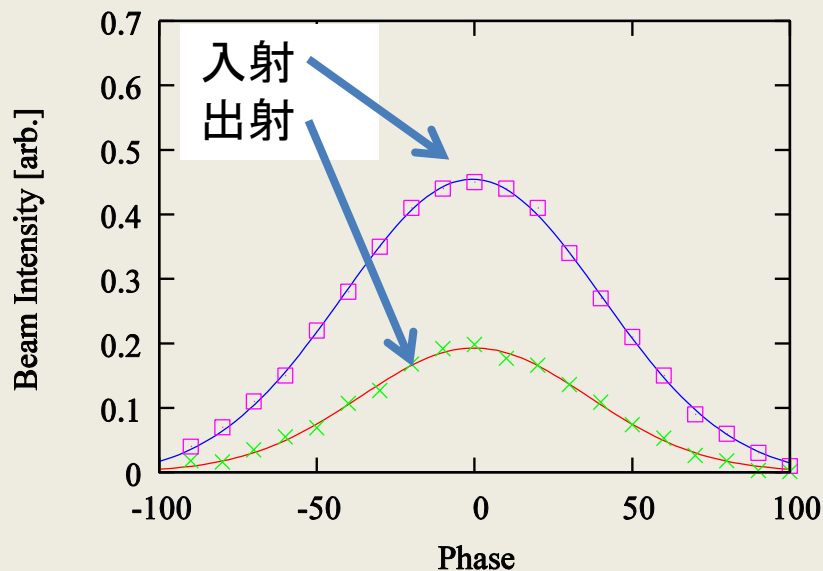
入射  $1\sigma=66.3\pm 3.0^\circ$  入射効率 46%  
 出射  $1\sigma=55.2\pm 0.3^\circ$  出射効率 28%



# シミュレーション上で初期条件のバンチ幅を変更



Simulation is  
 $\epsilon_x = \epsilon_y = 150\pi$  (mm mrad)



60° Bunch

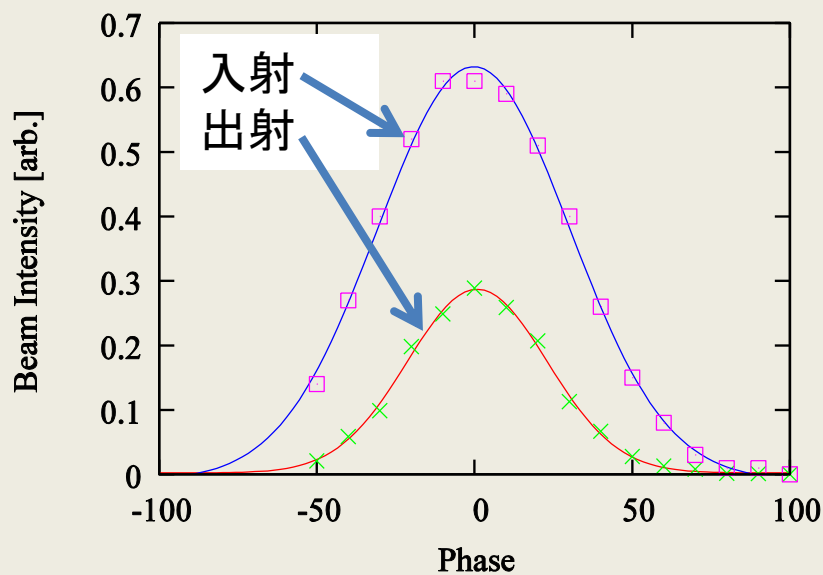
入射  $1\sigma = 56.5 \pm 2.2^\circ$

出射  $1\sigma = 57.0 \pm 4.7^\circ$

入射効率 45%

出射効率 20%

→実験結果を再現



30° Bunch

入射  $1\sigma = 43.2 \pm 0.8^\circ$

出射  $1\sigma = 31.4 \pm 0.7^\circ$

入射効率 61%

出射効率 29%

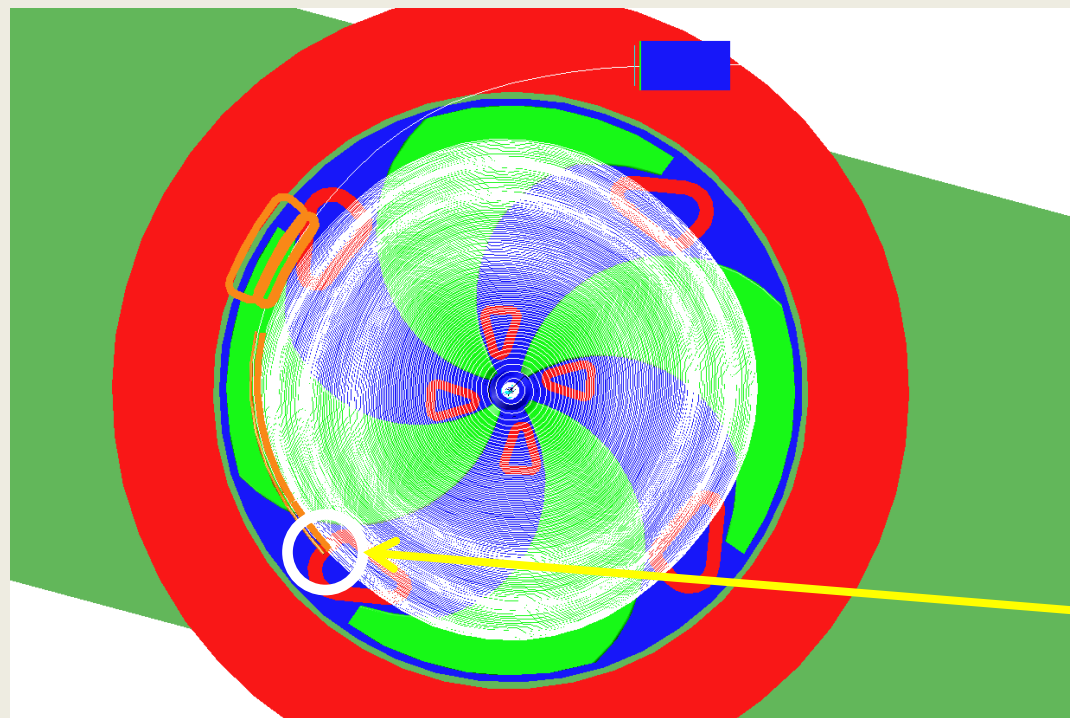
→バンチを狭めることで  
入射効率が改善

# シミュレーションの目的

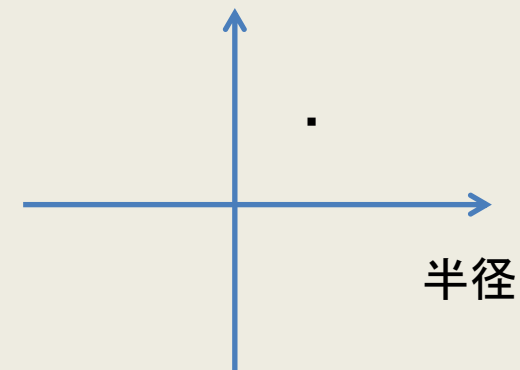
サイクロトロンの大強度化のために、ビームの挙動を把握する

1. SNOPについて
2. バンチャー位相による入射・出射量の変化
3. 出射系の最適化

# 粒子の位相空間内における分布をシミュレーションして出射系を最適化



接線方向に対する傾き

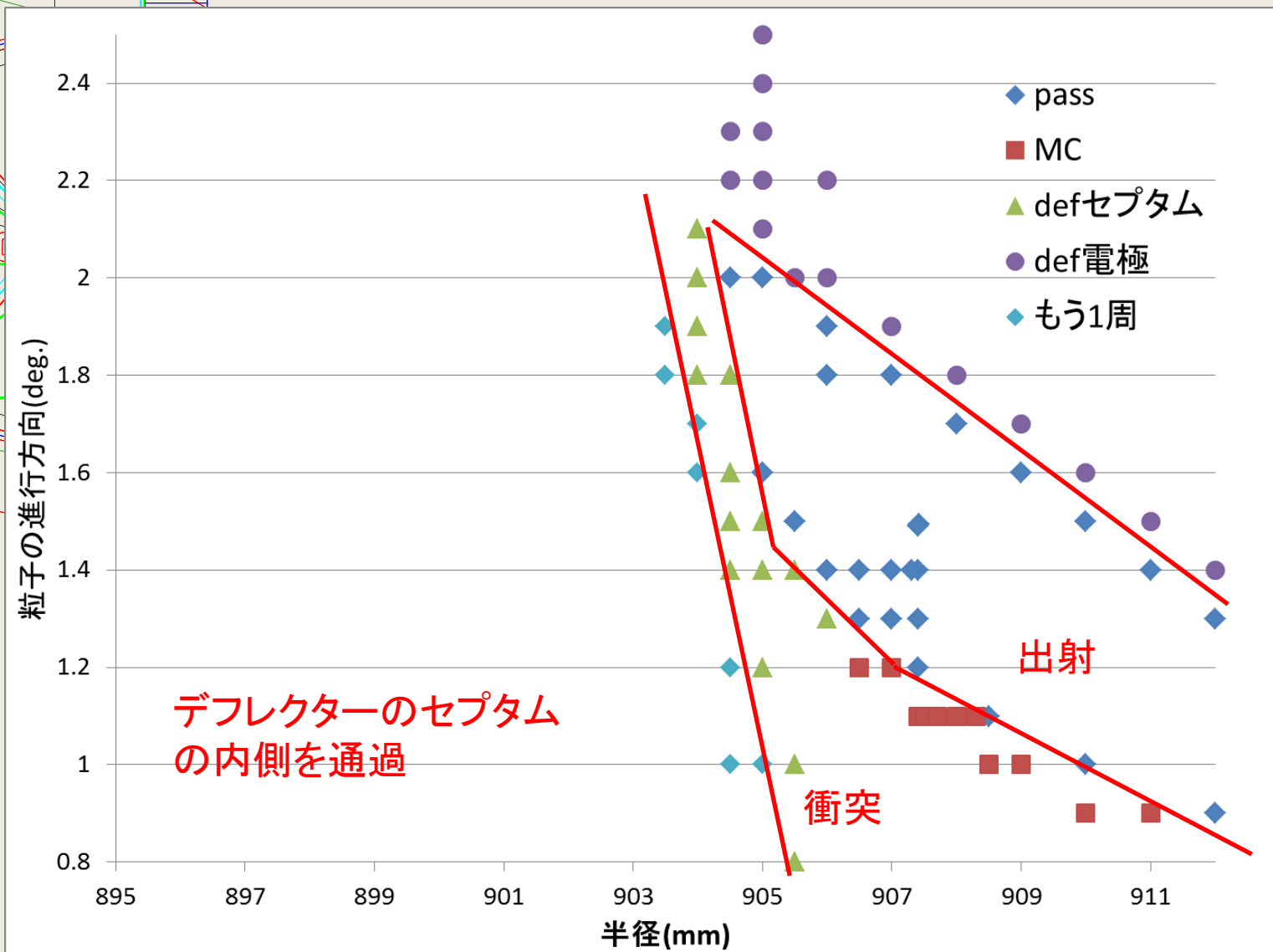


デフレクター直前

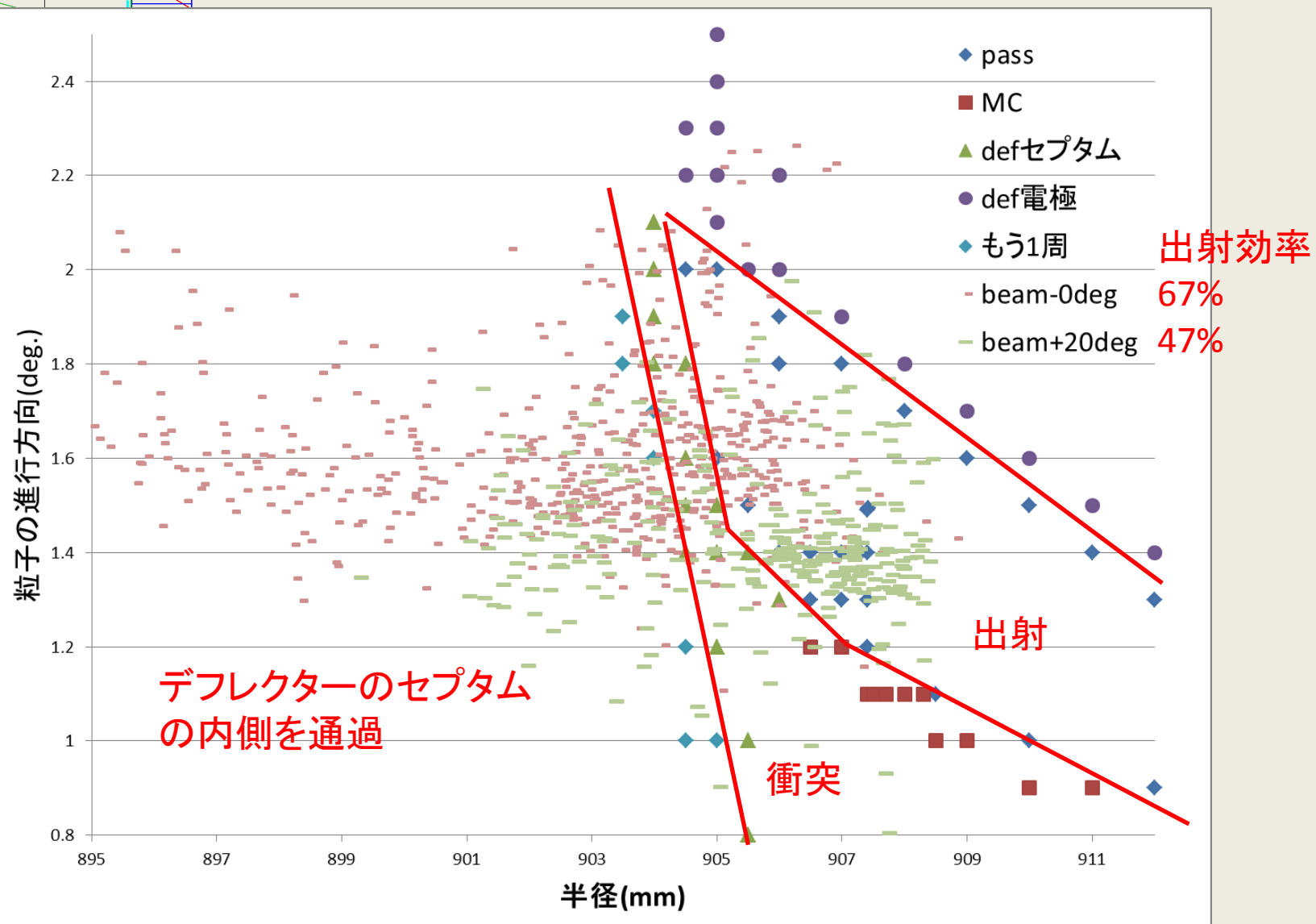
1. 位相空間内である粒子が通過するかどうか(何に衝突するか)をシミュレーションする。
2. シミュレーション上でバンチを入射してその粒子の位相空間の位置を示す。



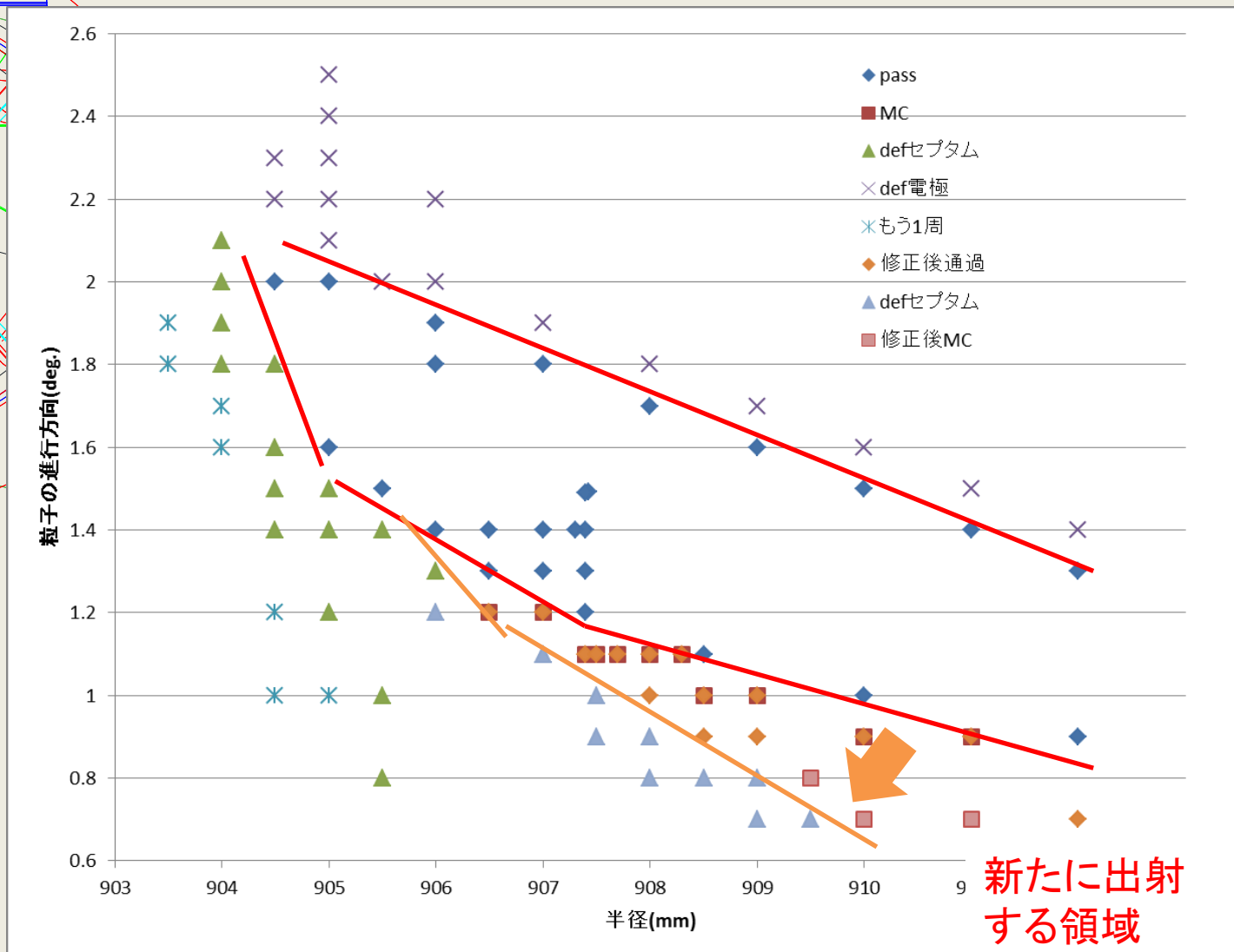
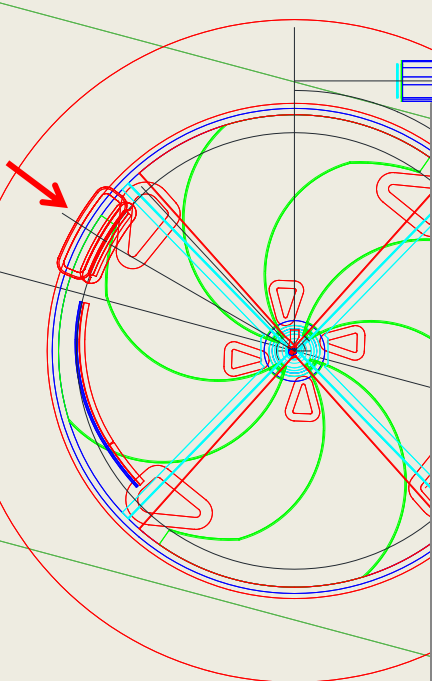
# 位相空間の各点にある粒子の行方



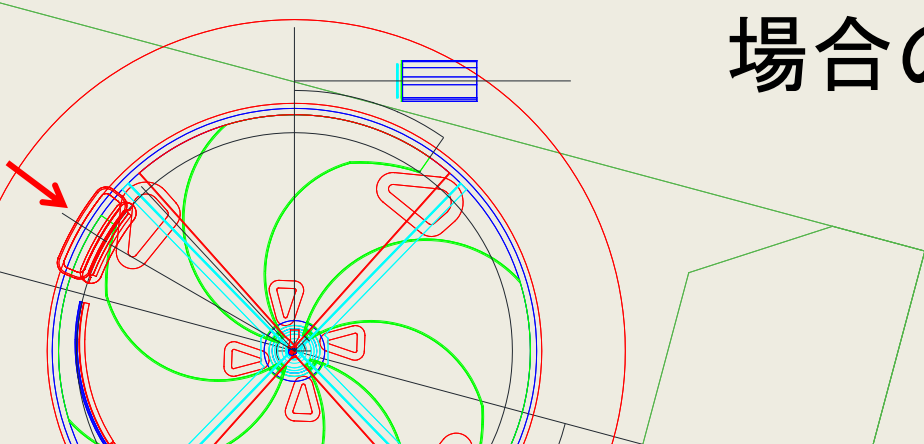
# ビーム粒子の位相空間内における分布



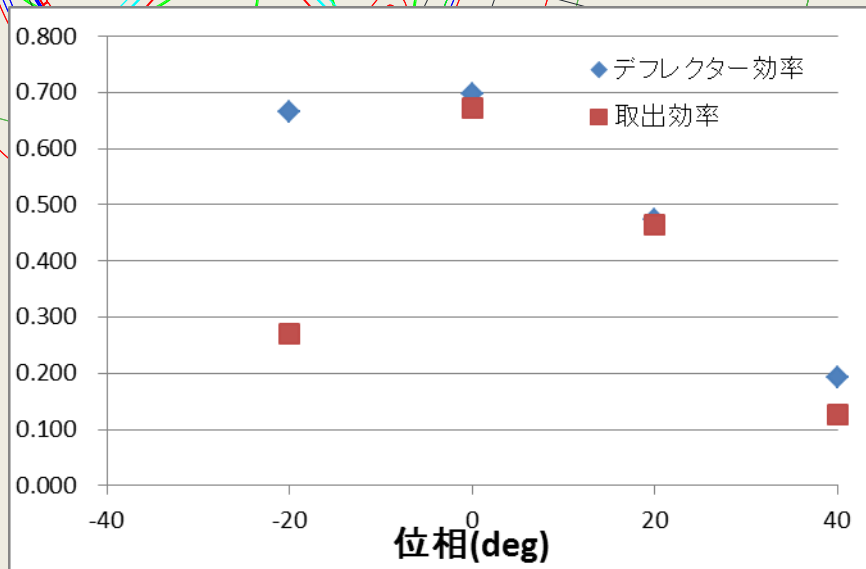
# マグネティックチャンネルを内側に5mm移動させた場合の変化



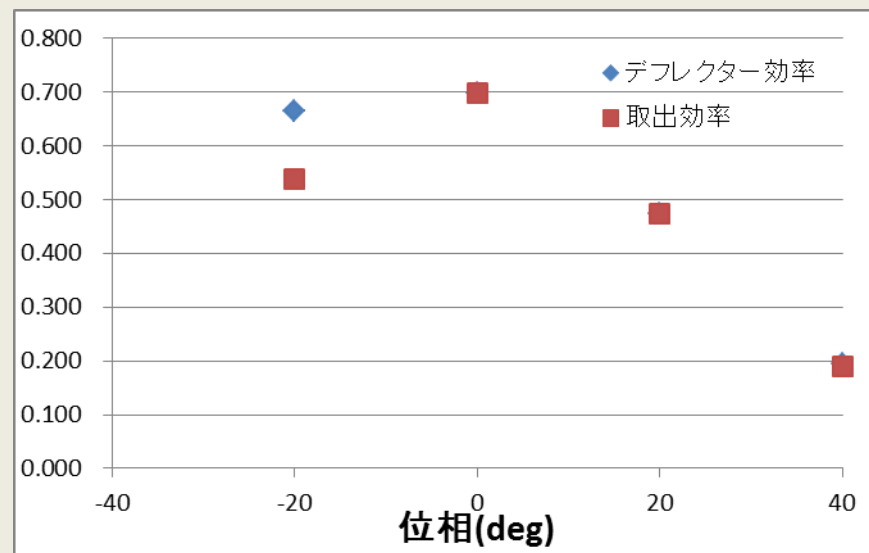
# マグネティックチャンネルを内側に5mm移動させた場合の変化



マグネティックチャンネルの効率が悪かった位相に対して取り出し効率が改善した。



移動前



移動後

# まとめ

1. バンチャー位相による出射量の変化
  - バンチャー波形の最適化により入射量増加の可能性
2. 出射系の最適化
  - 粒子の位相空間内での分布の中で、どの粒子が通過、あるいは何に衝突しているのかを把握
  - 出射効率の向上のために必要な条件を推定