

# J-PARC muon g-2/EDM実験用ビーム入射キッカーの磁場設計

飯沼 裕美 (茨大理工), 阿部 充志 (KEK), 佐々木 憲一 (KEK), 中山 久義 (KEK),  
三部 勉 (KEK), 高柳 智弘 (JAEA), 徳地 明 (パルスパワー技術研究所)

J-PARC Muon g-2/EDM実験では、医療用MRI電磁石サイズのソレノイド型超電導電磁石内に運動量 300MeV/cのMuonビームを直径66cmの軌道で蓄積し、異常磁気能率(g-2)の超精密測定とEDM探索を行う計画である。

蓄積電磁石内部の精密調整された蓄積領域へ静磁場を乱さずにビーム入射を行うことが実験技術の要の一つであり、我々は、蓄積領域付近に径方向パルス磁場を発生させ、ビームのソレノイド軸鉛直方向の運動を制御するキッカー装置製作に取り組んでいる。線形な磁場計算が可能な入射領域とミュオン蓄積領域の磁場分布の算出は、多数の円電流で再現する手法を取り入れることで、3次元有限要素法で設計した磁場分布と0.1ppm以内の一致を実現しつつ、ビーム軌道計算及びスピンベクトルの計算を実現している。

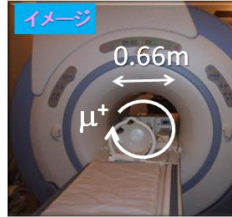
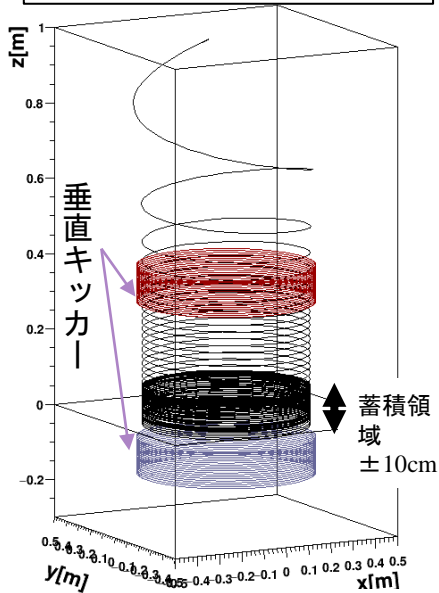
本発表では、蓄積電磁石内部の磁場空間分布を考慮したビーム入射軌道から、パルス磁場の空間・時間分布の最適解算出手法を議論し、蓄積ビーム品質の評価、実機用のパルス磁場発生用のキッカーコイル形状、コイルに流す電流時間構造の具体パラメータを示す。キッカー装置の性能は、蓄積領域内のビーム軌道、ベータatron振幅の大きさや入射効率を決定づけるので、実際のビーム運転時のキッカー調整手法シナリオも併せて議論する。また、コイルに掛かる機械的・熱的負荷の評価の進捗を報告する。

本スライドでは入り切れませんが、論文で議論します。

# J-PARC muon g-2/EDM実験の概要と物理目標

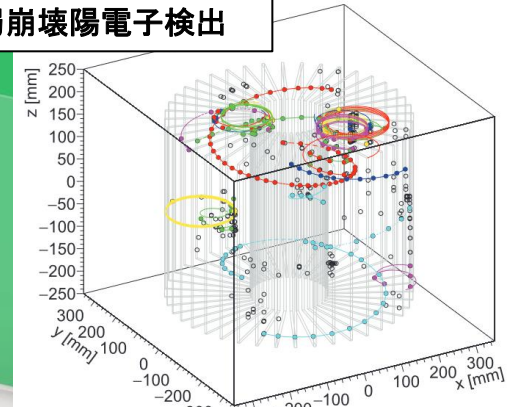
素粒子標準模型を 超える新物理：異常磁気能率 (g-2)の精密測定 + 電気双極子能率(EDM)探索を行う

## ① 3次元螺旋ビーム入射

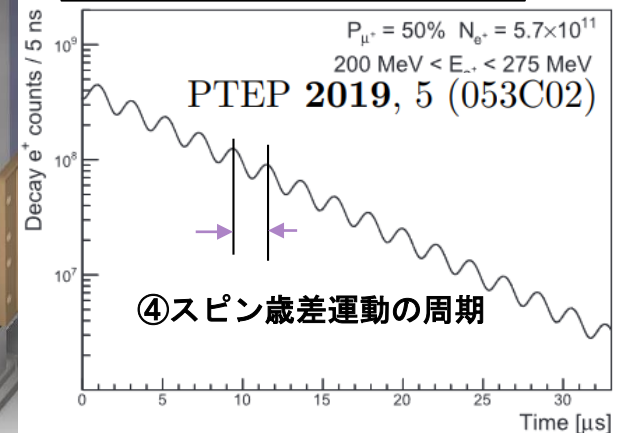


医療用MRI電磁石サイズのソレノイド型超電導電磁石内に運動量 300MeV/cのMuonビームを①3次元螺旋軌道で入射し、②直径66cmの軌道に蓄積・磁場中でスピン歳差運動の後、③弱崩壊により放出される陽電子を検出、④スピン歳差運動周期を精密測定する。

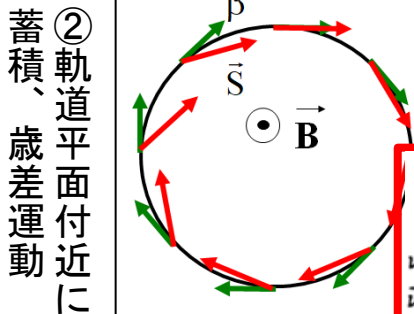
## ③ Muon弱崩壊陽電子検出



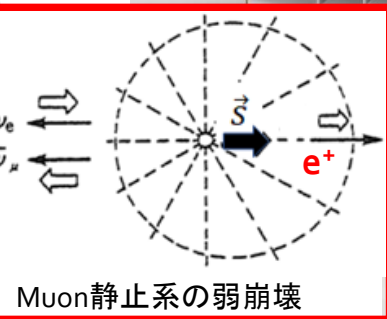
## 崩壊陽電子の時間スペクトル



蓄積、歳差運動



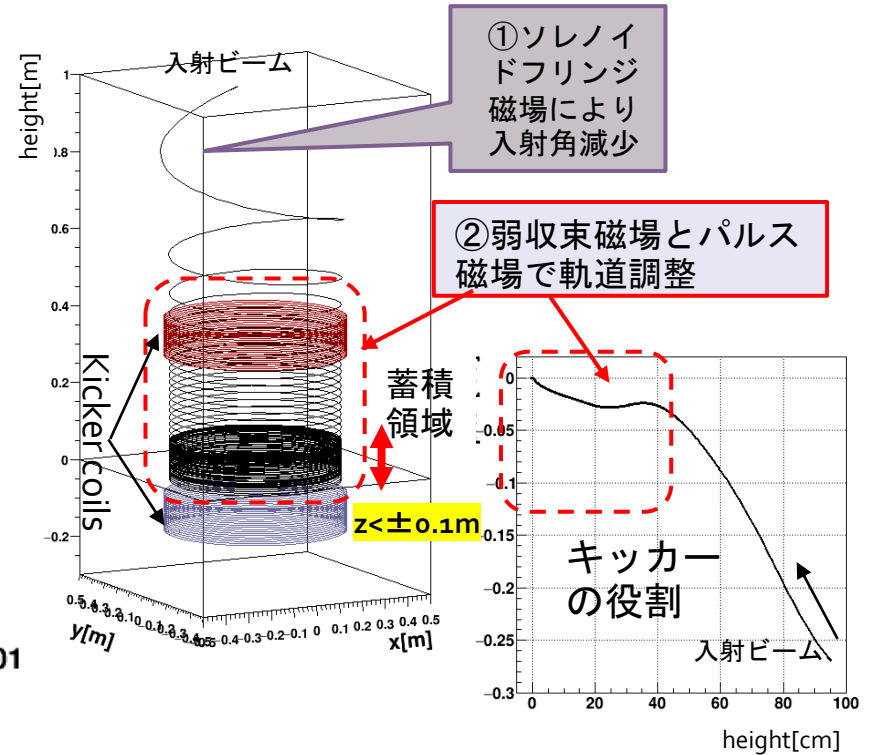
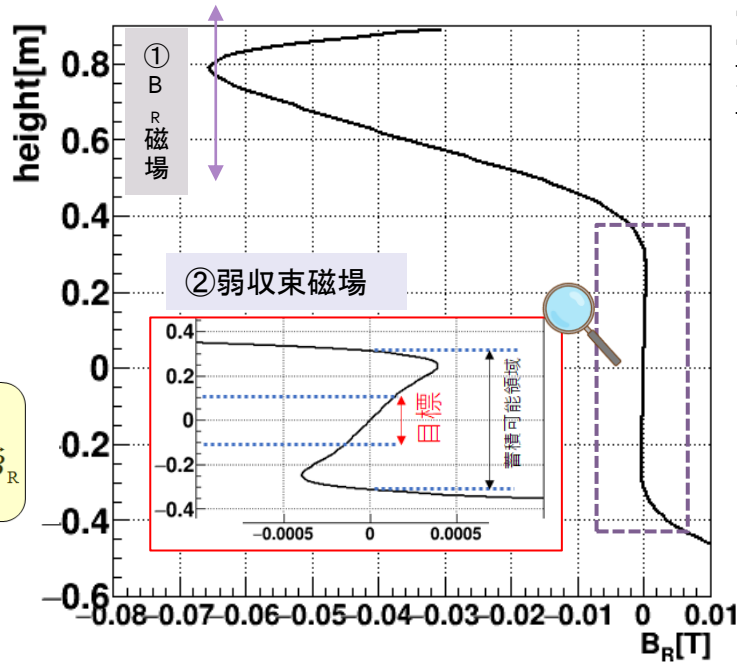
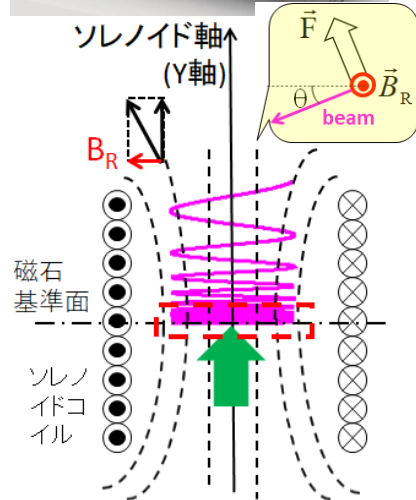
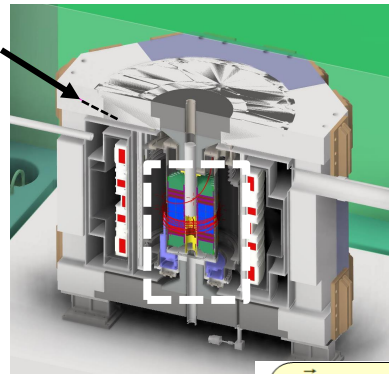
弱崩壊陽電子はスピン情報をもつ



Muon静止系の弱崩壊

# キッカー装置が3次元螺旋ビーム入射の成否を決める。

蓄積領域へ静磁場を乱さずに、弱収束磁場領域内に入射ビームを誘導したい。  
蓄積領域付近に径方向パルス磁場を発生させ、ビームのソレノイド軸鉛直方向の運動を制御する装置が必須。



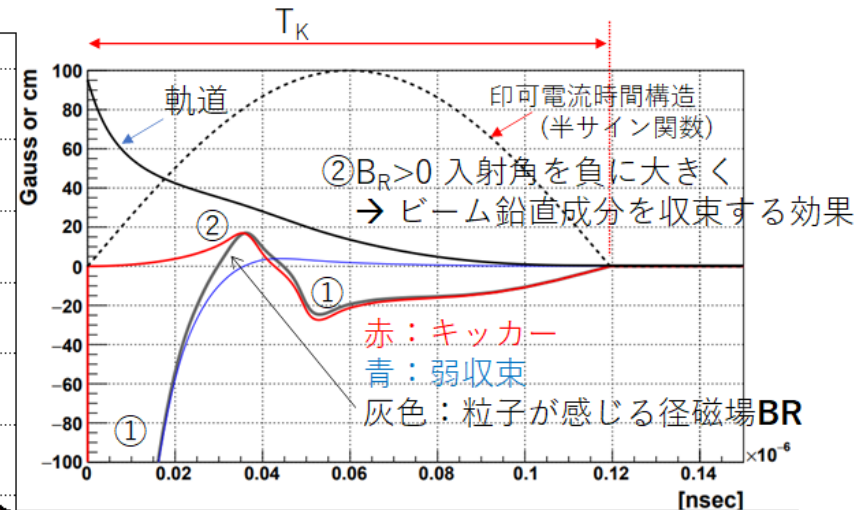
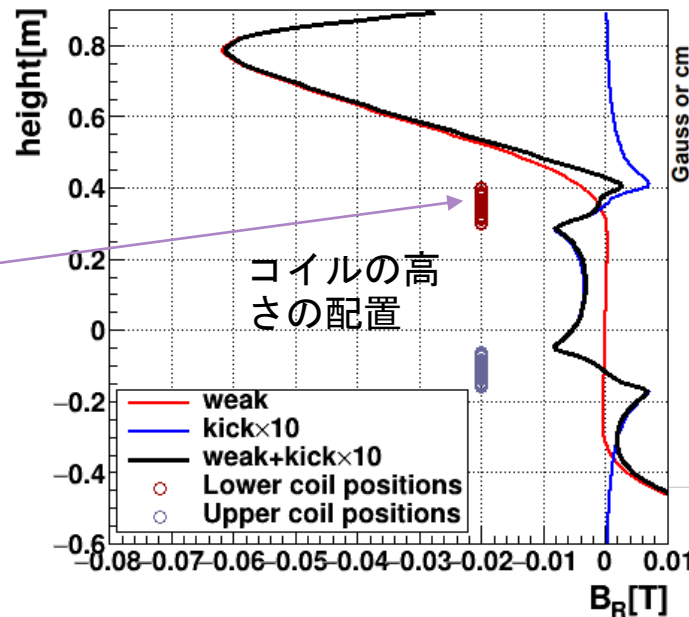
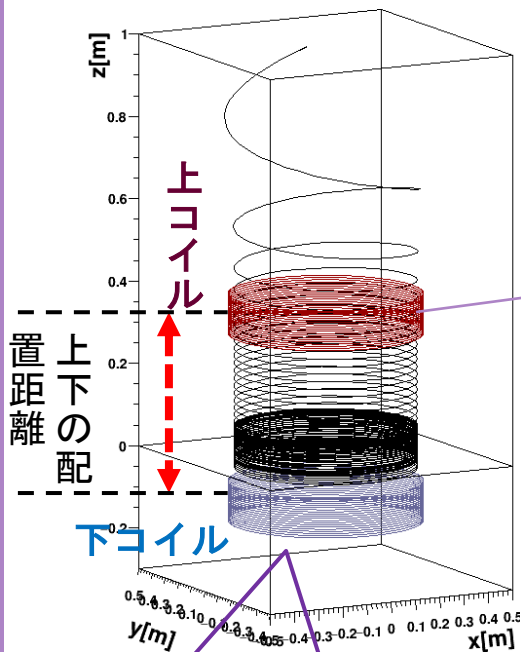
簡単のために、一様な径方向磁場  $B_R = \text{const}$  を想定し、 $B_R L$  積を見積もると、 $B_R L = \frac{q}{m} v_{z0}$  を得る。  
(ただし、 $L$  はビームの飛行距離、 $v_{z0}$  は鉛直方向の速度成分)

入射の肝：キッカーが作る空間分布、時間分布を調整して  $B_R L$  積を  $-0.266\text{g}[\text{T}\cdot\text{m}]$  程度にすればよい。

# キッカーに適した軸対称パルス磁場を決める

蓄積磁石は軸対称磁場分布なので、軸対称なキック磁場が望ましい。  
 ビーム入射に同期したパルス磁場、入射後の物理データ取得前だけ動作する。

パルス電流を  
 $\text{半sin} \frac{2\pi}{T_K}(t - t_0)$  構造にする。



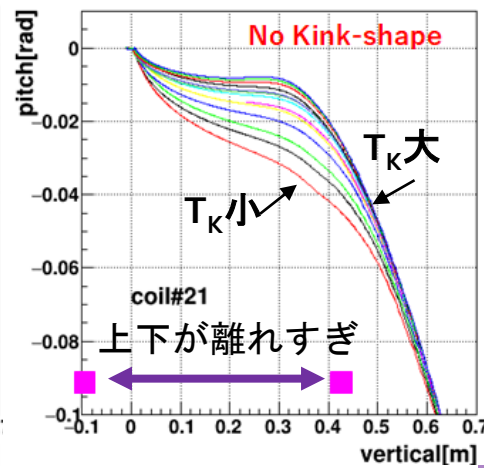
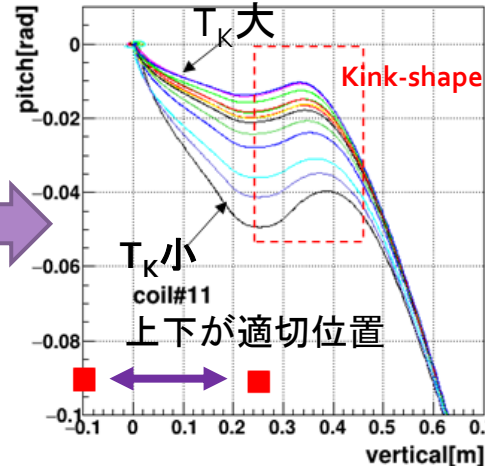
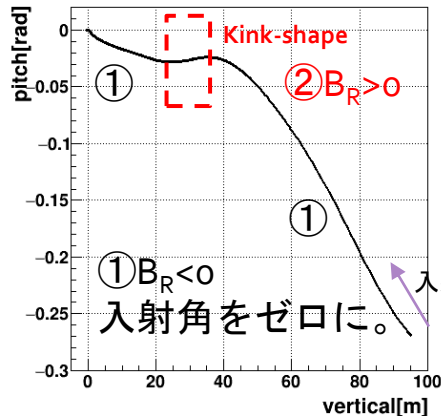
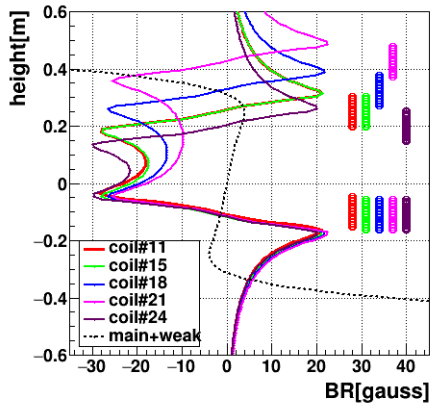
ビームが感じる径方向磁場  $B_R$   
 $= B_{R0}(r, z) + B_R(z) \sin \frac{2\pi}{T_K}(t - t_0)$

キッカーコイル形状は設置場所の制約より、  
 半径=35cm (軌道33.3cm)、幅10cm程度の  
 円筒シート状にし、インダクタンスを  
 1.01μH (上側、片側夫々) にしている。

コイル上下間の配置距離、コイル電流ピーク値、  
 半サインキック時間の長さ( $T_K$ )の最適化を行った。

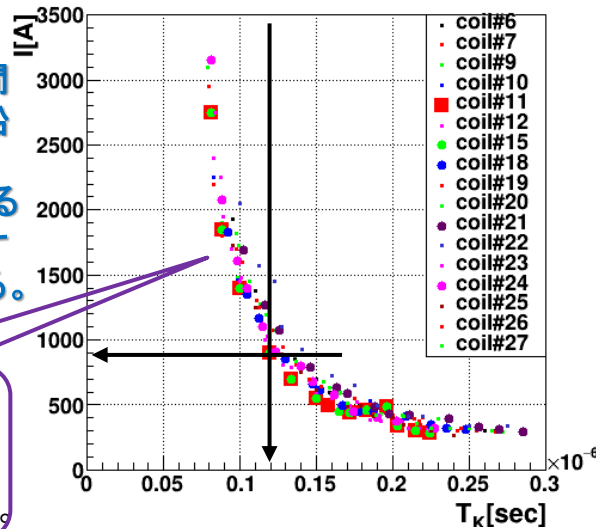
# コイル上下の配置、コイル電流ピーク値、 半サインの長さ( $T_K$ )の最適化(1)

キック後に鉛直方向とピッチ角をゼロになるように、 $T_K I_0$ を調整しながら、様々なコイル上下配置を試す。

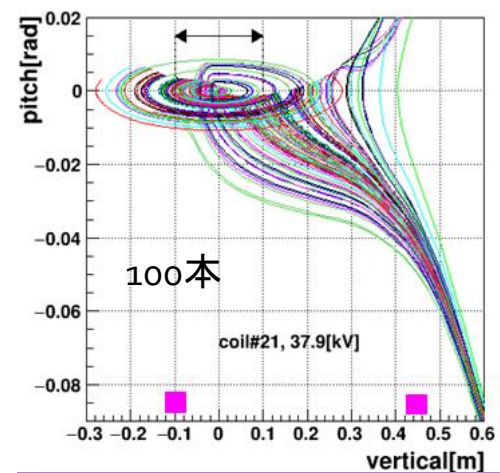
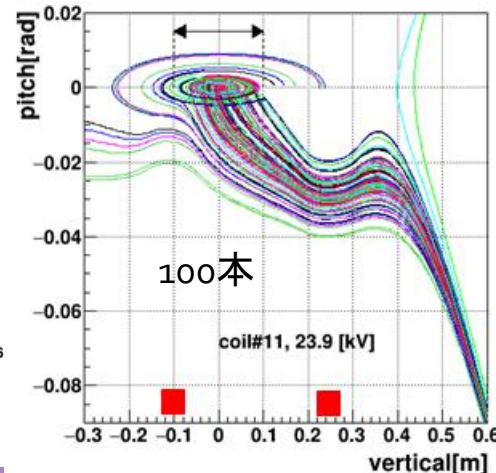


電流を強く、キック時間を短くするほどビーム鉛直成分を収束する効果 (kink-shape)は大きくなるが、上下コイルが離れすぎると収束効果は消える。

曲線の形状は、  
 $B_R L = \frac{q}{m} v_{z0} = \text{const.}$   
を満足することを示す。



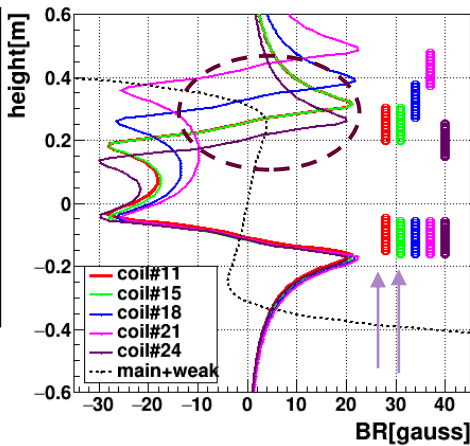
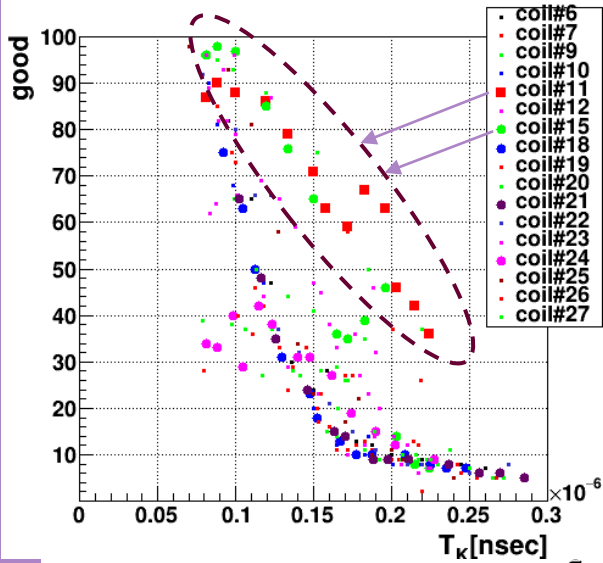
各キックパラメータ毎に100本のビーム軌道評価を行った。



# コイル配置、コイル電流ピーク値、半サインの長さ(TK)の最適化(2)

①コイル配置により、入射効率 vs.キック時間の相関に差異が出ることがわかった。

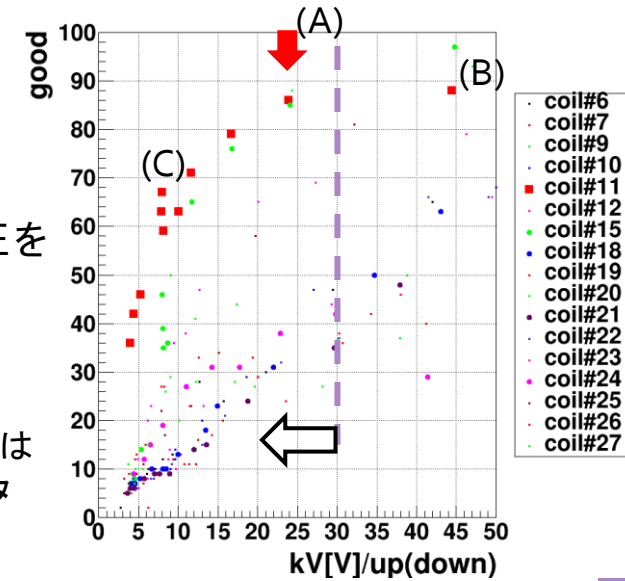
→弱収束磁場の分布とキッカーコイルの配置により適切なコイル配置解がある。



②運用面を考慮し、コイルに掛かる電圧を評価する。

$$V = \frac{L}{T_K} \pi \times I_0$$

(ただし、Lは上または下コイルのインダクタンス1.01μH)



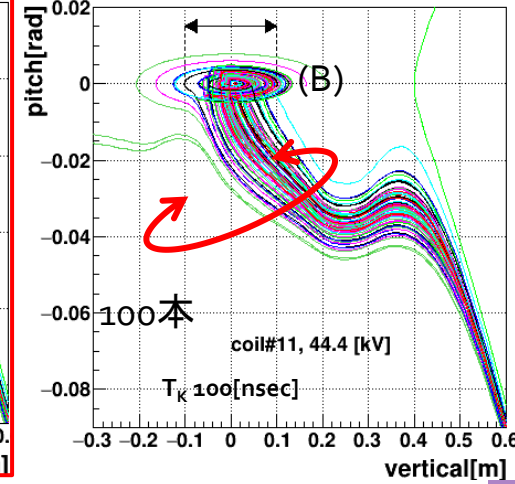
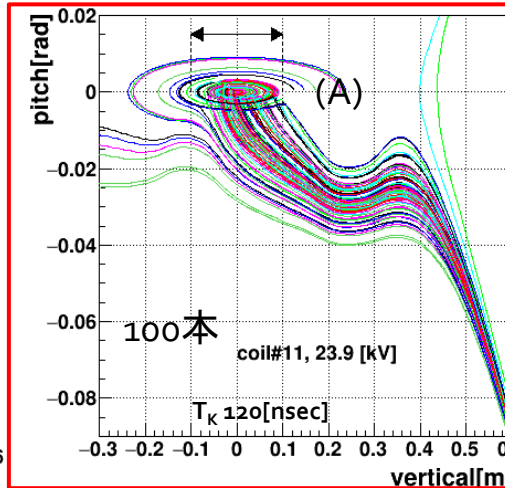
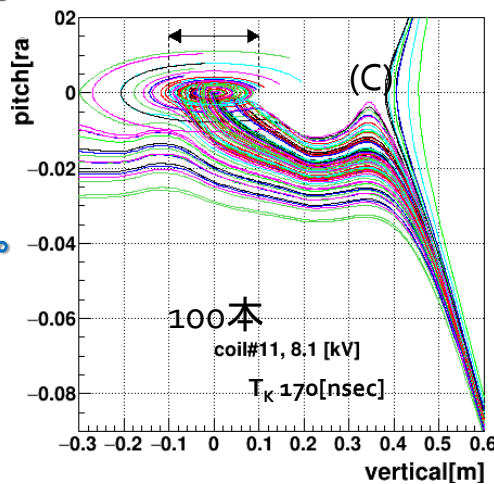
入射効率>80%、そして、上(下)キッカーコイルに掛かる電圧<30kVを考慮し、キッカーパラメータを決定。

(A)のパラメータ

$T_K=120\text{nsec}$

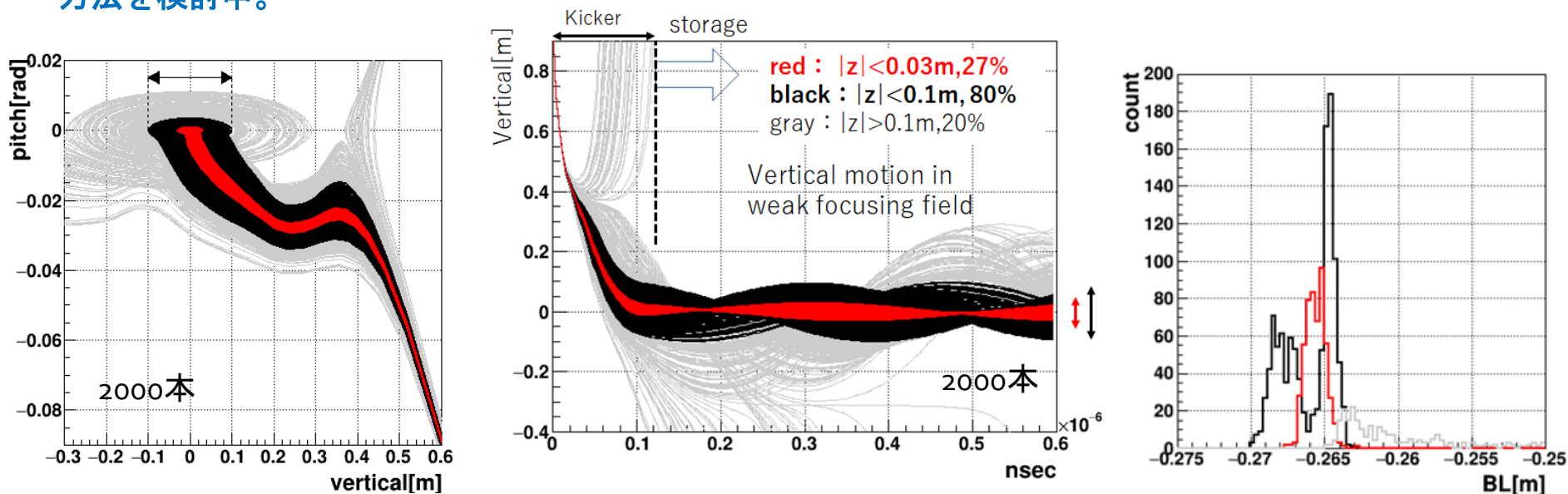
$I_0=950\text{A}$

$V=23.9\text{kV}$



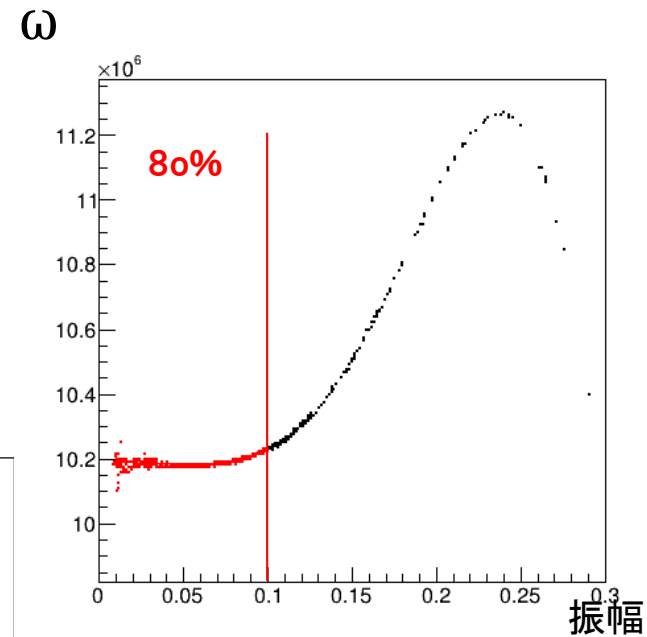
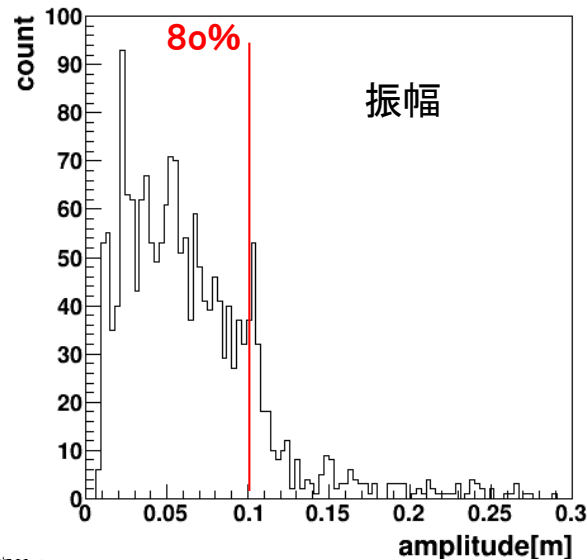
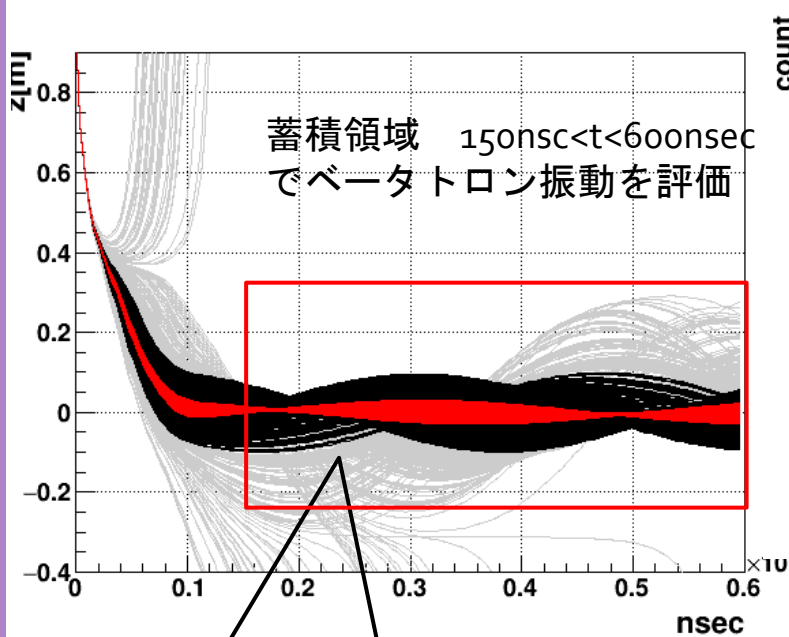
# 結果と今後の計画

- キッカーコイル上下の配置、コイルに流す電流；半サイン形状  $I_K(t) = I_{K0} \sin(\pi t/T_K)$  の  $I_0, T_K$  のパラメータ決定を行った。軌跡確認の統計数を増やした結果を下に示す。
- 蓄積領域 ( $|z| < 0.1\text{m}$ ) へのビーム入射効率  $> 80\%$ 、上(下)コイルに掛かる電圧  $< 30\text{kV}$  という条件を満足する。
- 入射ビームの位相空間・蓄積磁石内部の磁場分布形状により、キッカーに要求される  $B_R L$  積の範囲は簡易モデルの見積もりとよく合っており、軌道計算の正当性も確認できた。
- 更に、狭い範囲への入射 ( $|z| < 0.03\text{m}$ ) に収めるためには、 $BL$  積が狭い範囲に収まるように、ビーム位相空間を絞る必要がある。
- 今年度、キッカー電流電源を製作中。キック後の反転電流の許容値、上下コイルに流れる電流立ち上がりのジッタの許容値検討が急務。更に、実機製作に向け、コイルと電源までの浮遊インダクタンスの最小化する方法を検討中。



ポスター時間内では、キッカー装置の性能は、蓄積領域内のビーム軌道、ベータatron振幅の大きさや入射効率を決定づけるので、実際のビーム運転時のキッカー調整手法シナリオも併せて議論する。

# 入射判定 $|z| < 0.1m$ の根拠

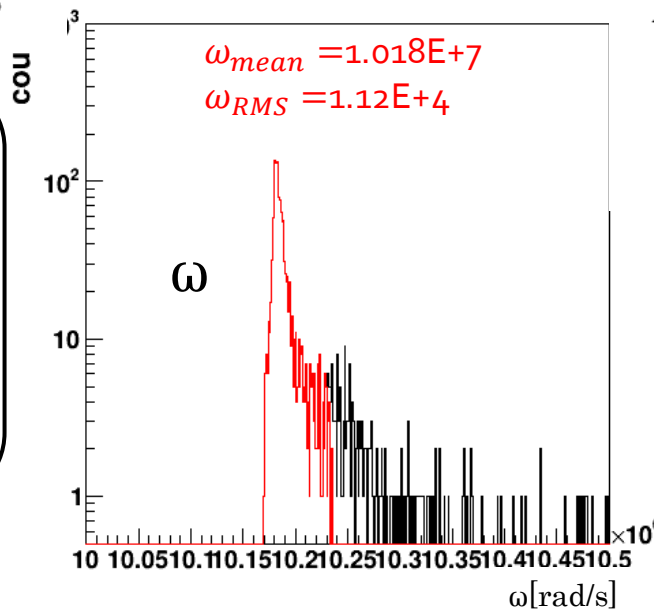


$$\frac{d^2 z}{dt^2} = - \frac{n \beta_0^2 V_L}{\rho m} z$$

$\omega^2$  とおく

① 軌道から算出

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = -\omega^2 z \rightarrow z = z_0 \cos(\omega t + \alpha)$$



- ベータトロン周期が安定するのは振幅  $|z| < 0.1m$
- 統計を上げ、Spin歳差運動の安定性も確認し、最終決定する。



# 弱収束の分布から算出される $\omega$ との比較

$$f = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = q (v_x B_y - v_y B_x)$$

$$B_x = B_r \cos \phi \quad v_x = v_L \sin \phi$$

$$B_y = B_r \sin \phi \quad v_y = v_L \cos \phi$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = q B_r v_L \quad v_L = \sqrt{v_0^2 - v_z^2}$$

$$B_r = -\frac{n}{\rho} B_0 z \quad \rho = 0.33 \text{ m} \quad B_0 = 3 \text{ T}$$

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = -\frac{n B_0 q v_L}{\rho m} z$$

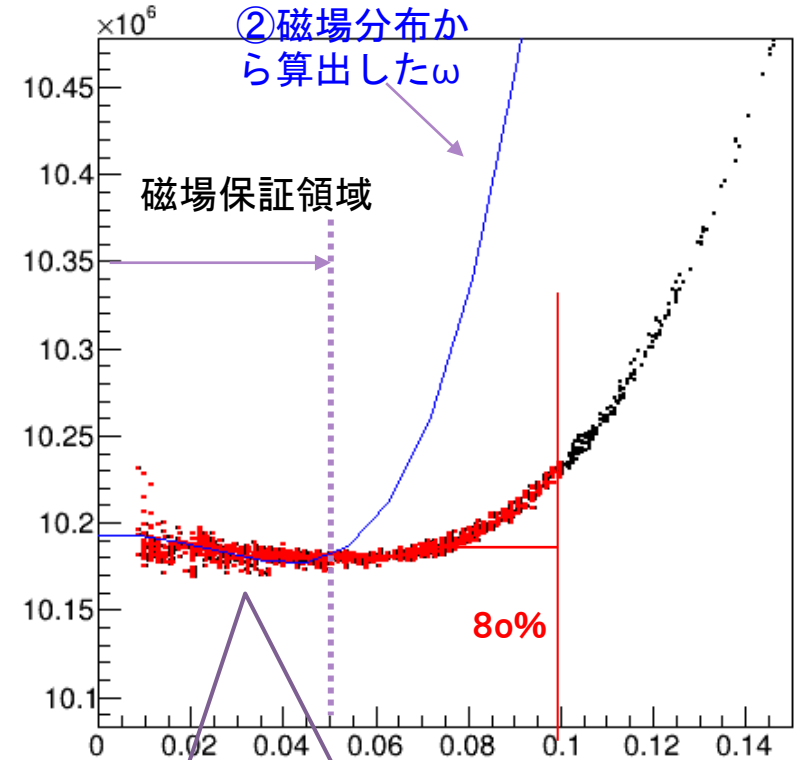
$\omega^2$  とおく

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = -\omega^2 z \rightarrow z = z_0 \omega \cos(\omega t + \alpha)$$

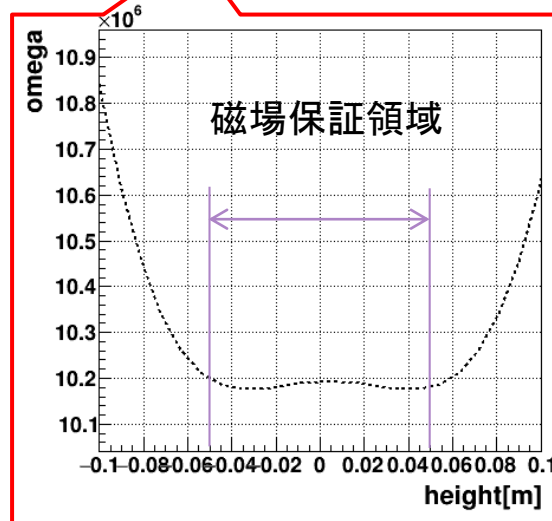
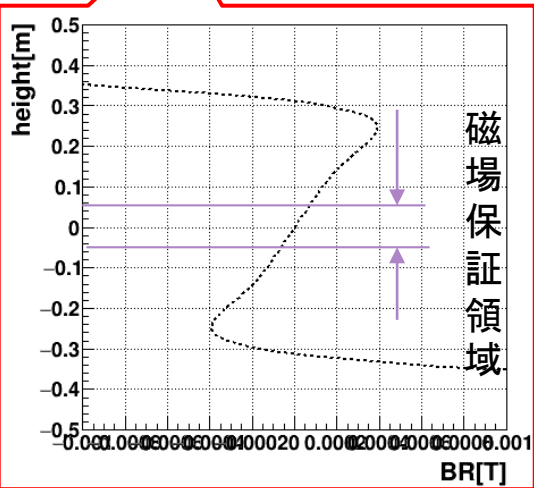
$$\omega = \frac{B_0 q v_L}{\rho m} \cdot \frac{\rho}{B_0} \frac{\Delta B_r}{\Delta z}$$

$$\omega = \frac{q v_L}{m} \frac{\Delta B_r}{\Delta z}$$

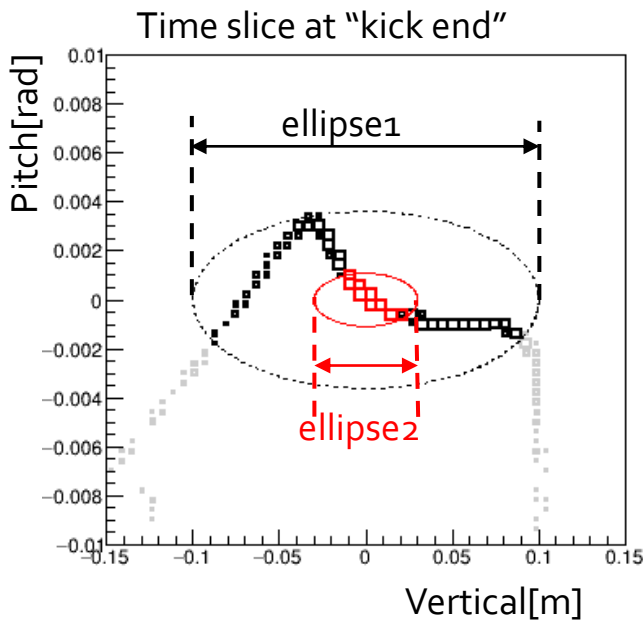
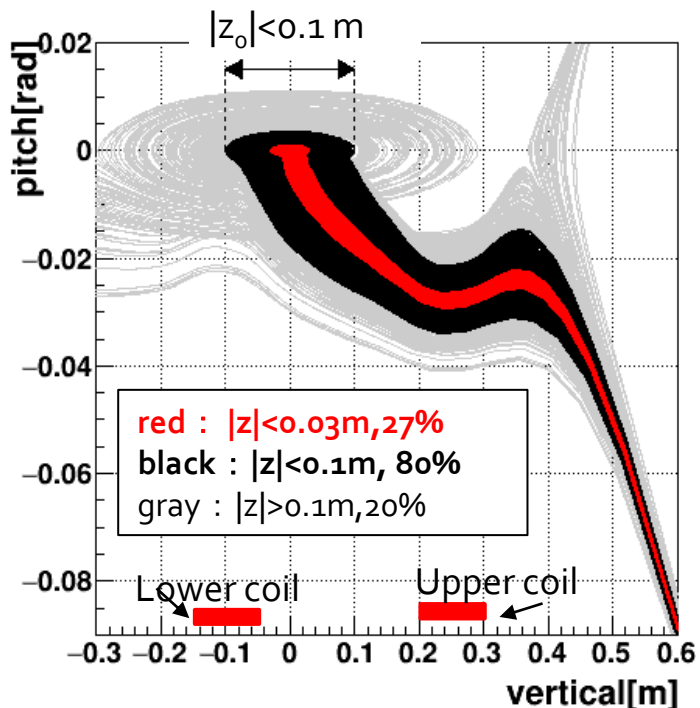
① 軌道から算出  
② 磁場分布から算出



磁場保証領域で算出される $\omega$ とコンシステント軌道から算出される $\omega$ は 磁場の保証領域を超えた $|z| < 0.1 \text{ m}$ でも安定している。



# キック直後の垂直位置、ピッチ角の“残り”がその後の振幅を決める。



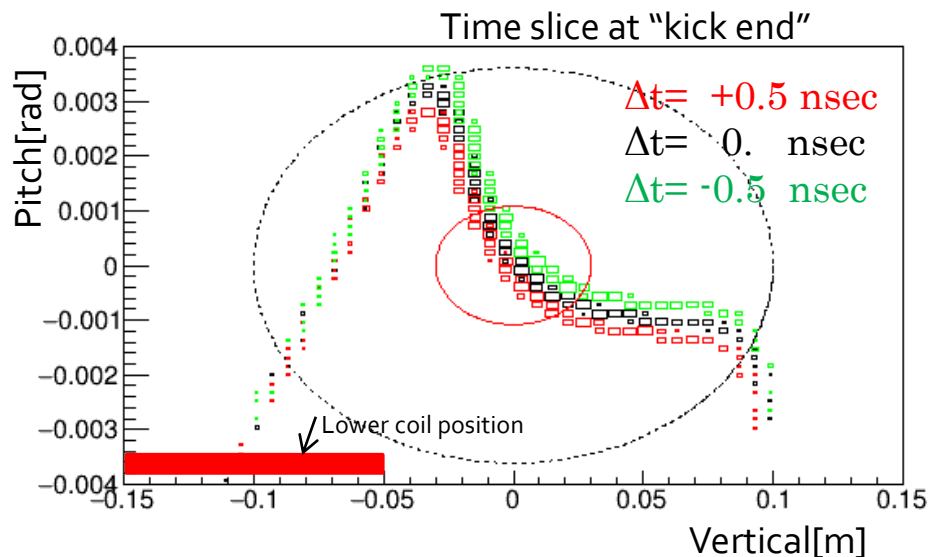
楕円

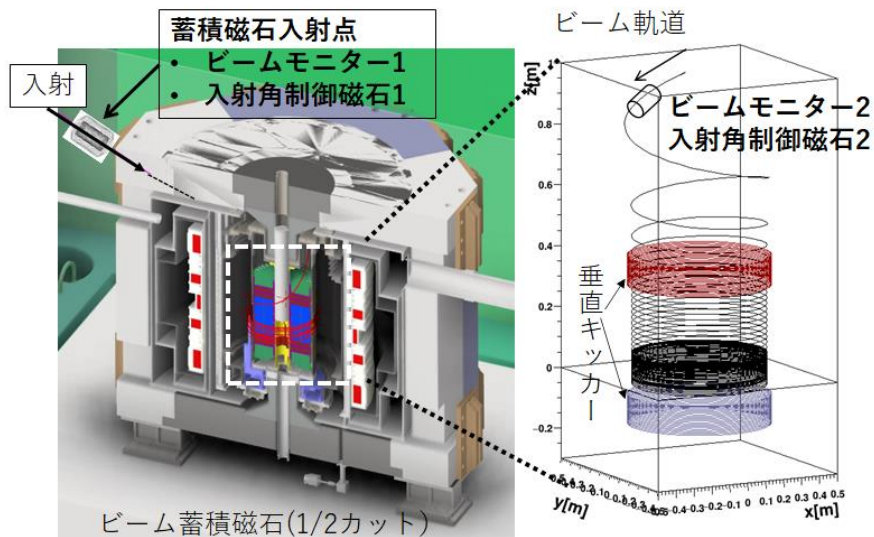
$$\left(\frac{z(t)}{z_0}\right)^2 + \left(\frac{\rho v_z(t)}{\sqrt{n} z_0}\right)^2 = 1$$

Ellipse1:  $Z_0 = 0.1 \text{ m}$

Ellipse2:  $Z_0 = 0.03 \text{ m}$

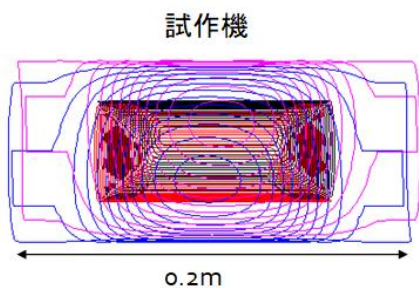
- 下コイルが作る磁場空間分布が特徴的な“垂直-ピッチ角”相関形状を作る。
- キック開始時間を0.5nsec程度ずらした場合を比較する。キッカーのジッター許容度の算出根拠になる。



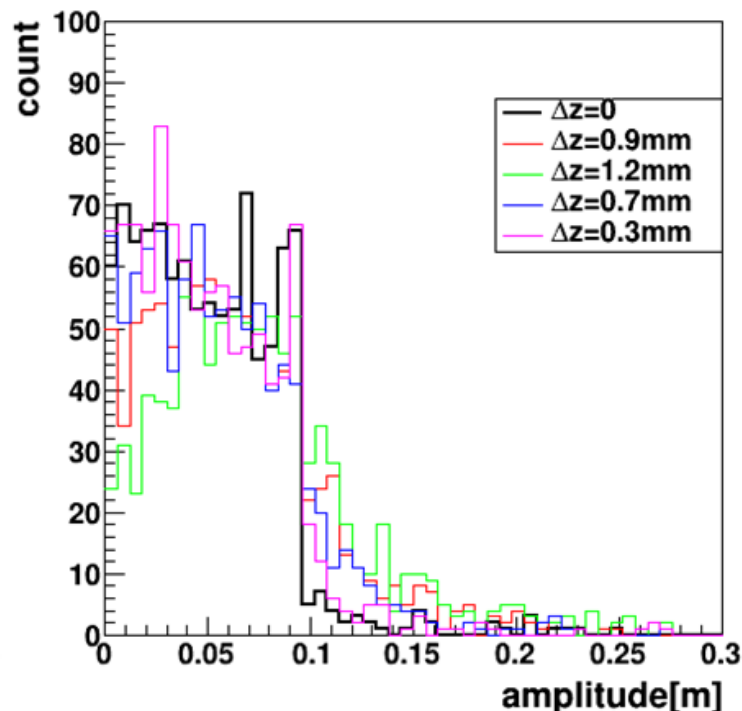
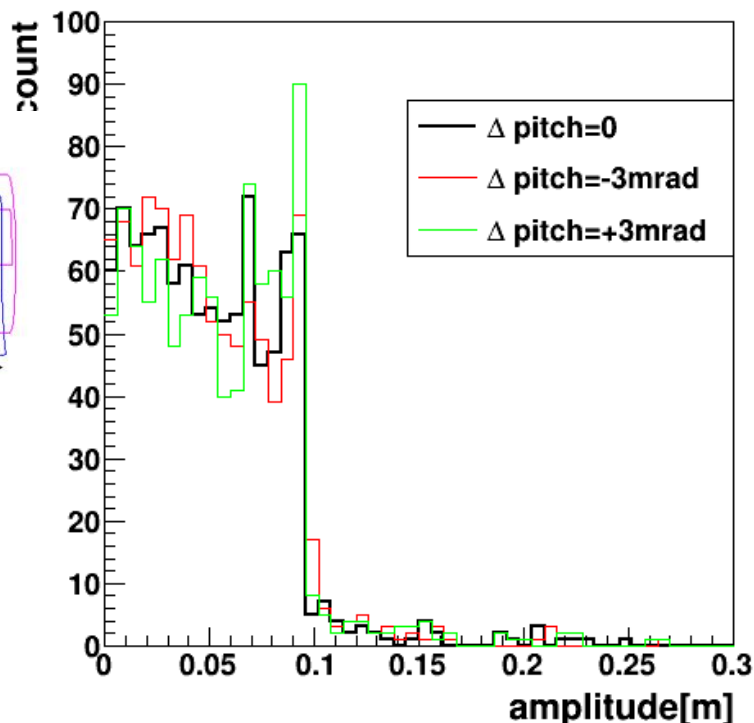


# 入射軌道の調整制度と蓄積領域の振幅の関係

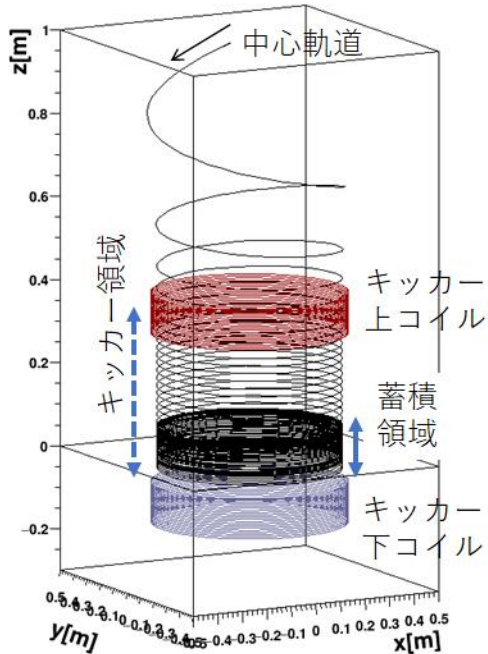
基準軌道の位置が1mmズレると、振幅  $|z| < 0.1\text{m}$  に入る率（入射効率）は半減する。



磁気シールド機能付きステアリング磁石を蓄積磁石内部に配置する。



# 振幅 $|z| < 0.03\text{m}$ に制御するには？ How about beam phase space at the upstream?

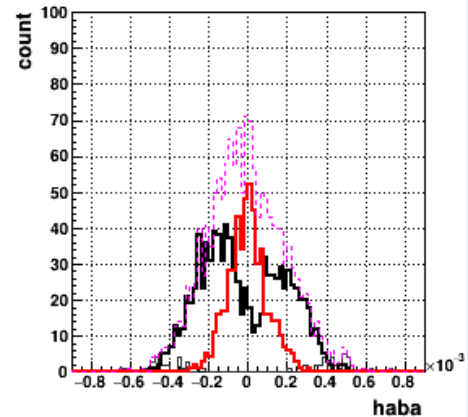
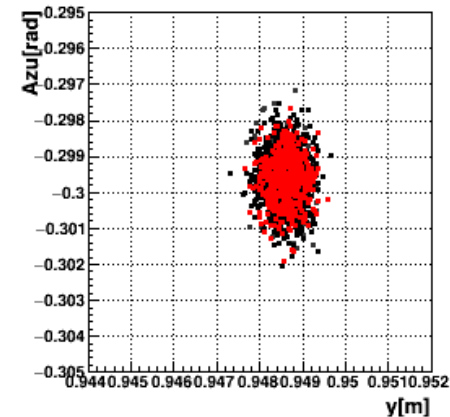
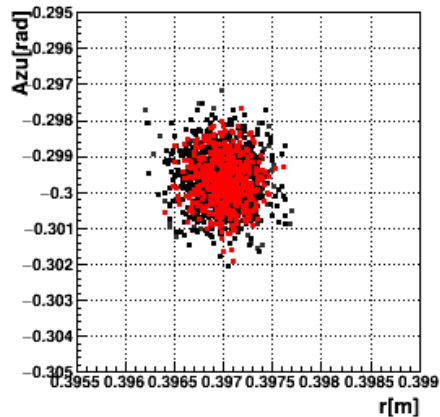
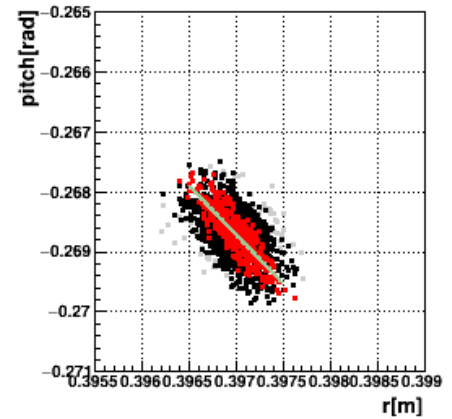
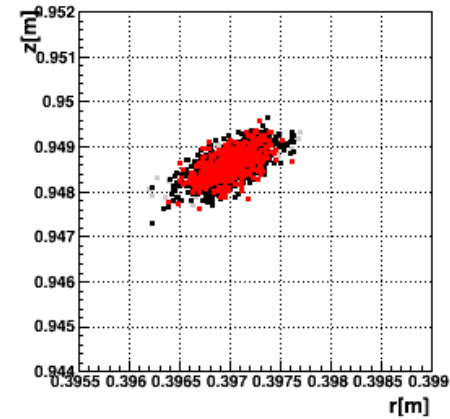
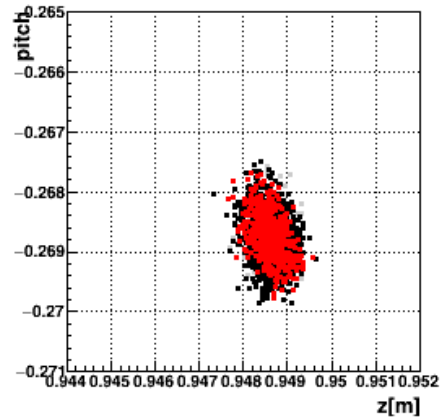


Trajectories' parameters:

$x, y, z, p_x, p_y, p_z$

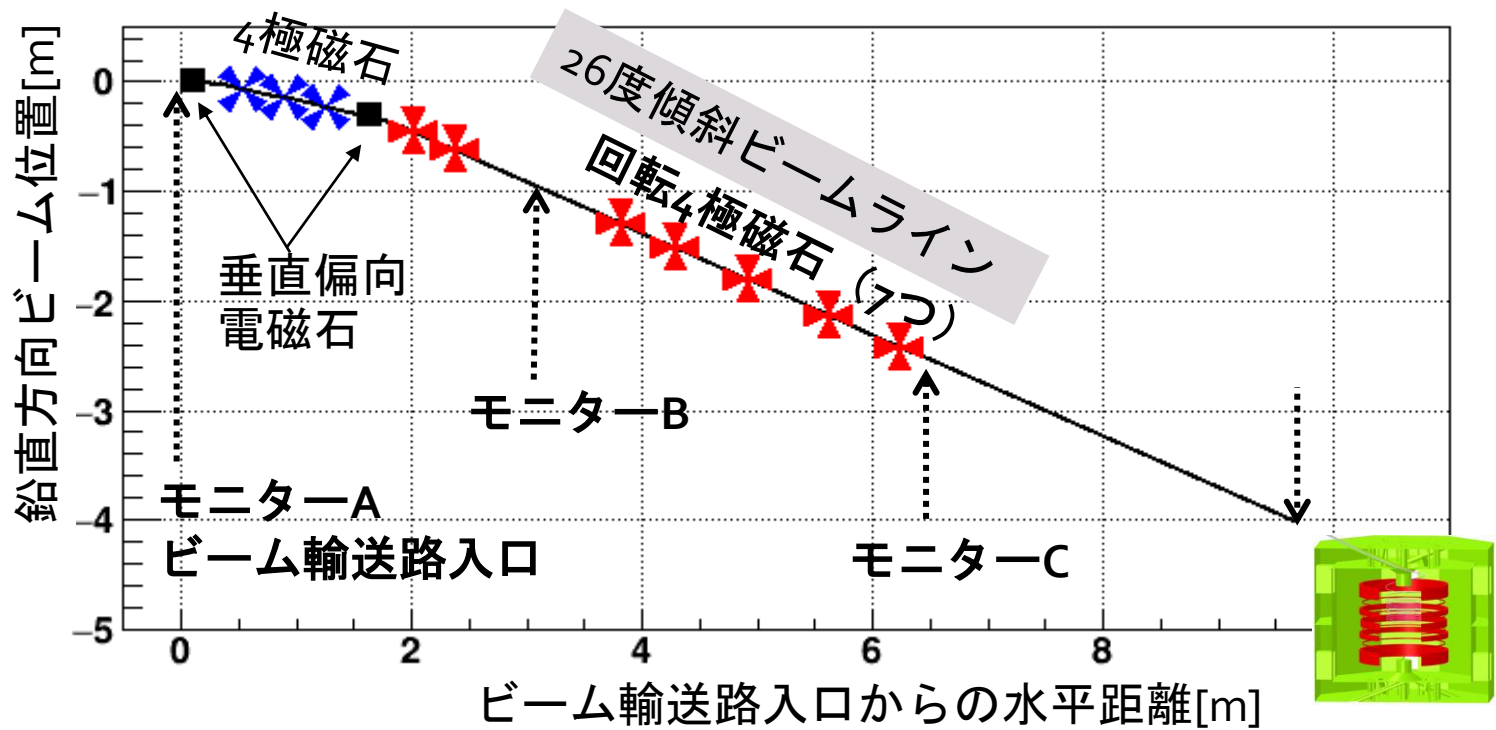
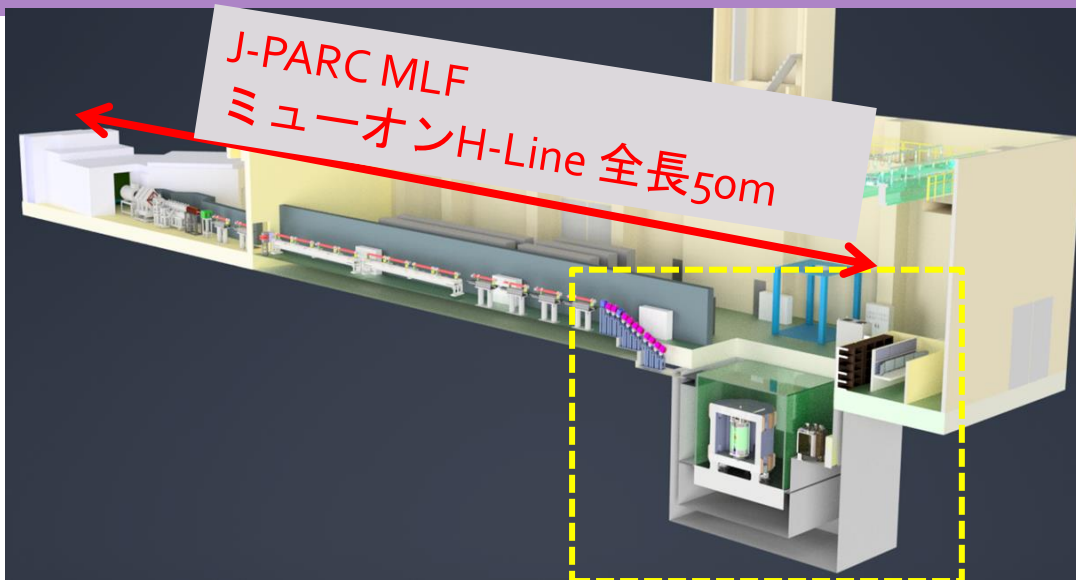
→ Axial symmetric

$r, z, \text{pitch}, \text{azimuthal}$



"r-pitch correlation" is related to BL distribution and key to control  $|z| < 3\text{cm}$  storage.

今後の課題です。



試作機

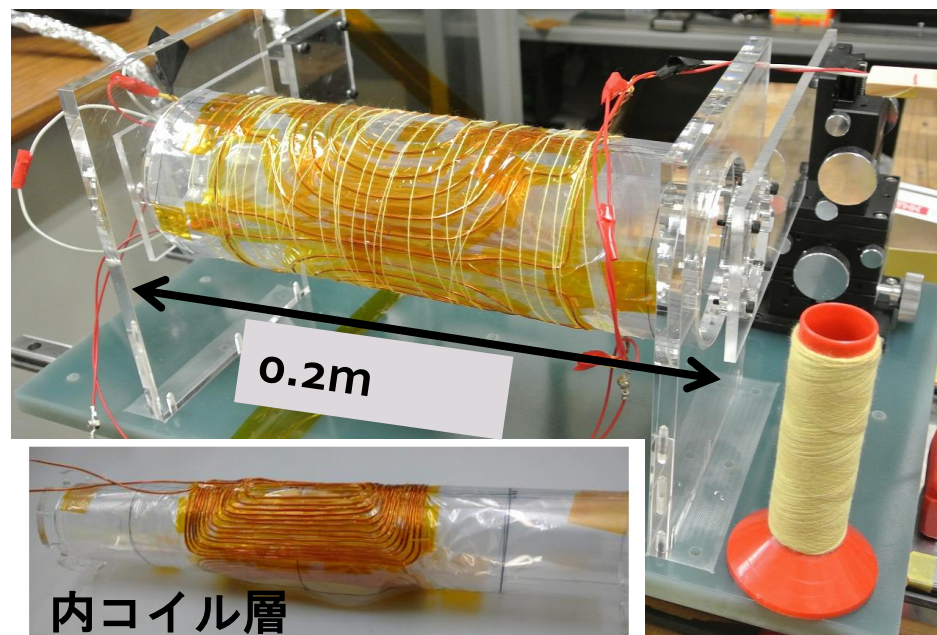
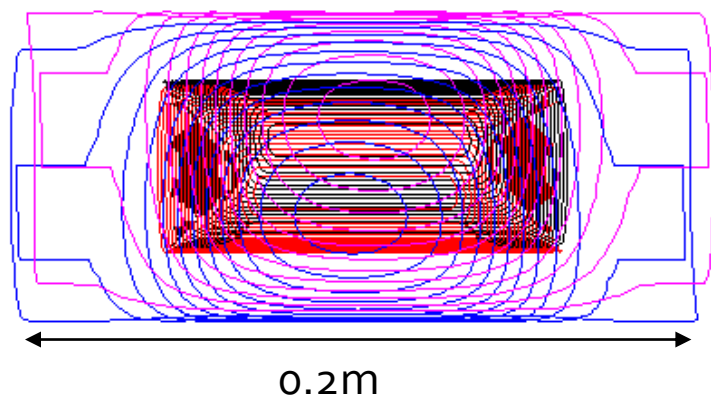


図 4.17 平面で巻いたコイルを治具に巻き付けたメインコイル