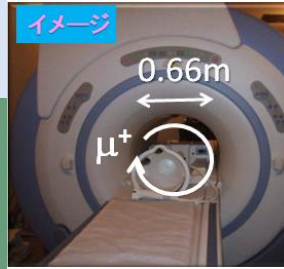
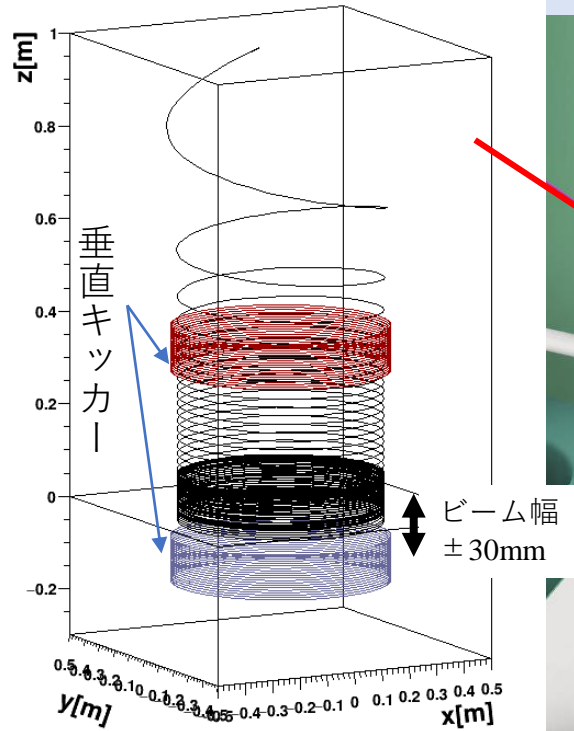
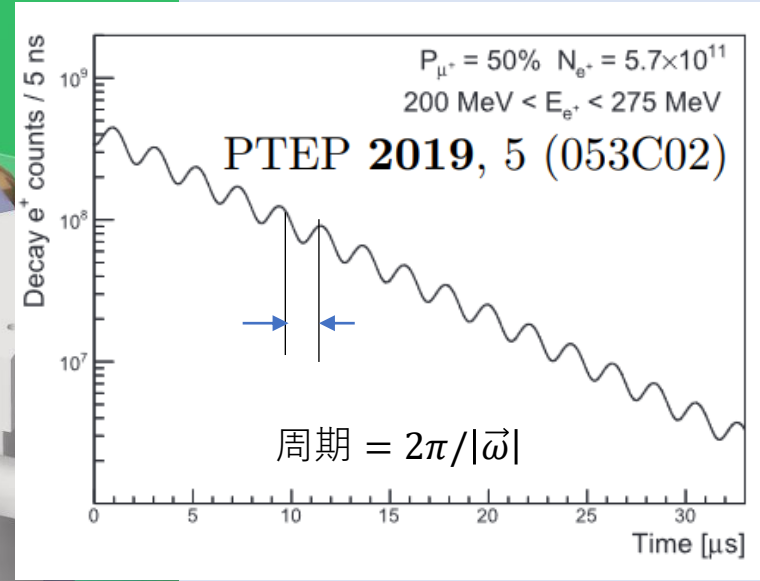
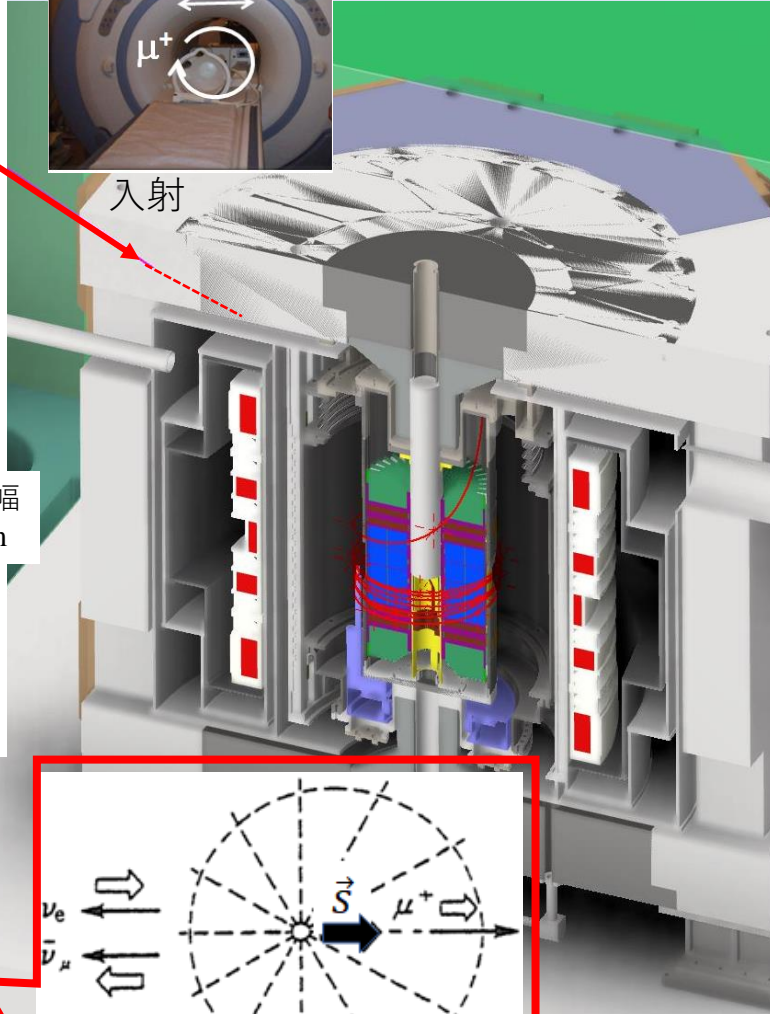


J-PARC muon g-2/EDM実験@MLF H-Line (2027年~)

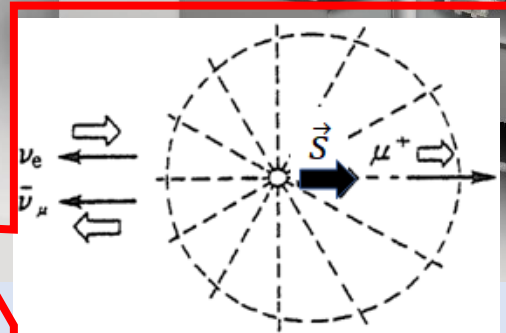
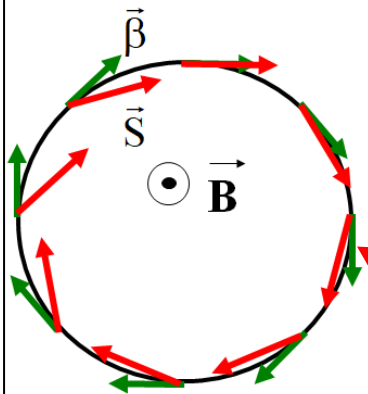
① 3次元螺旋ビーム入射



入射



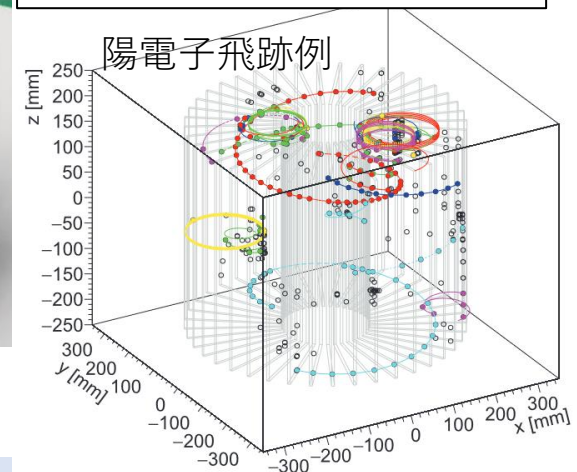
蓄積、歳差運動
② 軌道平面付近に



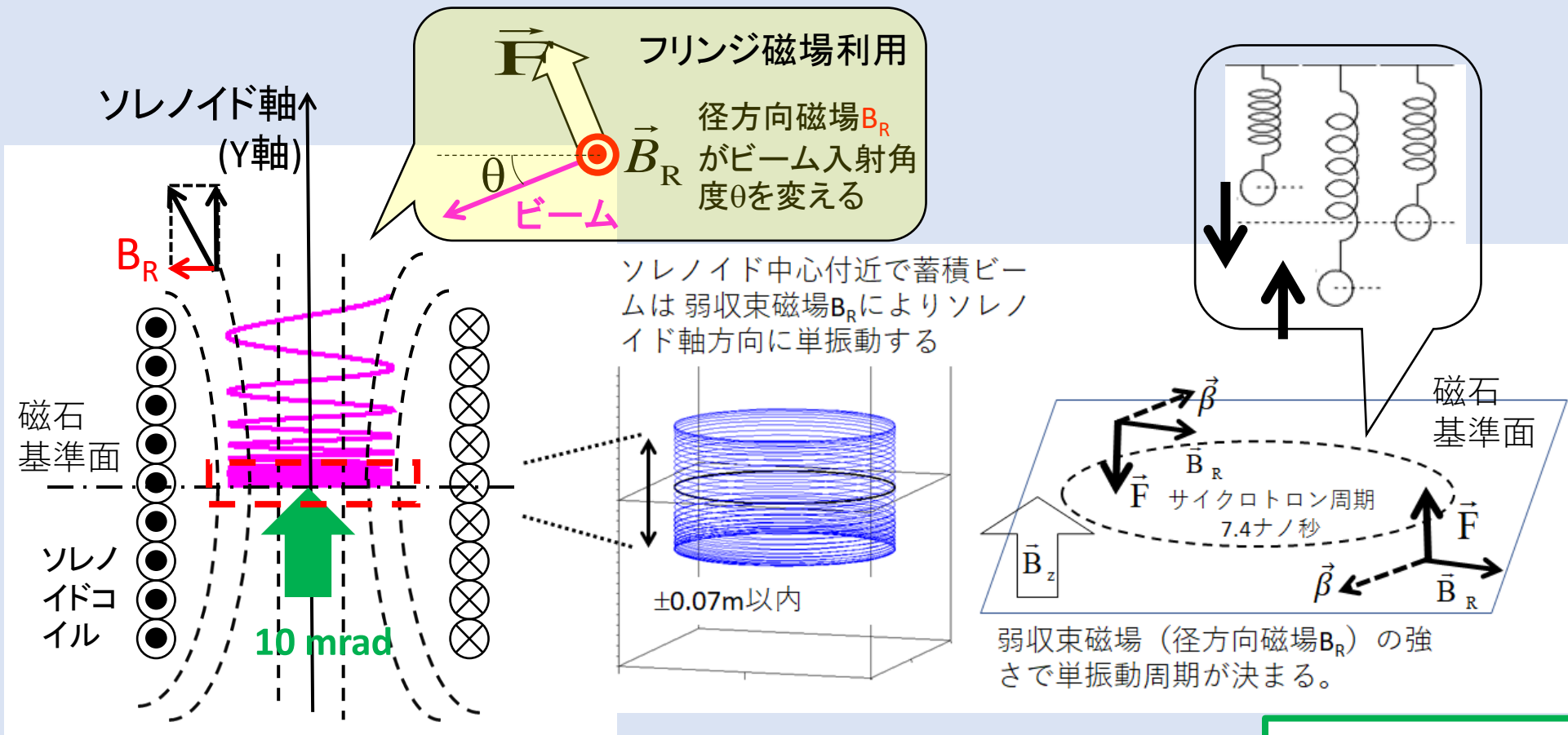
注: ミュオン静止系

弱崩壊陽電子は
スピン情報をもつ

③ 陽電子 3次元運動量同定



ソレノイド磁石1個で入射領域と蓄積領域を実現

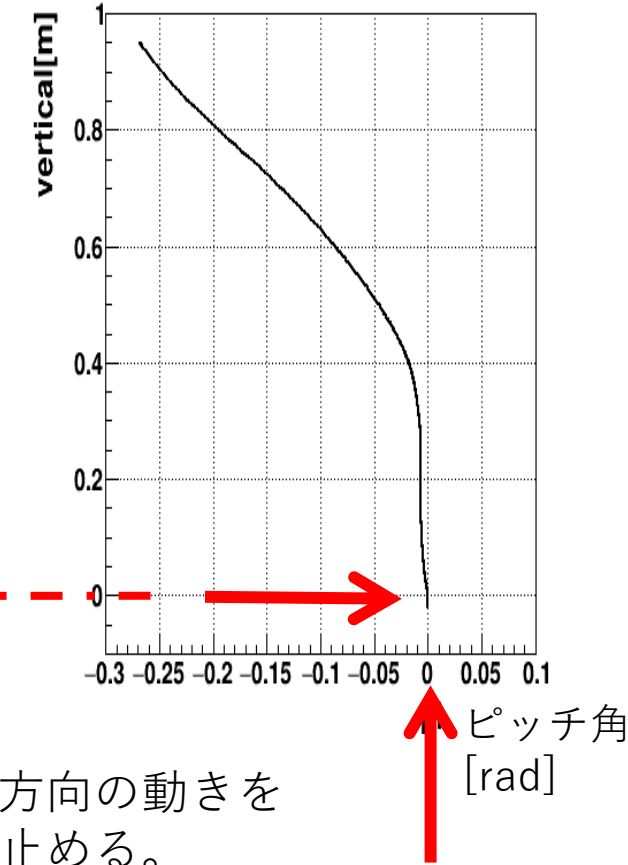
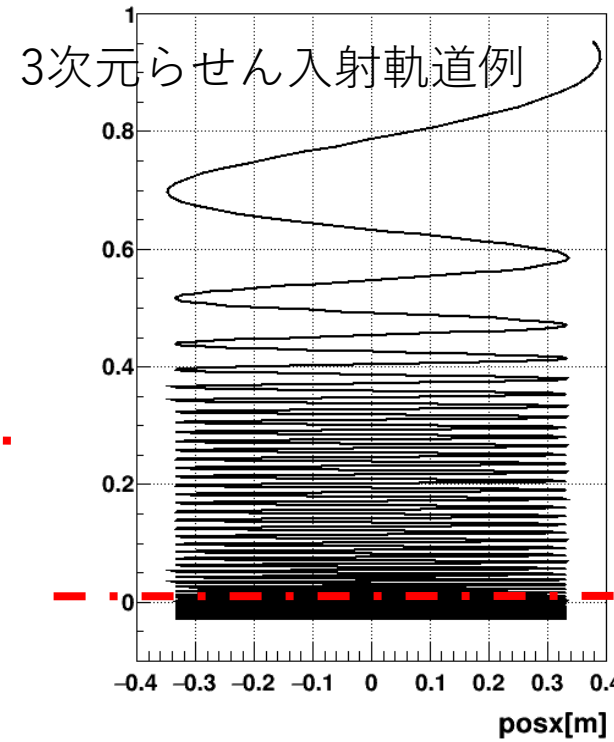
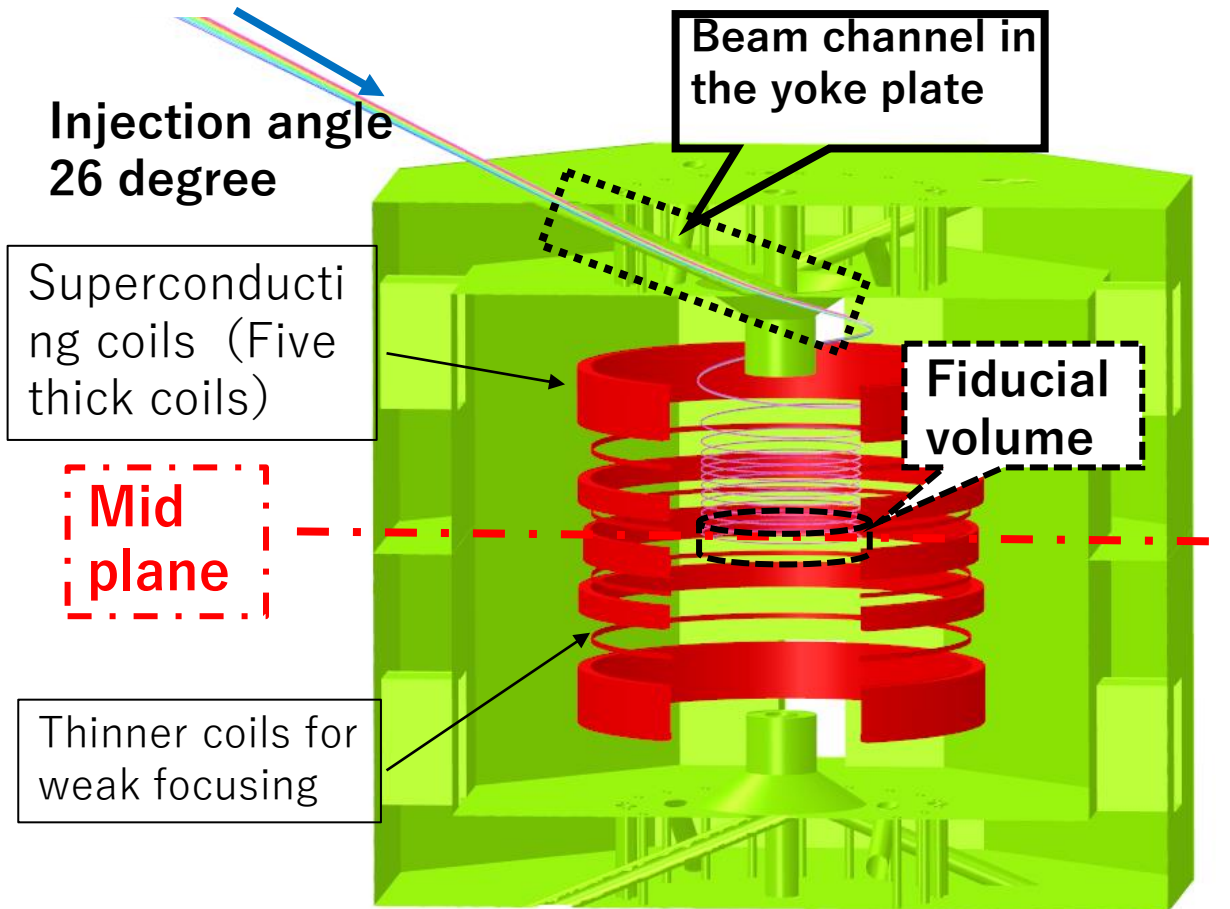


- ◆ 径方向FRINGE磁場 B_R の形状に合ったビーム成形 = **X-Y結合** が必須
- ◆ ソレノイド軸方向のビーム運動を制御する垂直キック (径方向パルス磁場)

蓄積領域内では磁場中のローレンツ力のみでビーム軌道を制御する。磁石基準面と、ビームの軌道平面を一致させる。

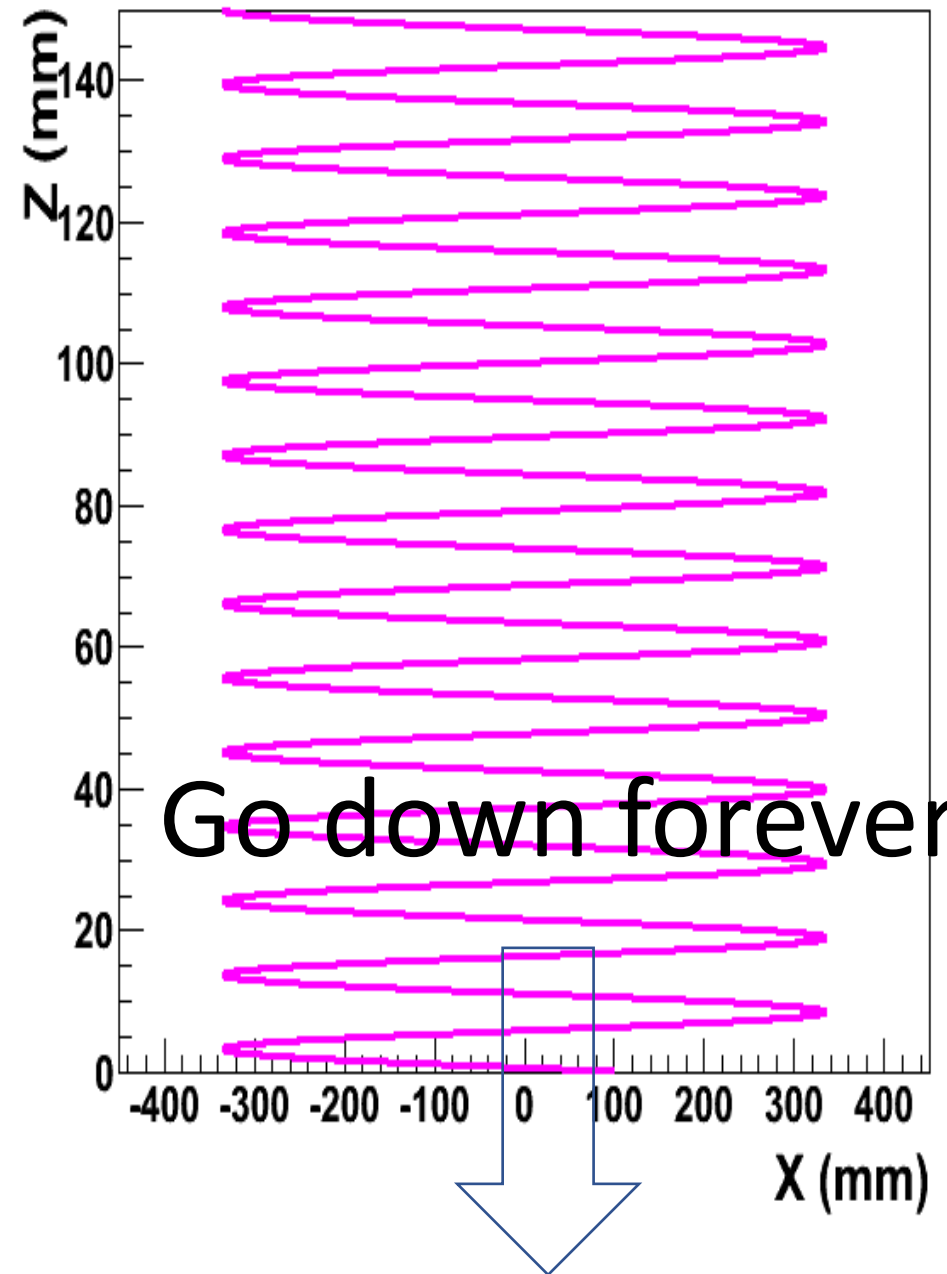
J-PARC muon g-2/EDM実験における 3次元らせん入射用の実機キッカー装置設計

飯沼裕美^A, 阿部充^B, 佐々木憲一^B, 高柳智弘^C, 徳地明^D, 中山久義^B, 三部勉^B
 茨大理工^A, KEK^B, 原子力機構^C, PPJ^D



垂直キック：垂直方向の動きを
中心面でピタっと止める。

ピッチ角をソレノイド磁石中心平面(z=0)でゼロにするには？...



$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad \vec{F} = m_{\mu} \vec{a}$$

$$a_z = \frac{q}{m_{\mu}} v_L B_R$$

簡単のために、一様な径方向磁場 $B_R = \text{const}$ を想定し、 $B_R L$ 積の当たりを付ける。ただし、 L はビームの飛行距離

$$v_z = \frac{q}{m} v_L B_R \int dt = \frac{q}{m} v_L B_R t = \frac{q}{m} B_R L$$

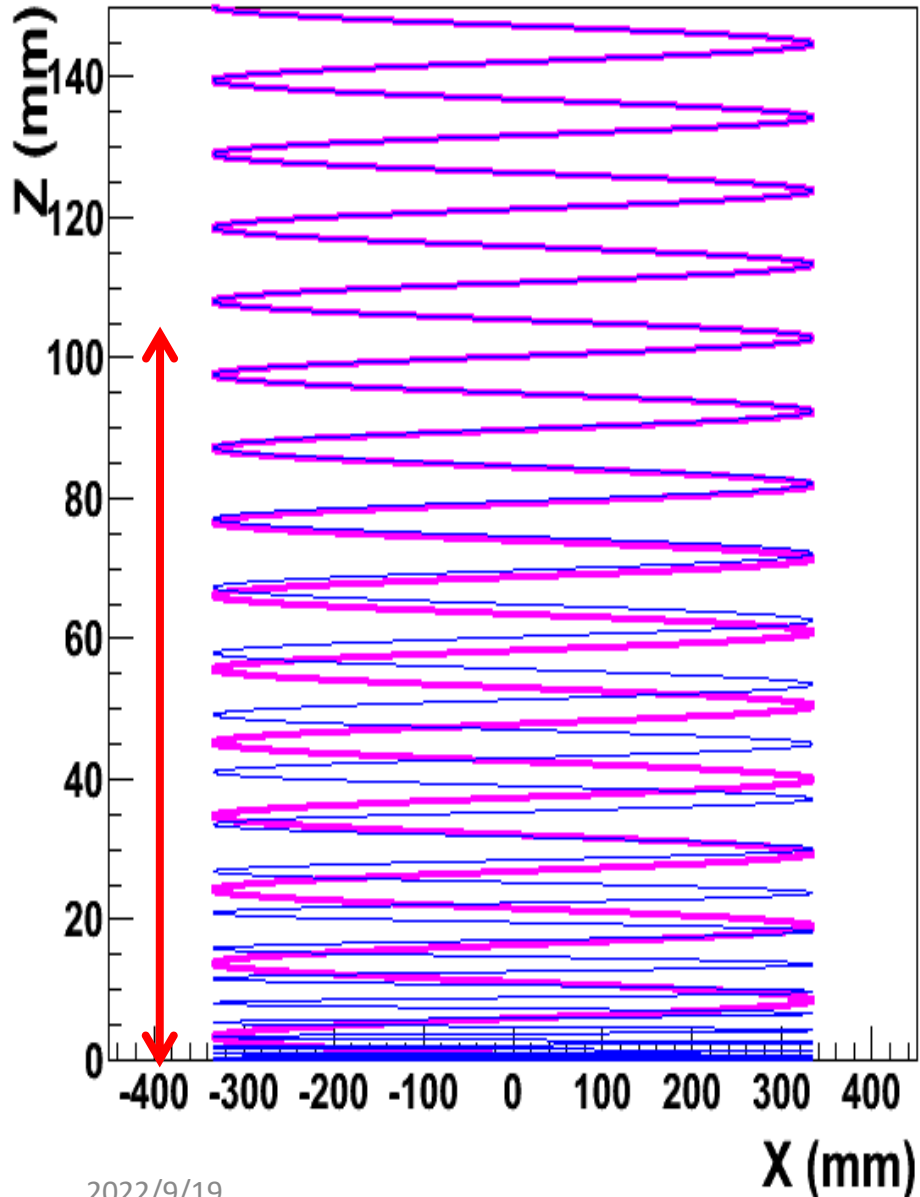
$$L = v_L \int dt = v_L t,$$

$$B_R L = \frac{q}{m} v_{z0}$$

$p=300\text{MeV}/c$
初期Pitch角 = -0.27 rad

径方向磁場の $B_R L$ 積を見積もることができて、左の例だと $B_R L = -0.2669 [\text{T}\cdot\text{m}]$

ピッチ角をソレノイド磁石中心平面(z=0)でゼロにするには？...



$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad \vec{F} = m_\mu \vec{a}$$

$$a_z = \frac{q}{m_\mu} v_L B_R$$

簡単のために、一様な径方向磁場
 $B_R = \text{const}$
 を想定し、 $B_R L$ 積の当たりを付ける。
 ただし、 L はビームの飛行距離

$$v_z = \frac{q}{m} v_L B_R \int dt = \frac{q}{m} v_L B_R t = \frac{q}{m} B_R L$$

$$L = v_L \int dt = v_L t,$$

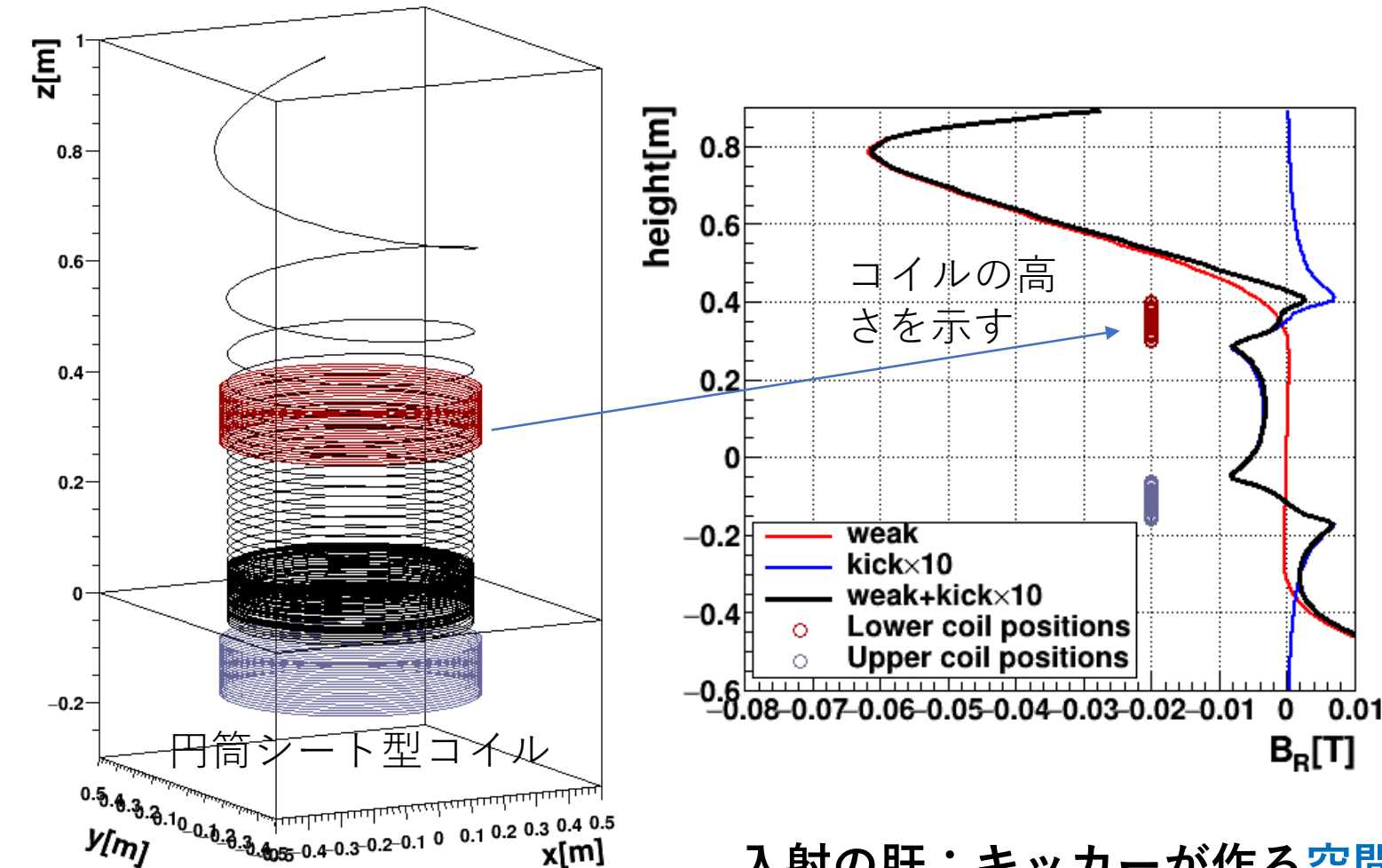
$$B_R L = \frac{q}{m} v_{z0}$$

$p=300\text{MeV}/c$
 初期Pitch角 = -0.27 rad

径方向磁場の $B_R L$ 積を見積も
 ることができ、左の例だと
 $B_R L = -0.2669[\text{T}\cdot\text{m}]$

1.キッカーに適した磁場：軸対称パルス磁場

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。



$$\times \text{halfsin} \frac{2\pi}{T_{kick}} (t - t_0)$$

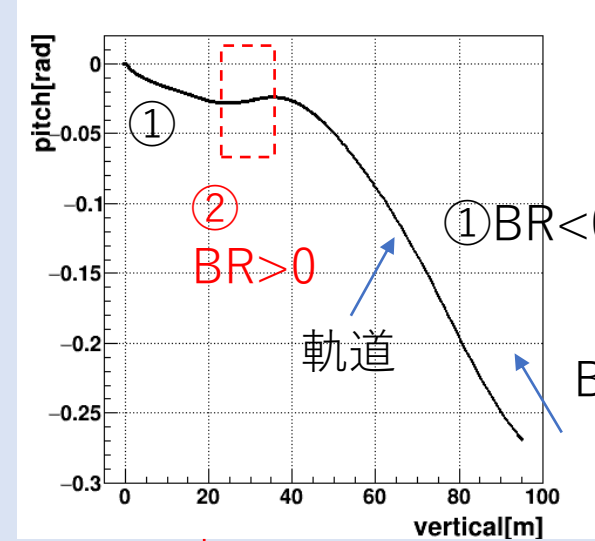
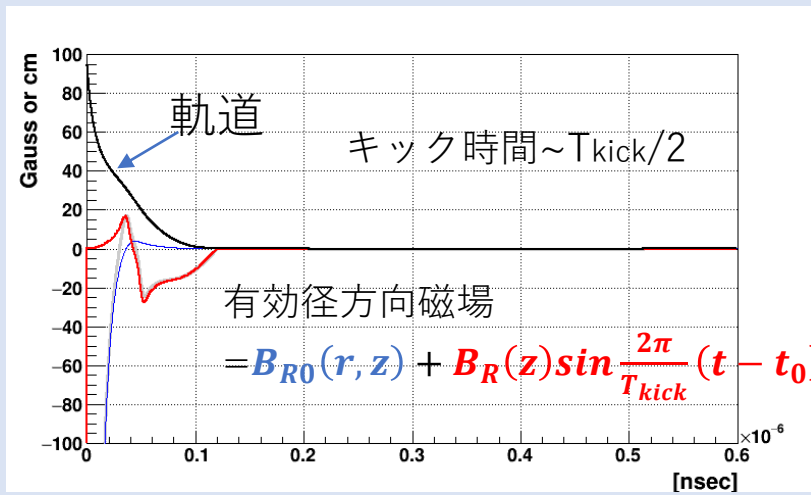
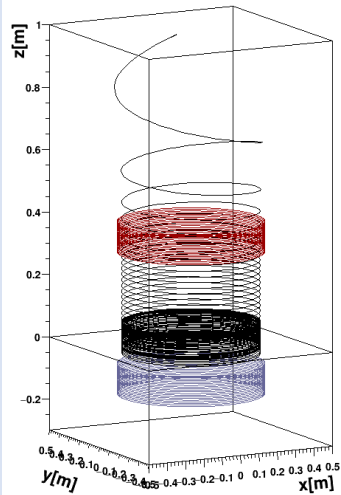
有効径方向磁場

$$= B_{R0}(r, z) + B_R(z) \sin \frac{2\pi}{T_{kick}} (t - t_0)$$

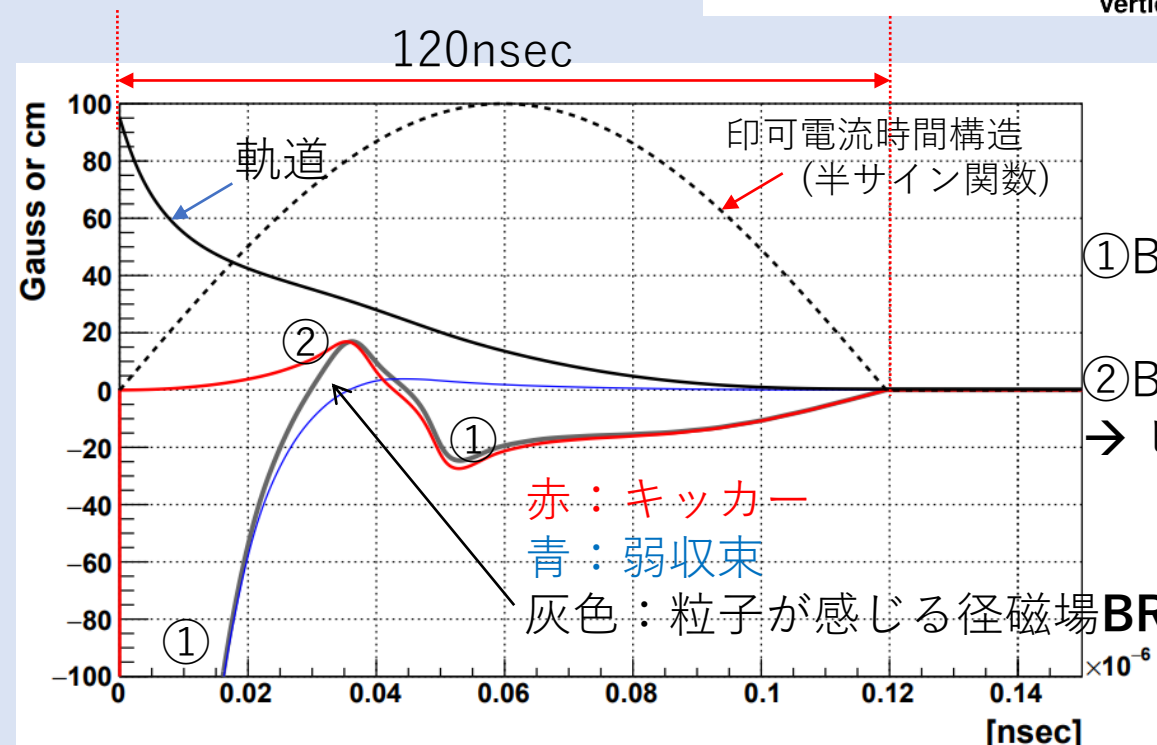
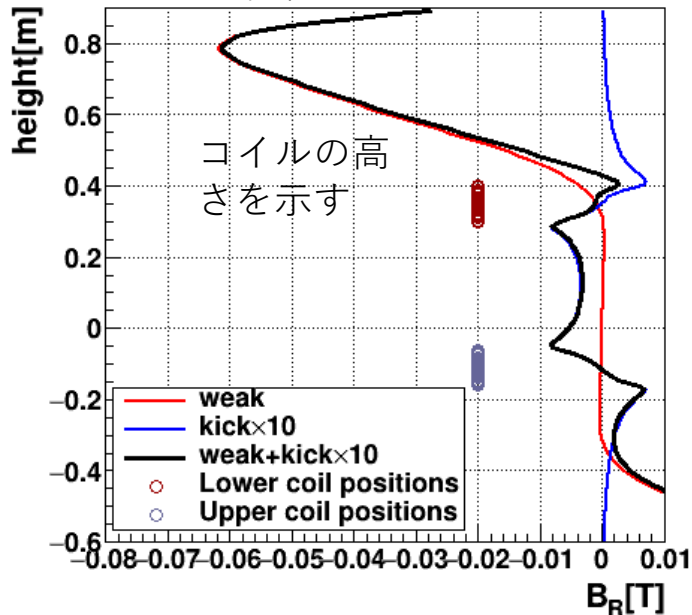
コイル半径 = 35cm (軌道33.3cm)

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 **-0.2669[T.m]**程度にすればよい。

キッカーは軸対称径方向パルス磁場



コイル半径 = 35cm (軌道33.3cm)
円筒シート型コイル



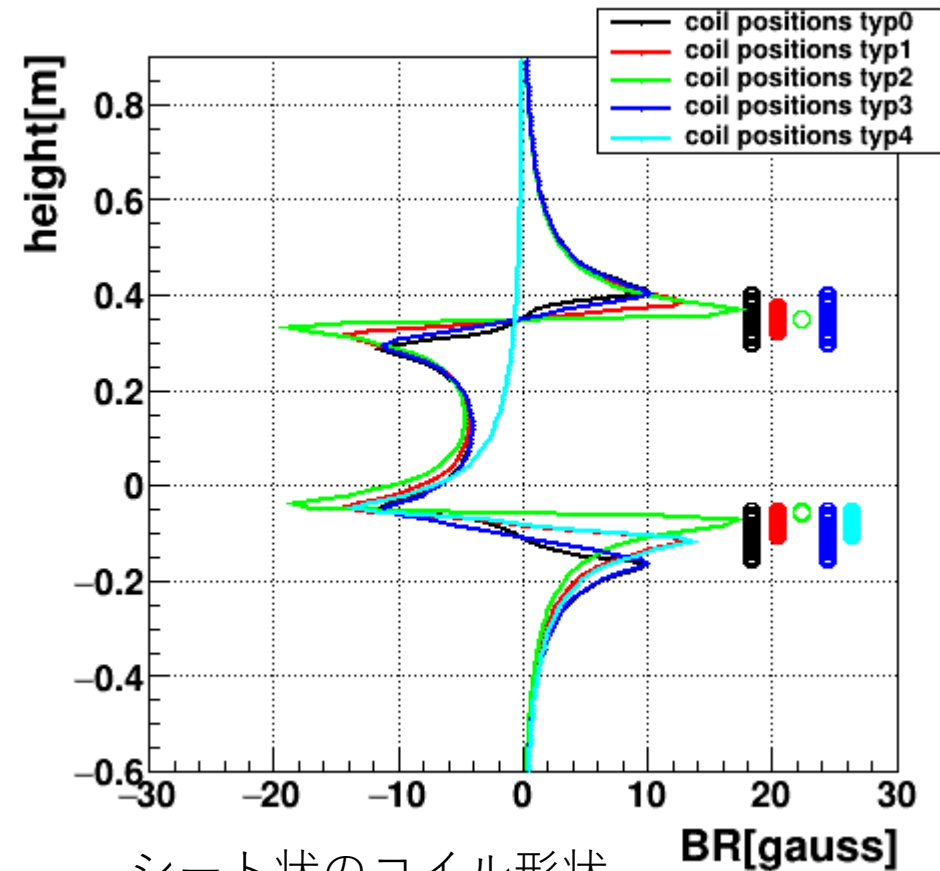
- ① BR < 0 入射角をゼロに。
- ② BR > 0 入射角を負に大きく
→ ビーム鉛直成分を収束の効果

赤：キッカー
青：弱収束
灰色：粒子が感じる径磁場 BR

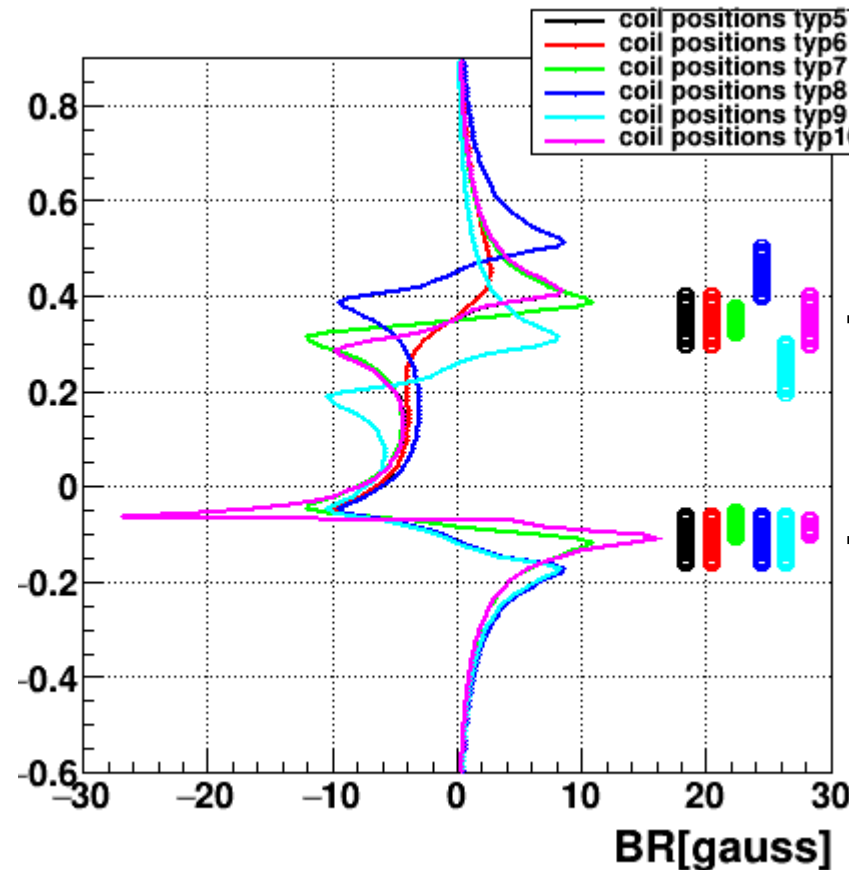
2.11通りのキッカーコイル形状と $B_R(z)$, T_{kick} のバランスを見る。

$$B_R(z) \sin \frac{2\pi}{T_{kick}} (t - t_0) = I_0 \sin \frac{2\pi}{T_{kick}} (t - t_0)$$

上下のコイル間隔Dが短い
 ➤ 短い T_{kick}
 ➤ 大きい $B_R(z)$
 が必要となり、
 短い時間に大電流を流す電
 源が必要。(実現性?)



- シート状のコイル形状
- $B_R(z)$ 分布を平滑化 (緑と青を比較)
 - シートの方がコイルインダクタンス小

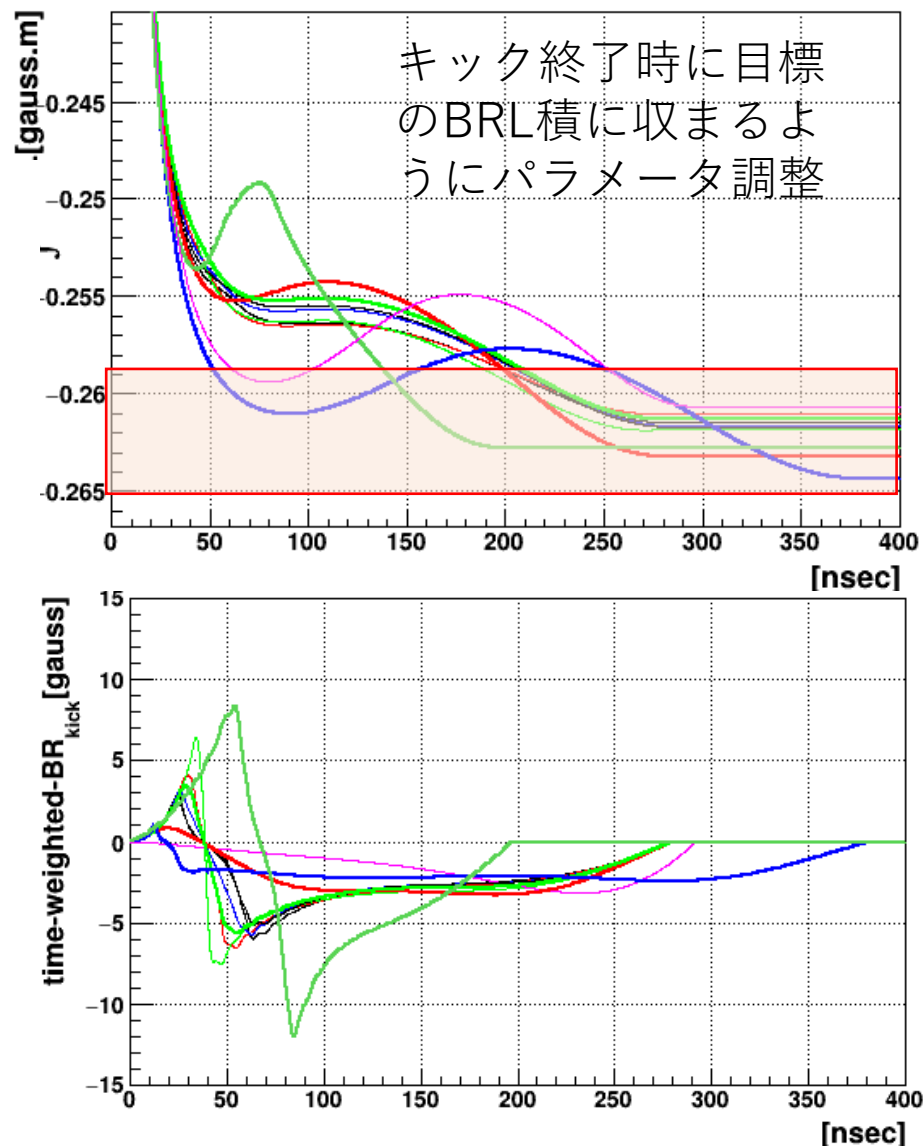
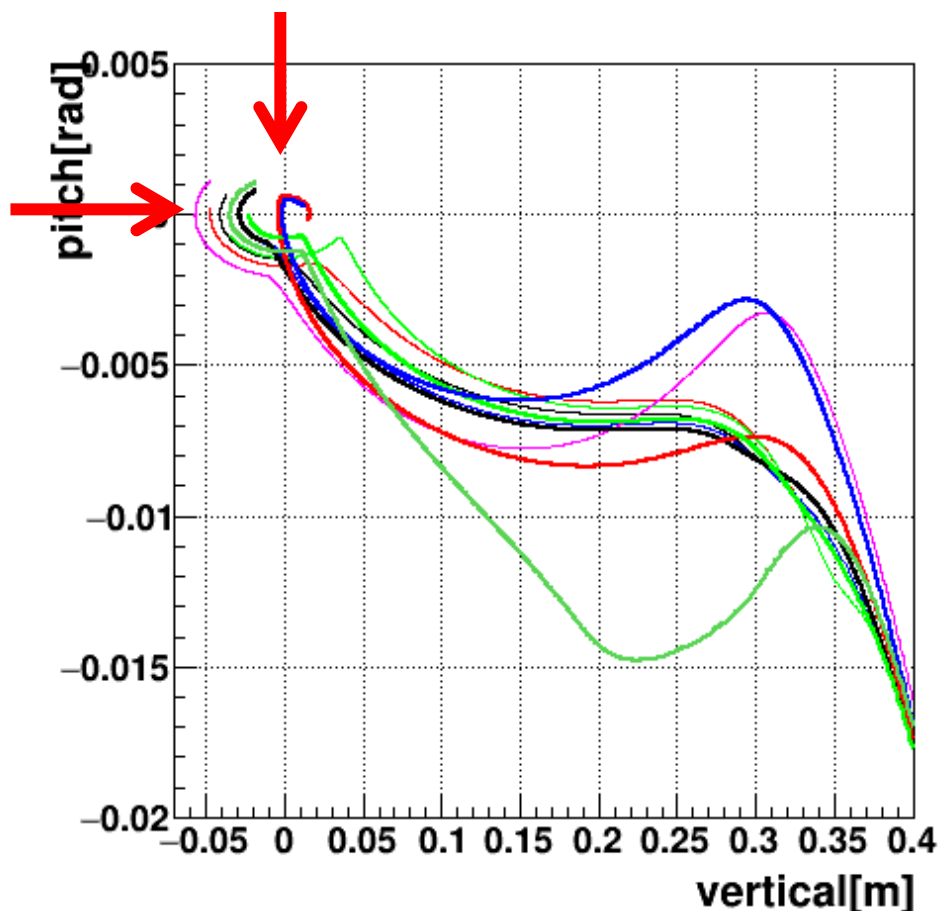


11通りのキッカーコイル
 形状に対し、 $B_R L$ 積が
 $-0.2669 [T \cdot m]$ 程度なるよ
 うに、 T_{kick} と t_0 とピーク
 電流値 I_0 を調整し、軌道計
 算を行った。

3.11通りのキッカー候補で中心軌道进行评估

$I=500\text{A} \times 0.6$, ($< 800\text{A} \times 0.8$ 電源スペックより小さく、電圧を10kV未満にできるか?)

キック終了時に、ピッチ角、垂直位置を同時にゼロに近づくように解を算出する。

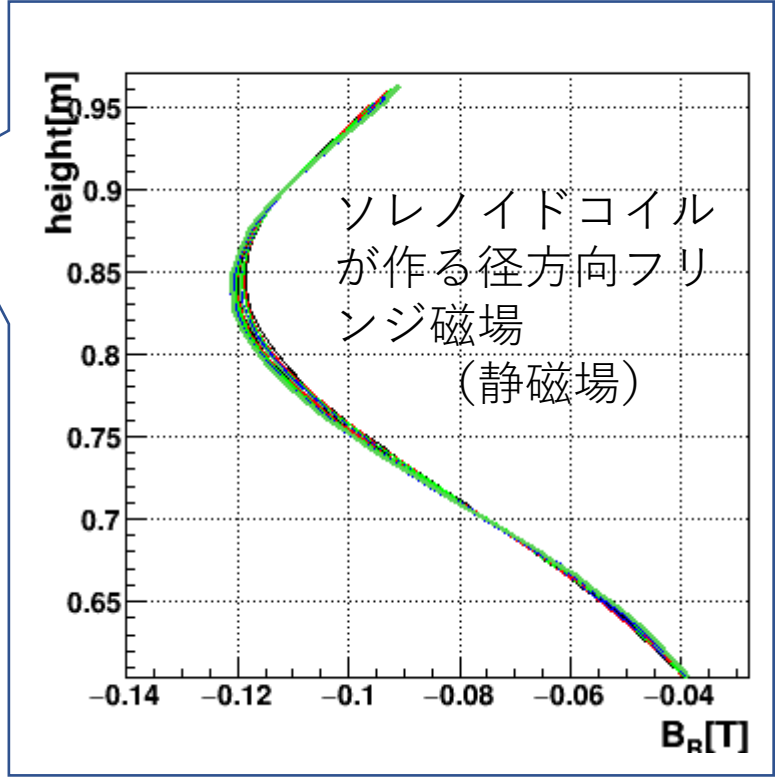
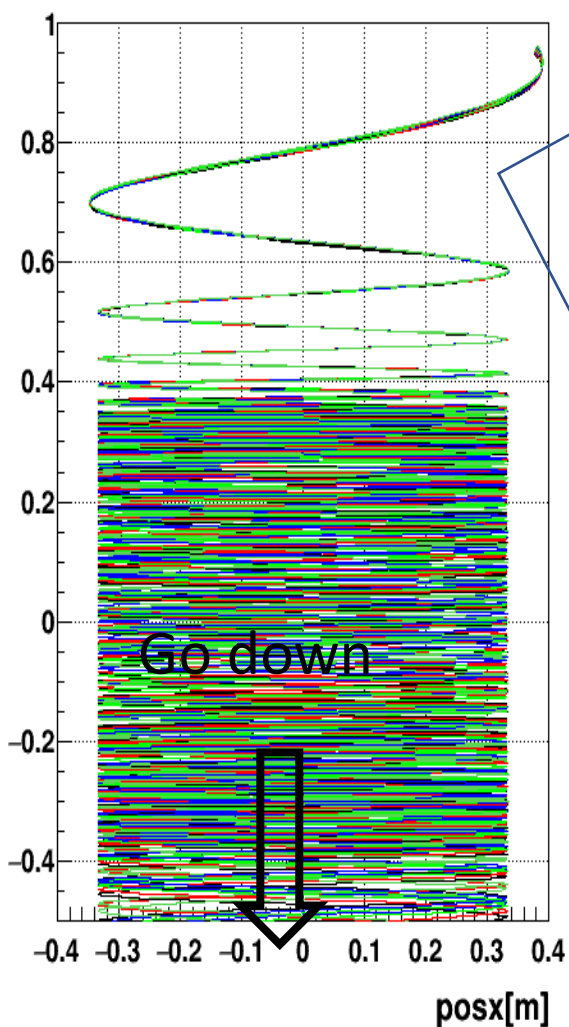


	$T_{\text{kick}}/2$	I_0	L
0	300	200	2.08
1	300	200	2.66
2	300	200	5.11
3	300	200	2.14
4	300	365	1.04
5	300	200	2.12
6	300	235	2.14
7	300	200	2.71
8	387	212.5	2.19
9	277.5	335	2.00
10	297.5	195	2.14
	nsec	A	μH

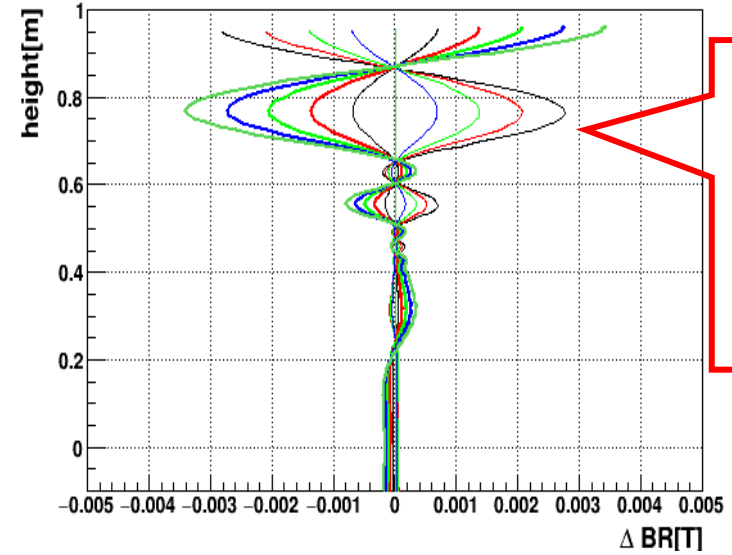
電源 2~10kVには収まる。
ただし、浮遊インダクタンス含まず。

4. 複数粒子（位相空間）を一度にキックするには？

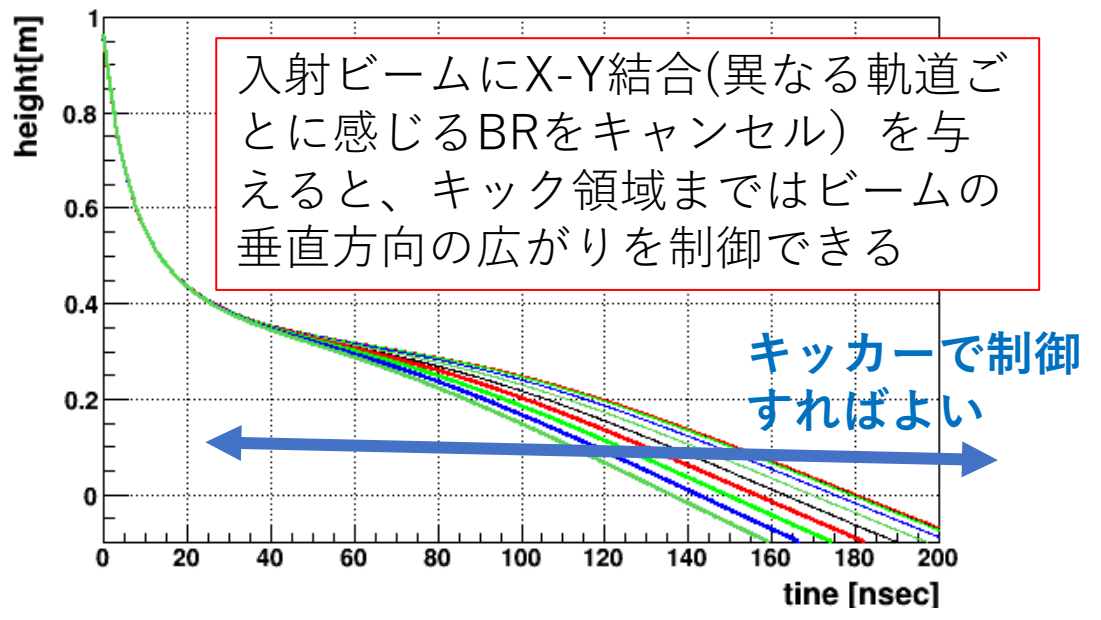
軸対称な磁場だが、ソレノイド磁場は径方向には分布をもつ。ビームの分布を、径方向の磁場分布の依存性を打ち消すように、成形する → X-Y結合をつくる。詳しくは[1],[2]



径方向に数ミリ、ずれた軌道を取るだけでソレノイドコイルが作る ΔBR は0~30ガウスになる。



基準軌道の周辺の数ミリずれた軌道が感じる磁場は最大30ガウスほど変わる。

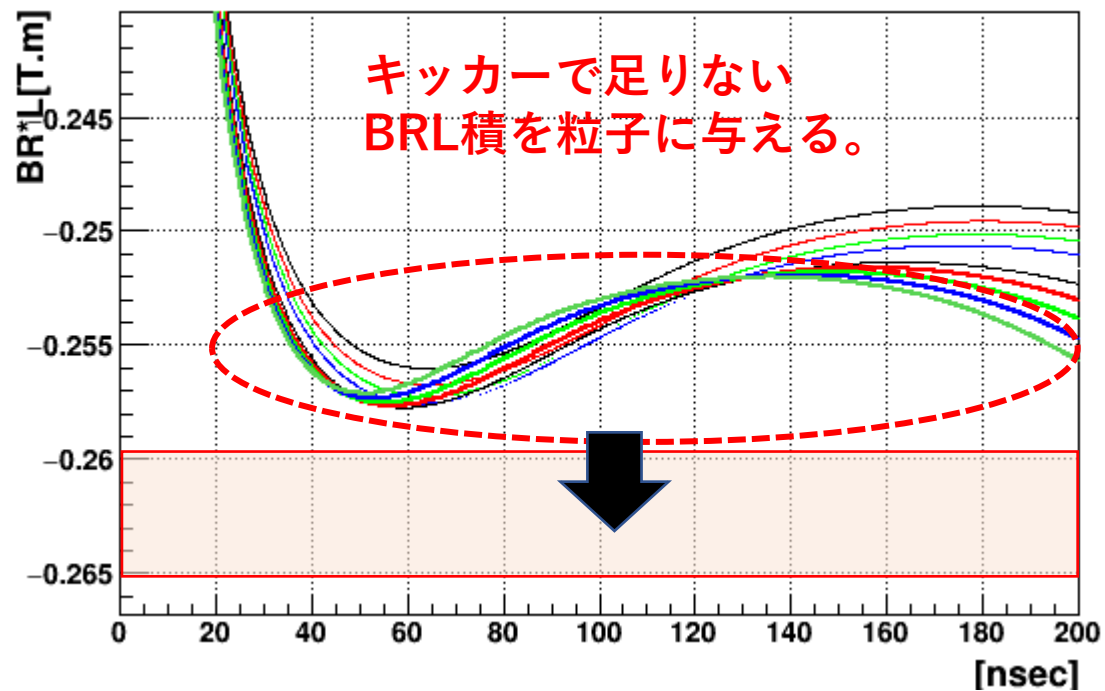
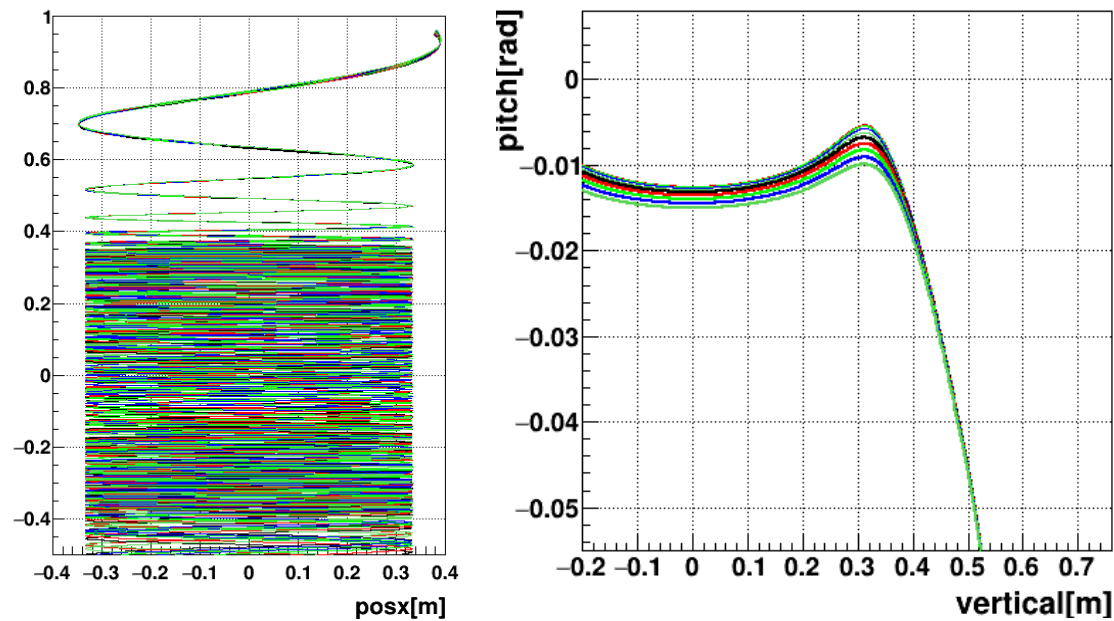


入射ビームにX-Y結合(異なる軌道ごとに感じるBRをキャンセル)を与えると、キック領域まではビームの垂直方向の広がりを制御できる

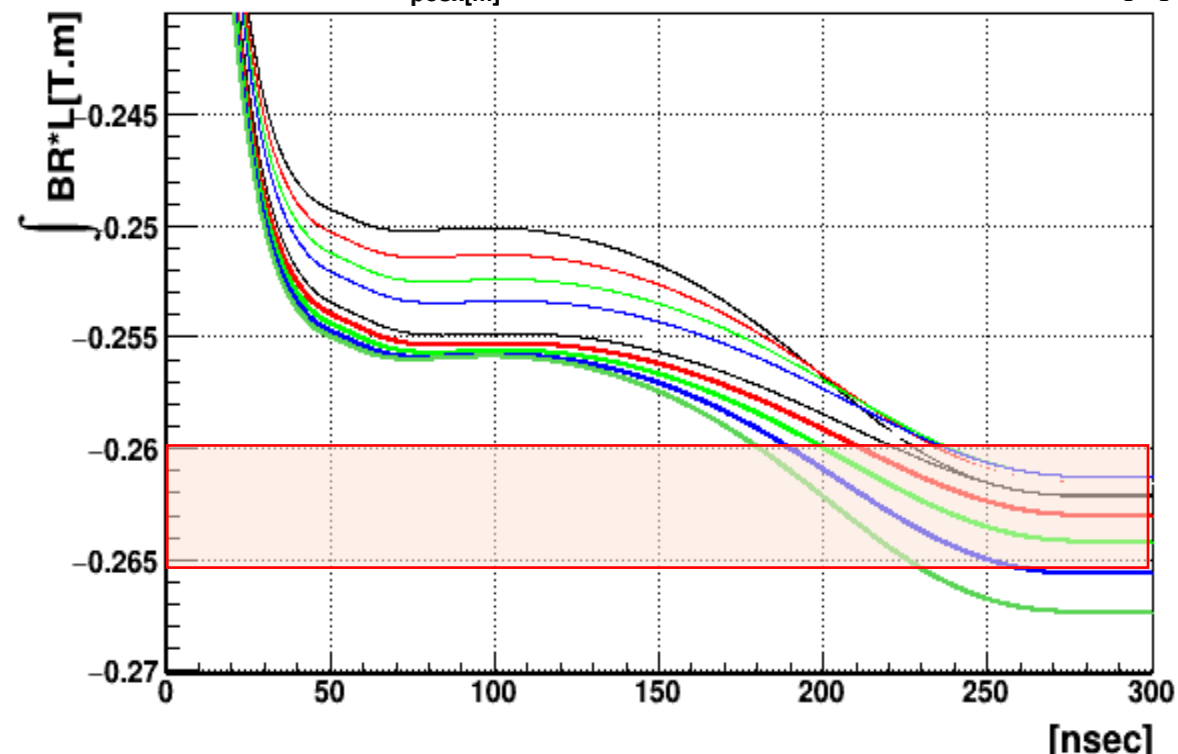
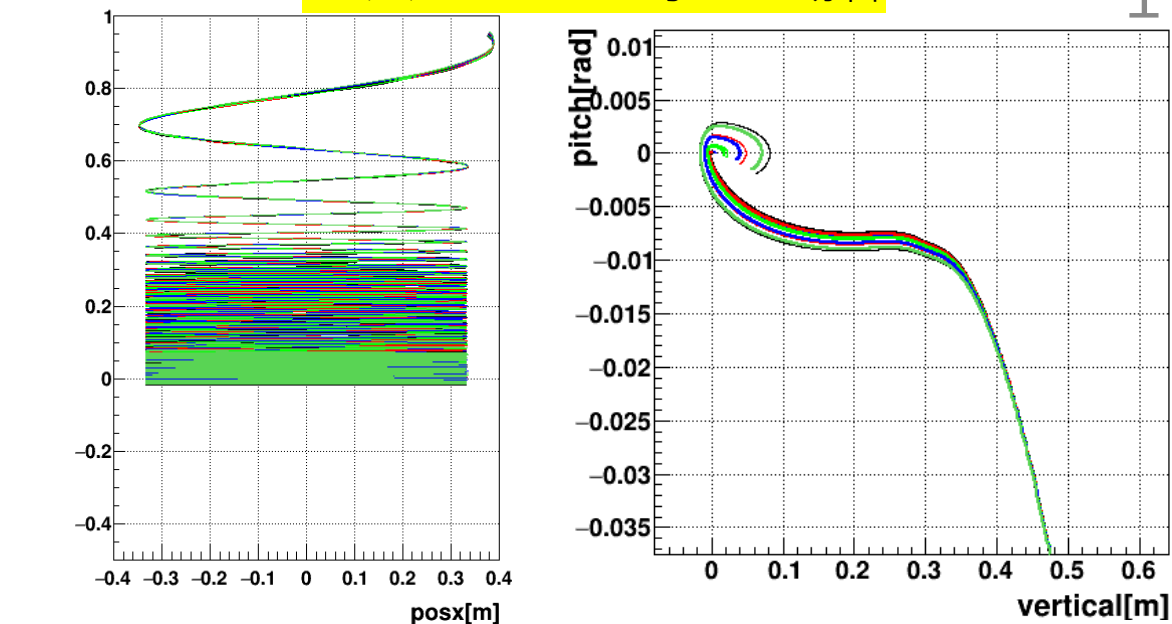
[1]H. Iinuma, et al., MT-27, "Design of a strong X-Y coupling beam transport line for J-PARC muon g-2/EDM experiment," IEEE Trans. Appl. Supercond., submitted for publication.

15aA124-13

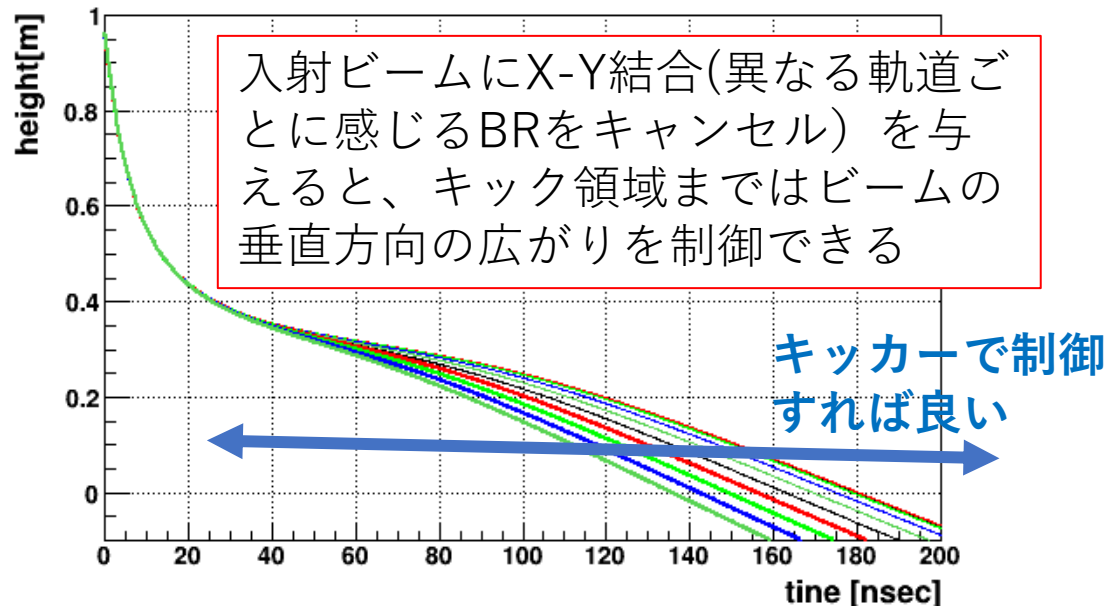
キック無し



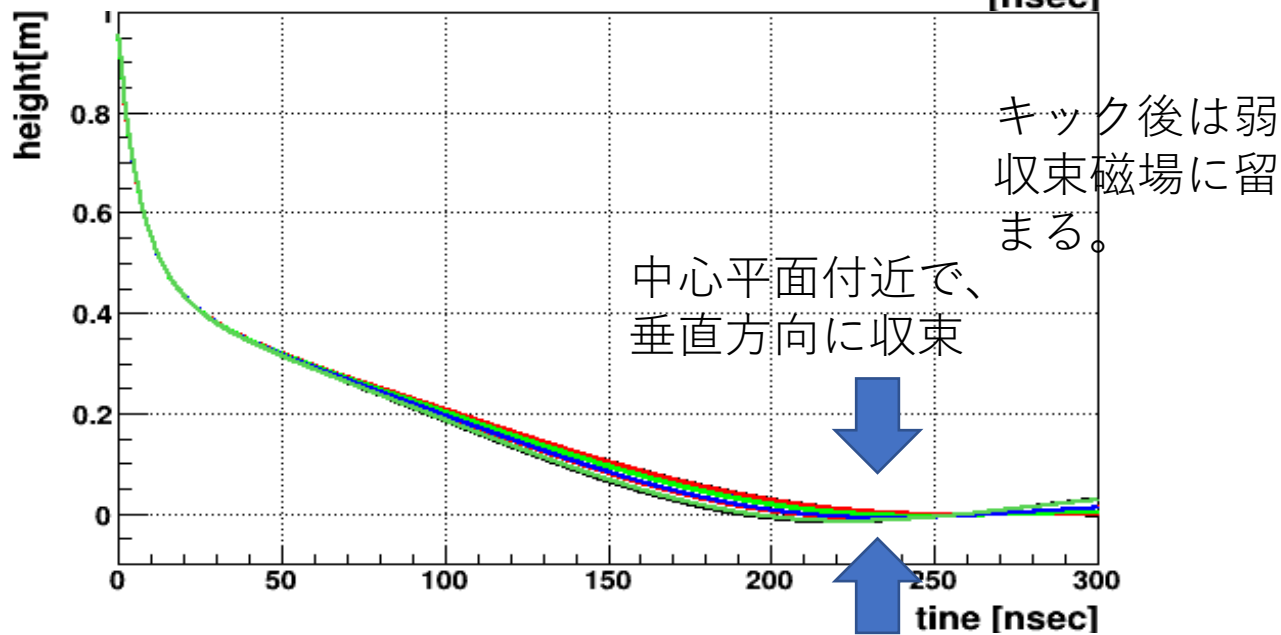
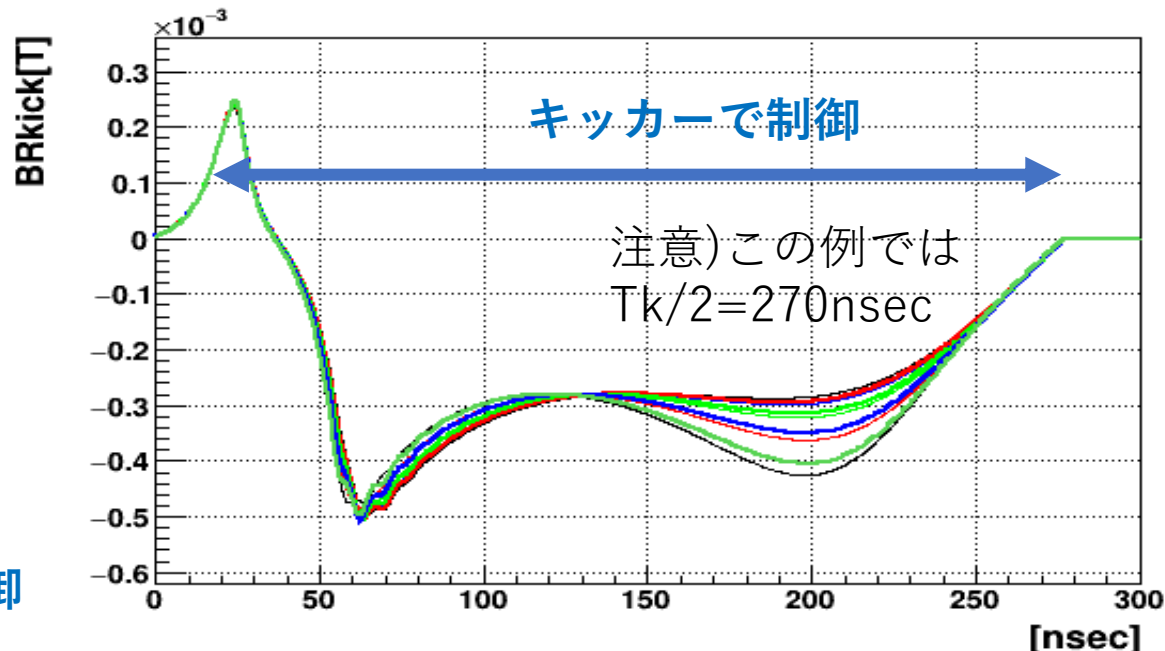
キック ID#5を与える場合



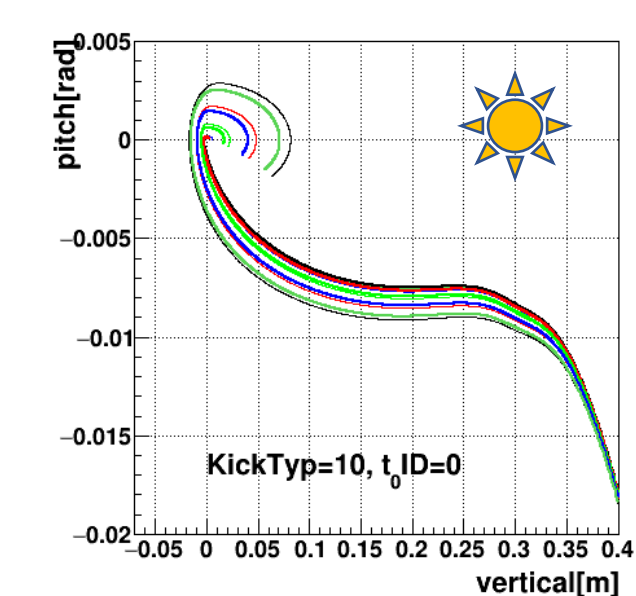
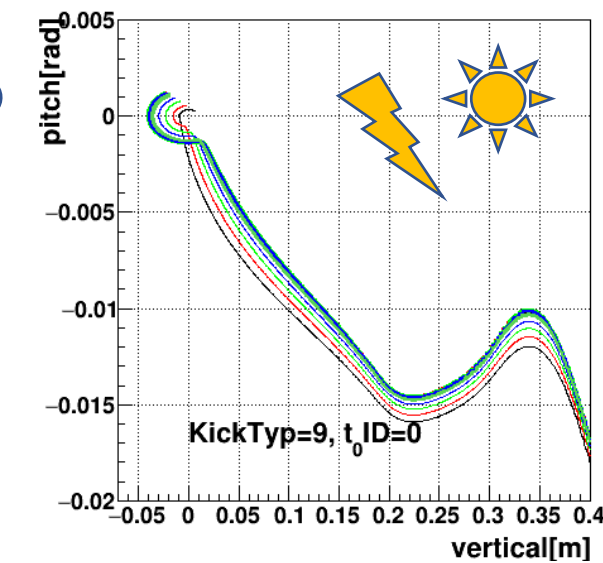
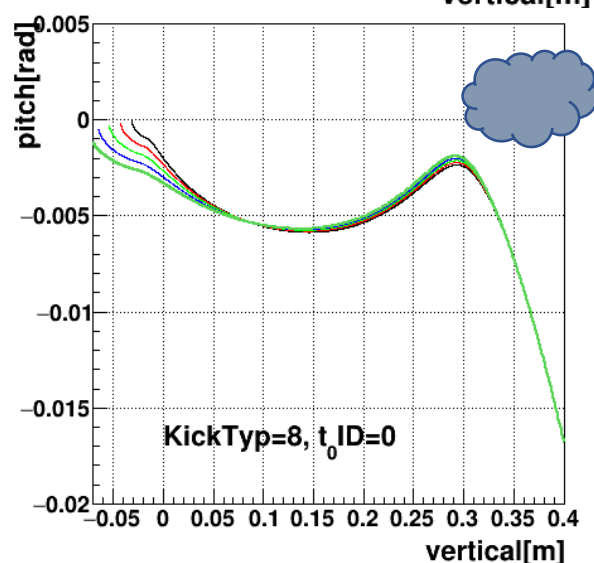
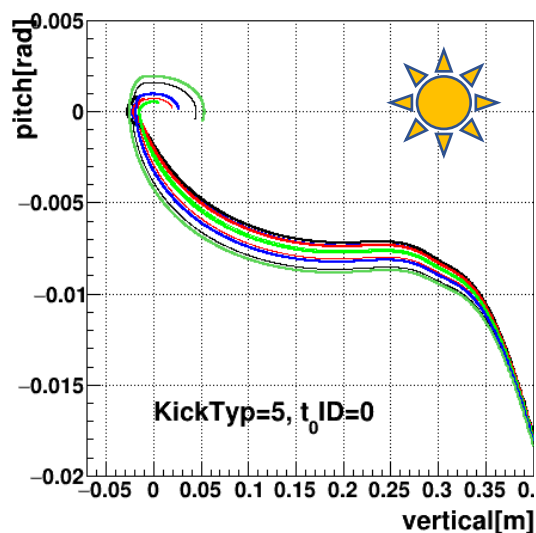
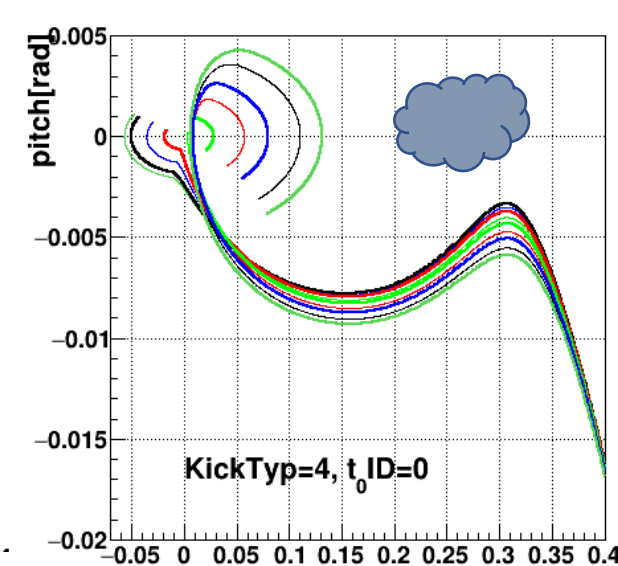
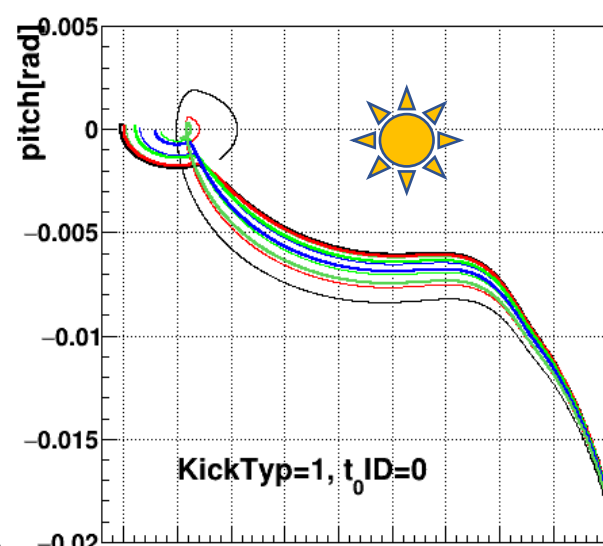
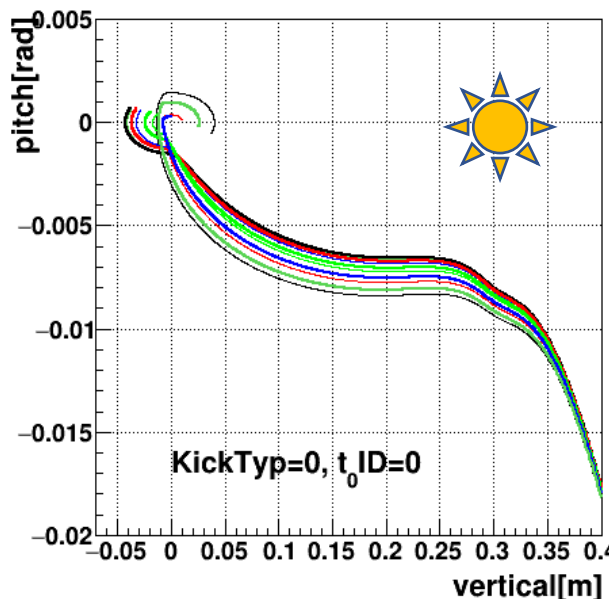
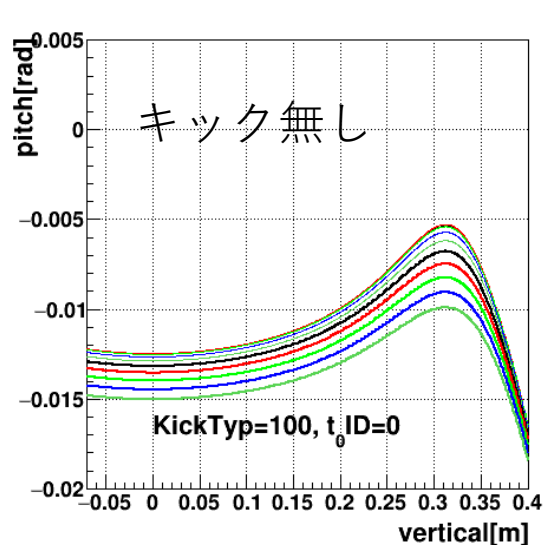
5.キッカー磁場の働き



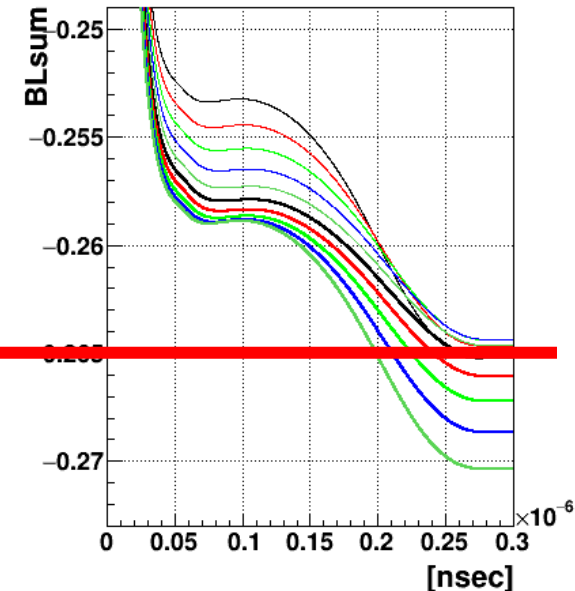
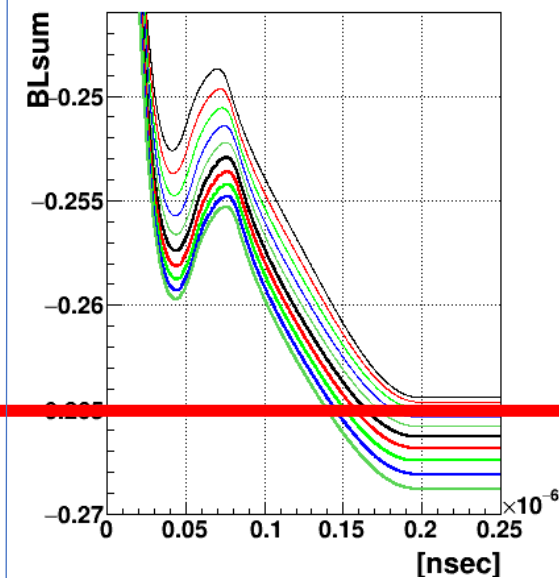
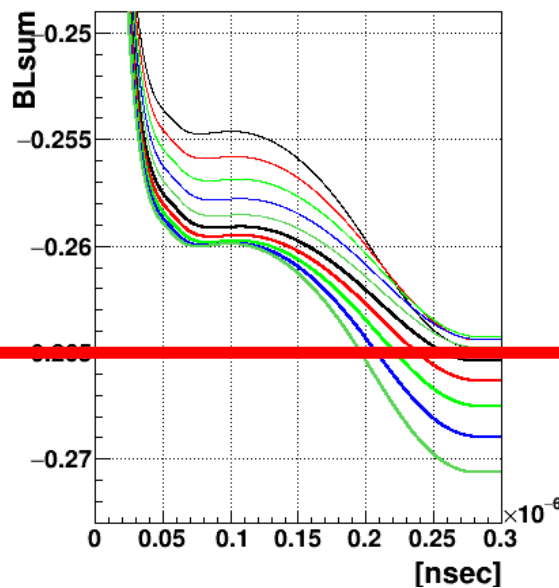
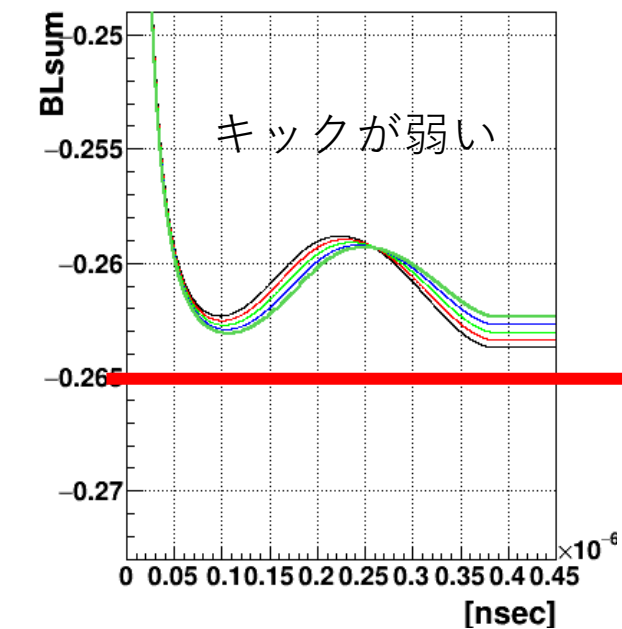
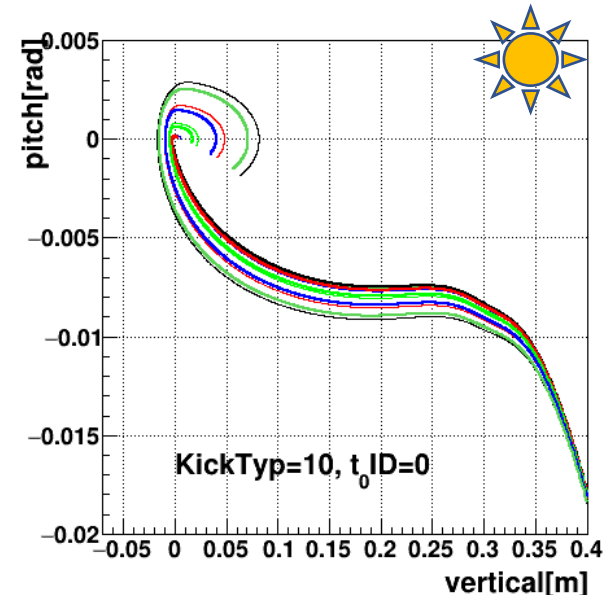
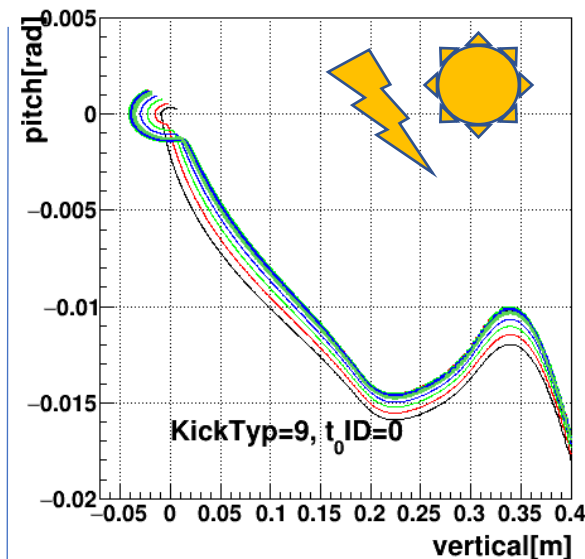
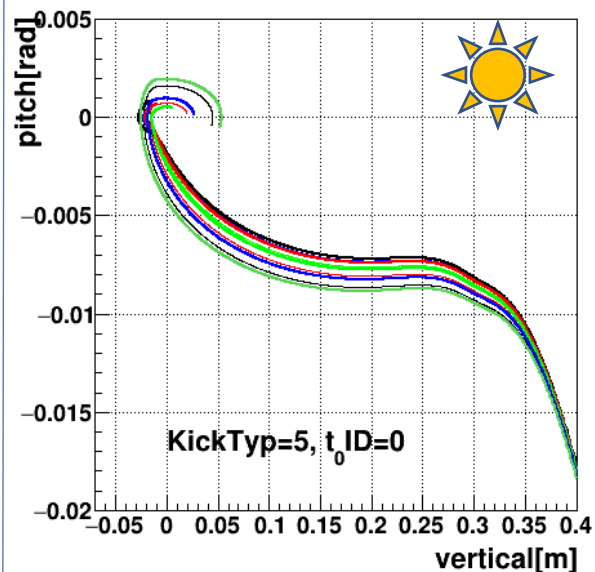
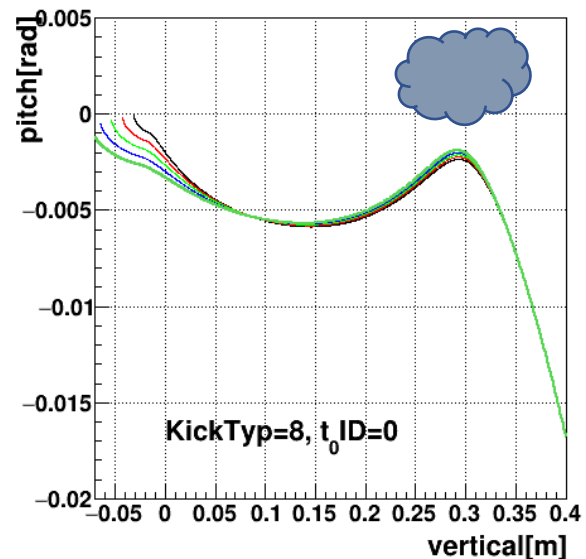
ビームの垂直方向の広がりが、キッカーコイルの作る磁場の空間分布をうまく組み合わせさせて、中心平面付近で、垂直方向に収束がかかるような働きをさせることができる。



6.キックパラメータ複数解ある。共通点は $B_R L$ 積



うまくキックできる場合の $B_R L$ 積の終着点は近い値

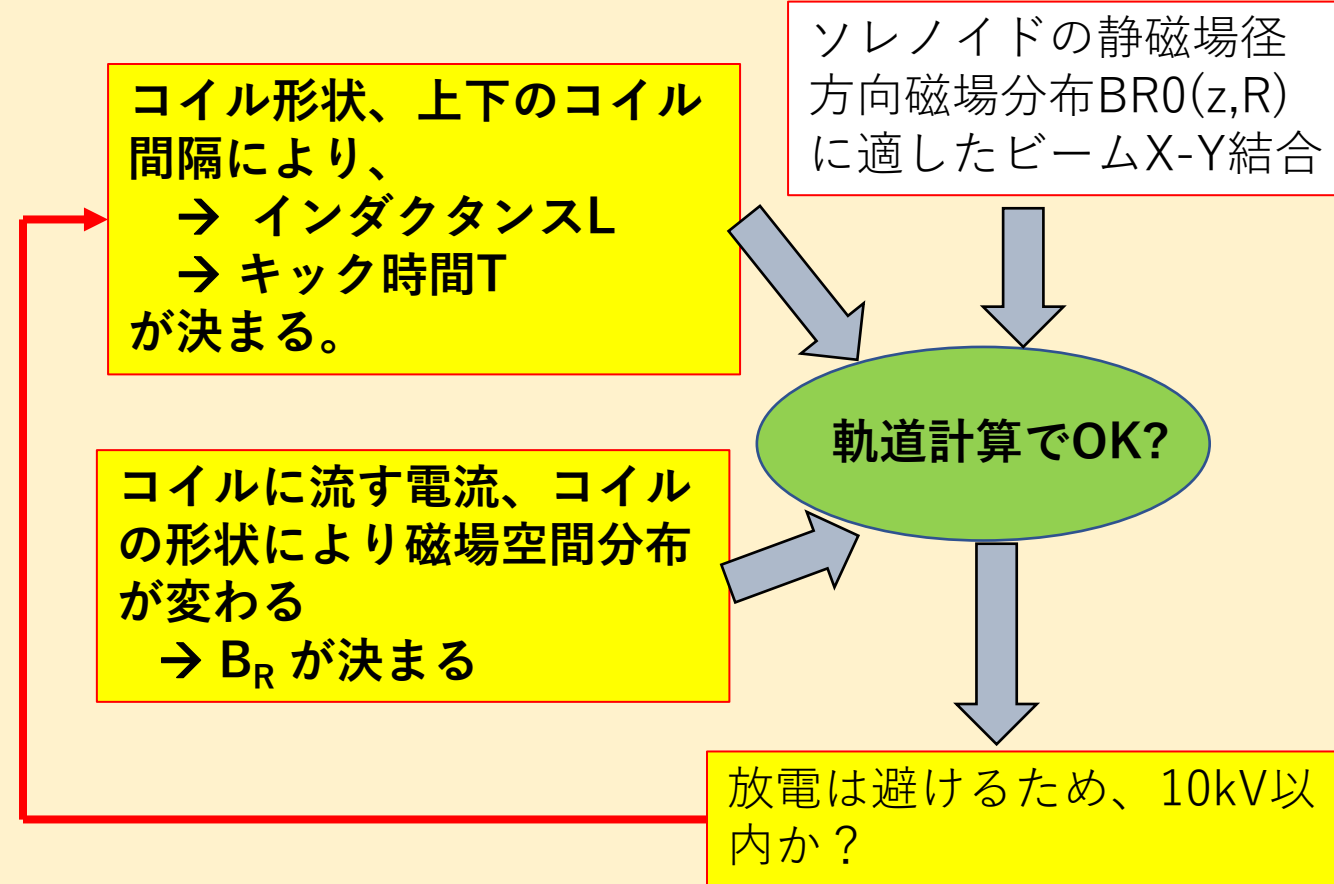


まとめ

- ◆ キッカーコイルの役割
- ◆ 3次元螺旋入射軌道のピッチ角と $B_R L$ 積の関係
- ◆ ソレノイド磁石の径方向フリンジ磁場 B_{R0} （静磁場）とキック磁場をうまく組み合わせて目標の $B_R L$ 積を出す。
- ◆ 11通りのコイル形状で入射軌道調整を行う。
- ◆ 電源の仕様範囲内に合う候補はあり、各候補のおおよそのキッカーパラメータ算出を行った。
- ◆ キッカー詳細調整の**スタート点**を決めた
- ◆ 浮遊インダクタンスを最小にするよう、コイルと電源までの接続方法を検討中。

今後の計画

最適化をするのは、ビーム輸送ラインからのビーム形状を反映した詳細な計算で確認を行う。



細かいパラメータ調整は機械学習で自動化したい

本題：適正キッカー形状、電流パラメータを決める

STEP1:30通りほど様々な形状のキッカーコイルを試す。コイル電流、キック時間も変える。

- 100本軌跡で解析
- 3か月かかった（2022年2月～5月くらい）

STEP2:一つのキッカーコイル形状(kickTyp11)に絞って、更に細かく電源パラメータをあれこれ試す。

軌道の入射角度を変える。

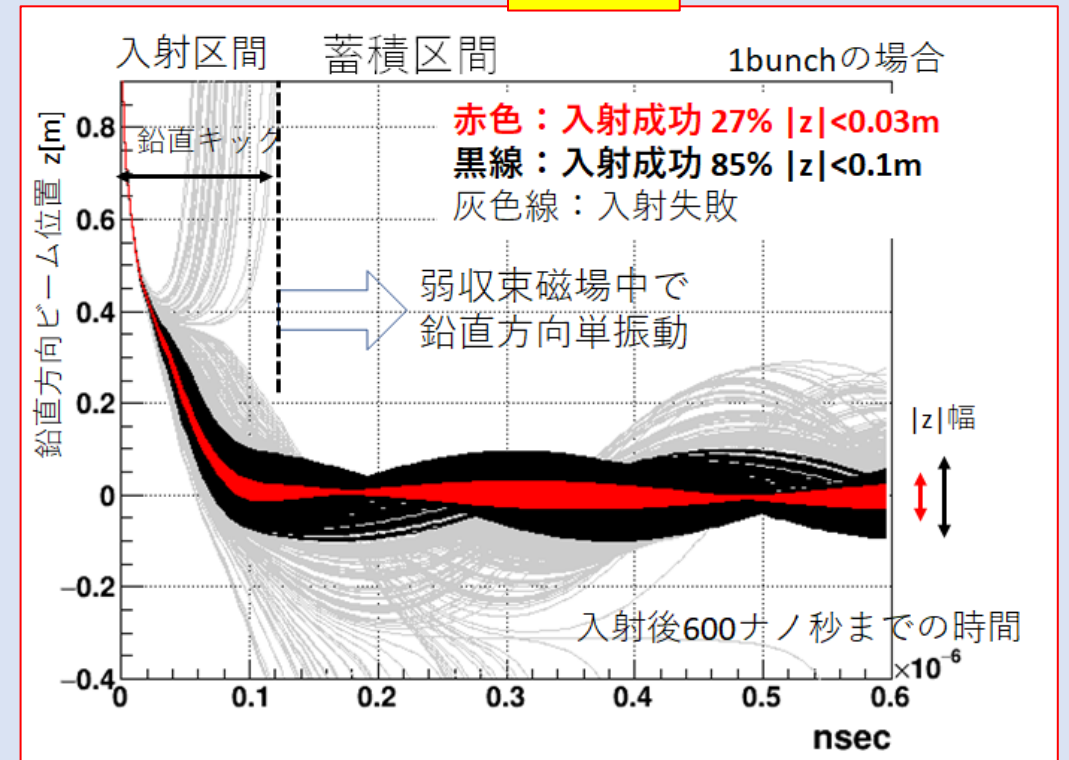
- 2か月かかった（2022年5月～7月中旬くらい）
- 上下コイル 別に電源接続 25kV あたりを目標
（現在、24kV と26kVの2通り）

STEP3: 約2000サンプルに照準を合わせる

- 中心軌道の調整
- Twiss parameter($y-y'$ 調整)
- $|z| < 10\text{cm}$ 領域であれば 効率80%は行けそう。
- 扁平ビーム調整で更に効率アップに挑むか。

今後： $|z| < 3\text{cm}$ に挑むか？
本日：いかにして上記の作業を進めたか？

結果



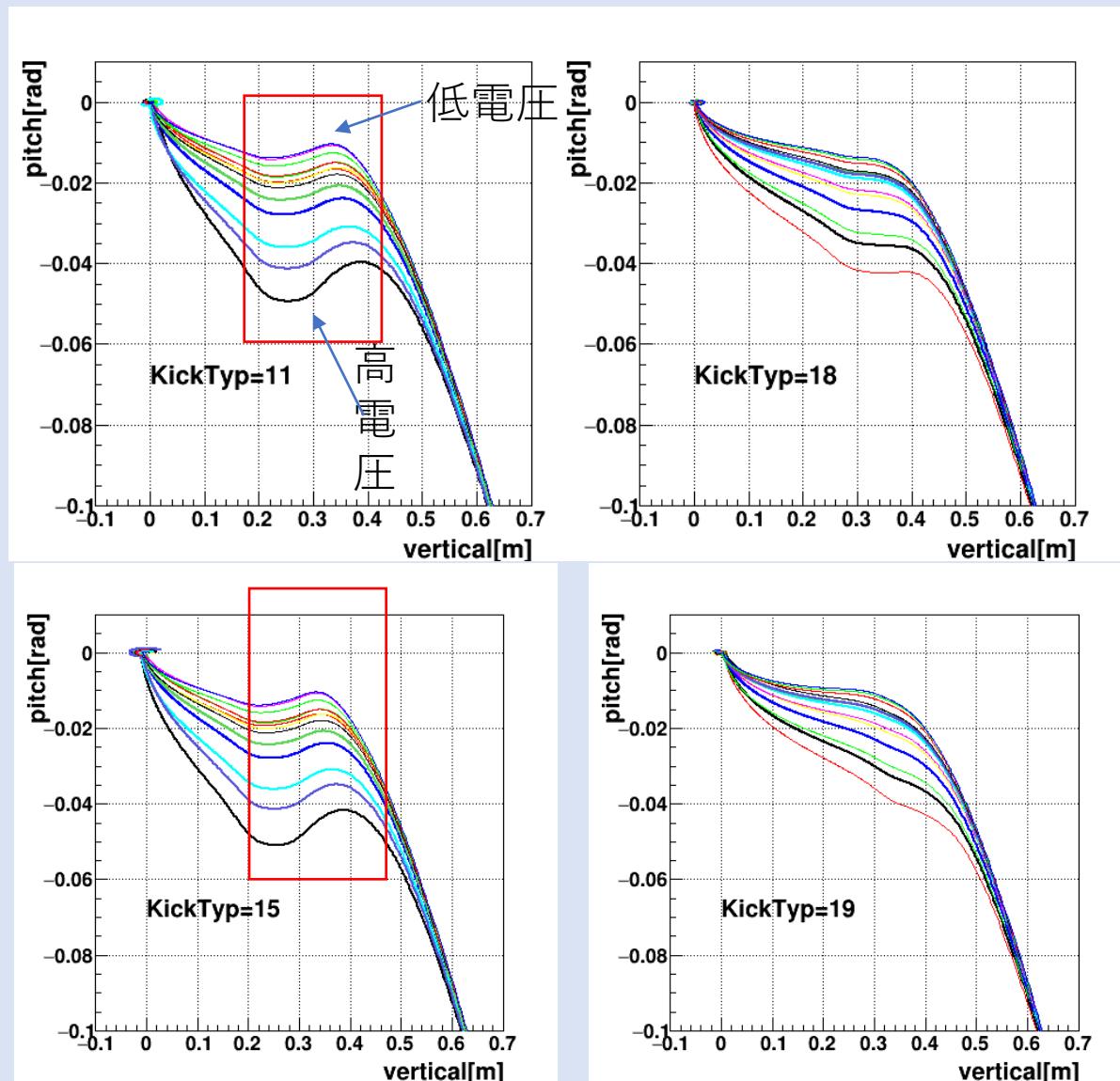
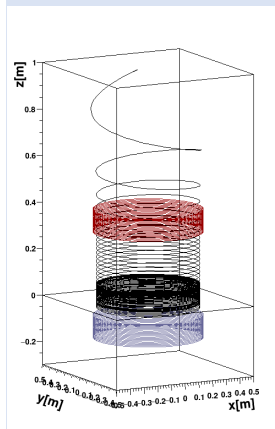
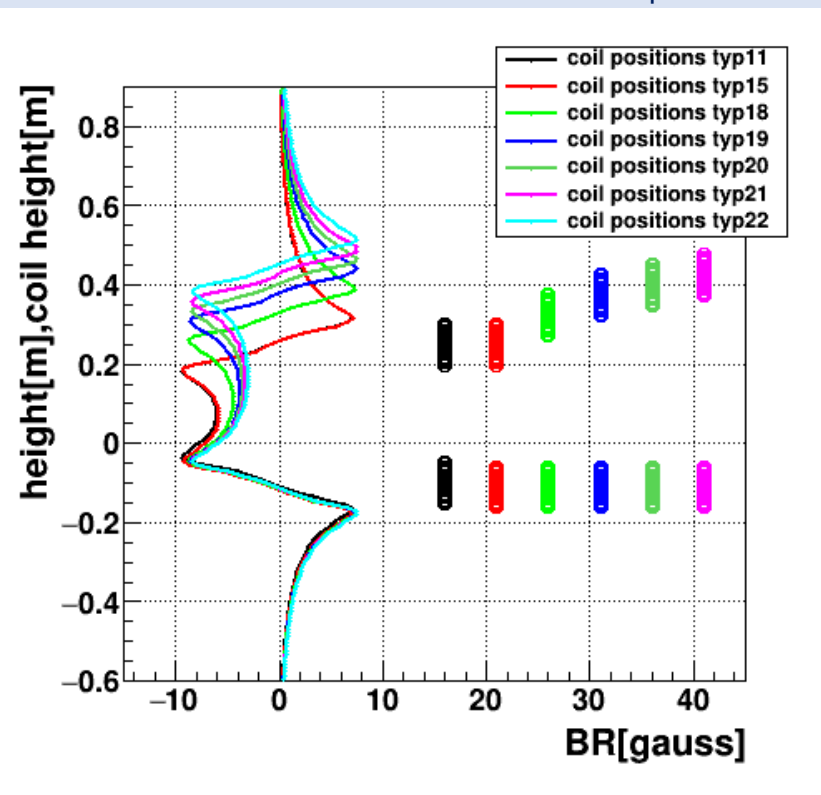
STEP1:30通りほど様々な形状のキッカーコイル/電源パラメータを試す

“kink” shape works as focusing effect and give a good efficiency

サンプル#11~19

$$B_R(z) \sin \frac{2\pi}{T_{kick}} (t - t_0) = F(z) I_0 \sin \frac{2\pi}{T_{kick}} (t - t_0)$$

Kick-coil shape Power supply



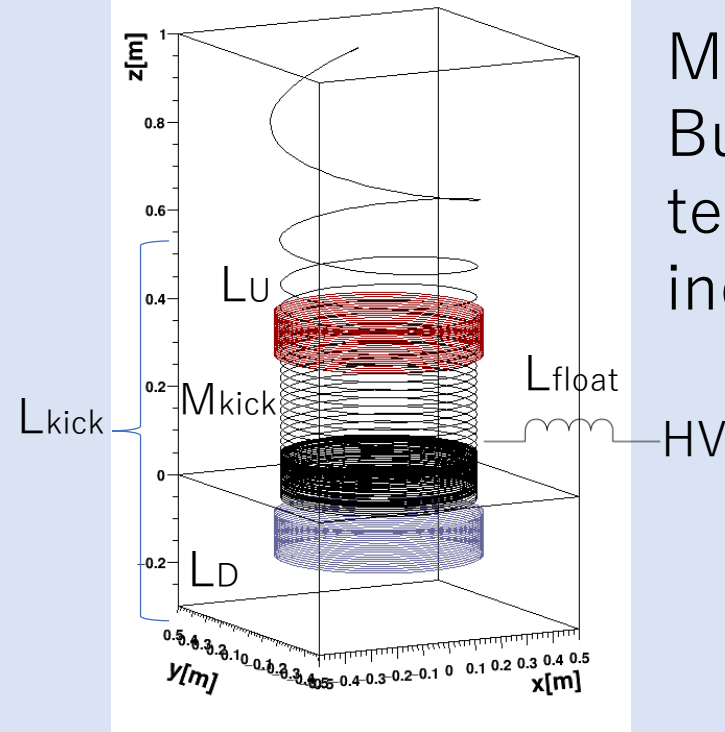
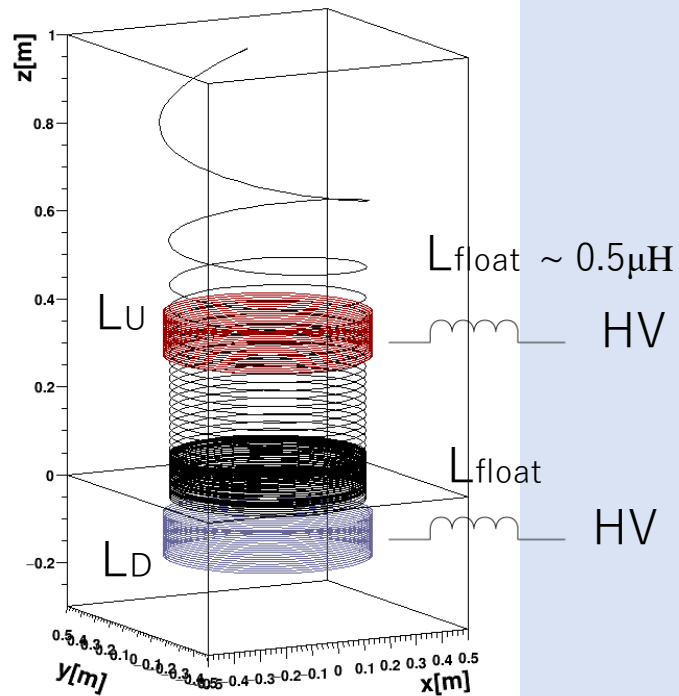
キック時間を短く、大電流を一気にかける方が、入射に適したキッカーになるのだが、キッカーコイルにかかる高電圧の問題も考慮せねばならない。

Shorter $T_{kick}/2$ is better but,...

$$T_{kick/2} = \pi\sqrt{LC}, \quad C = \left(\frac{T_{kick/2}}{\pi}\right)^2 \frac{1}{L}, \quad V = \sqrt{\frac{L}{C}} \times I_0$$

Shorter $T_{kick}/2$ requires bigger High-voltage

Dr. Abe tried to many coil shapes to decrease coil inductance; L_{kick} 1.6 ~2.1 μ H (series).



M_{kick} : mutual inductance is small and negative. But, to keep less than 25kV at coil terminal, it is better to operate independent power supply.

JR Joban-Line (DC)

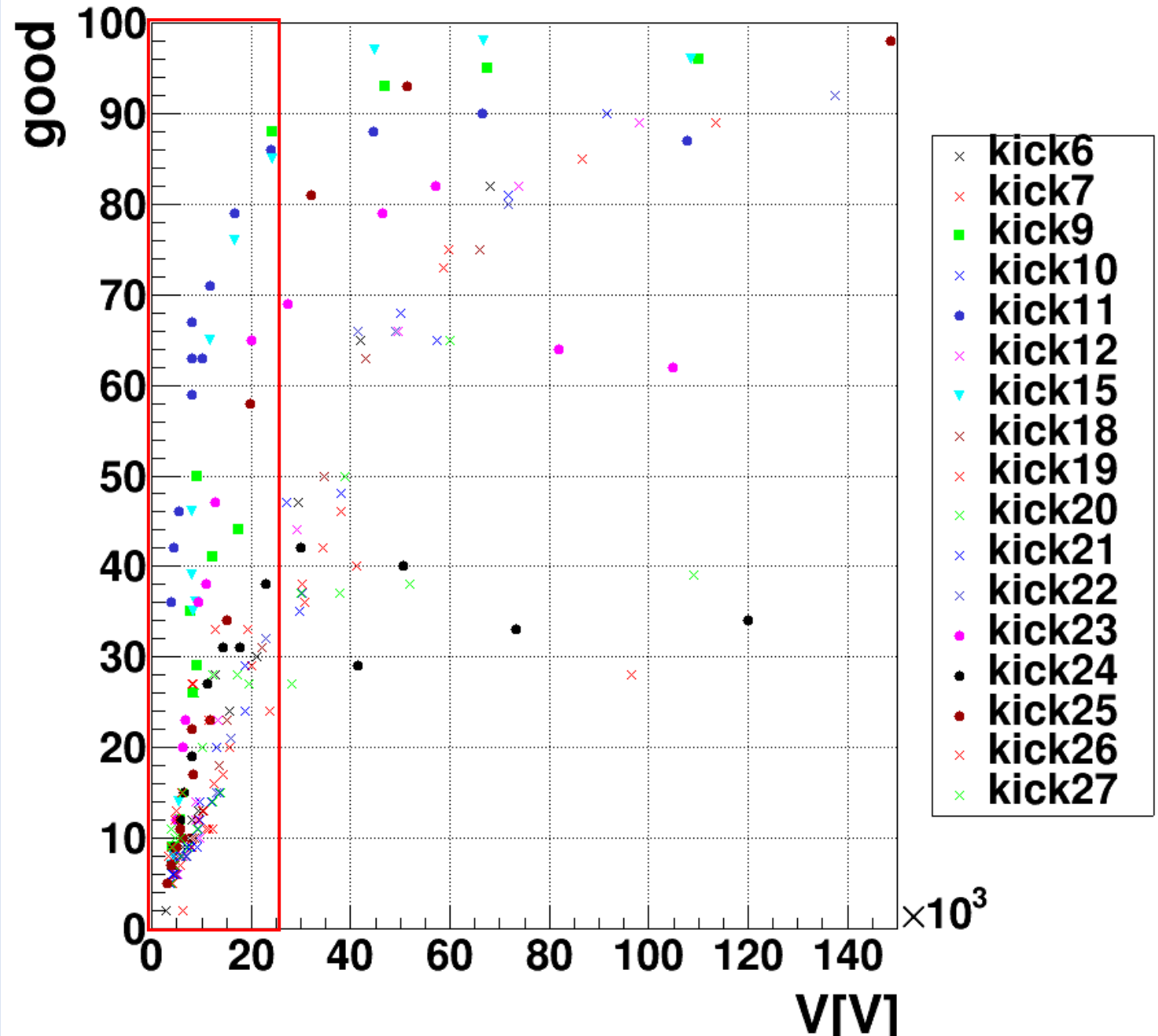


Jitter control is important \rightarrow Mr. Oda's thesis topic.
Dedicated discussions are ongoing with Dr. Takayanagi (JAEA) and PPJ.

Injection efficiency vs. HV (L_U or L_D)

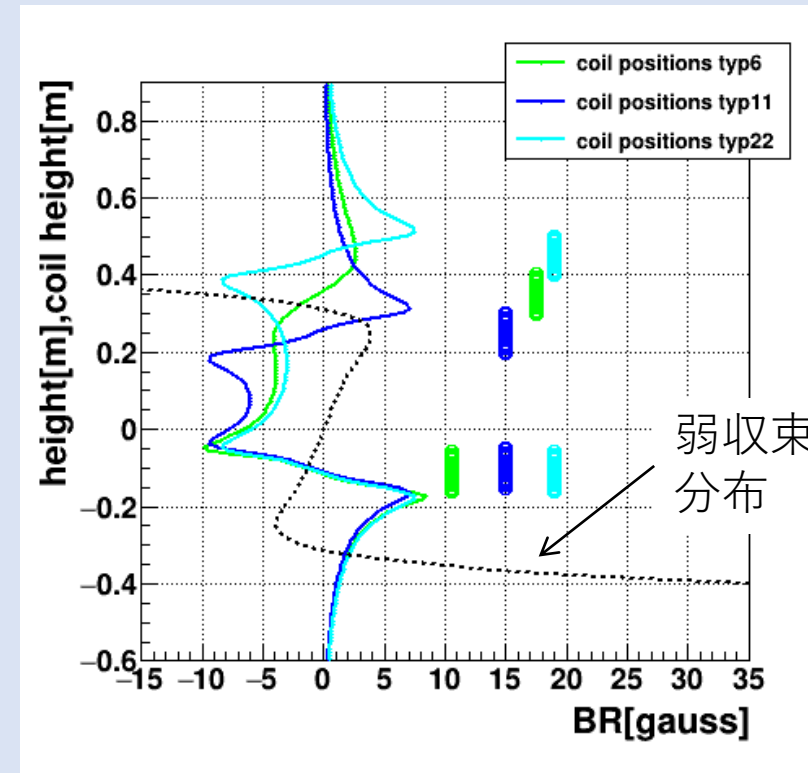
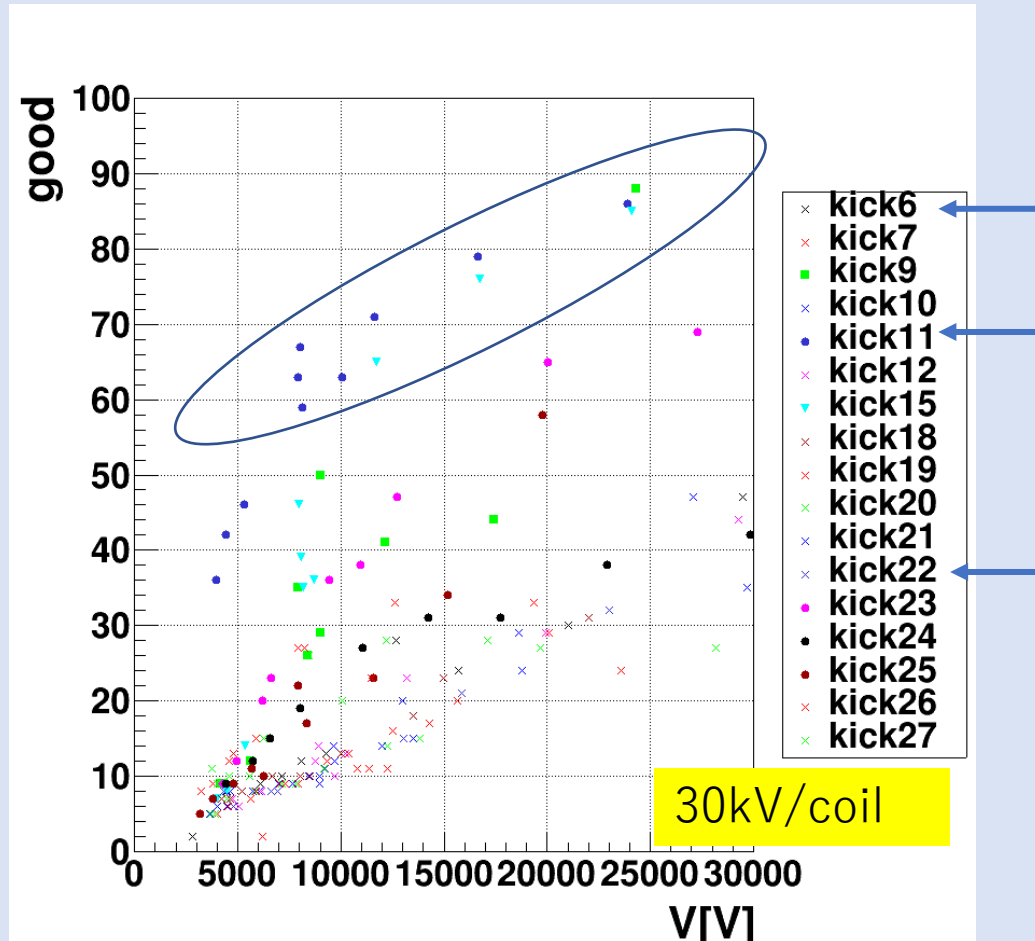
Depends on kick-coil shape, correlation changes dramatically.

- There are good numbers
- ◆ Distance between Upper and Lower coils
 - ◆ Upper coil position valance with weak focusing BR shape
 - ◆ Lower coil position to control fine tuning



Point-1:上コイルの配置

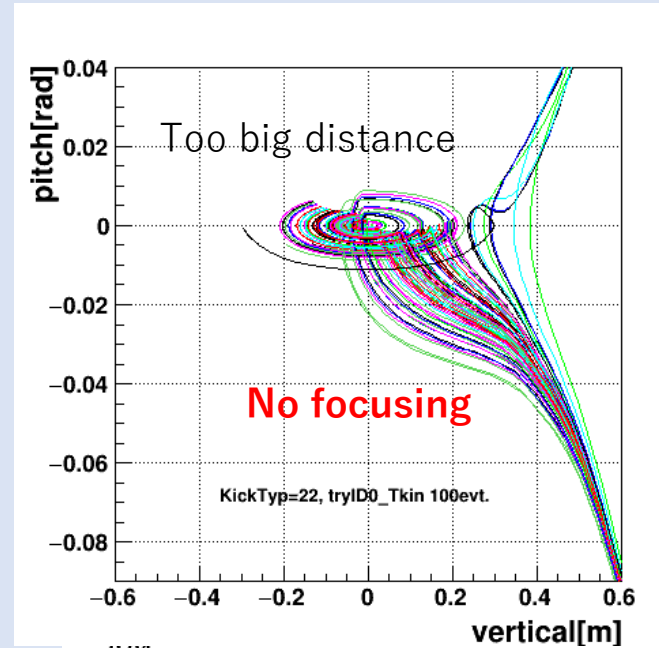
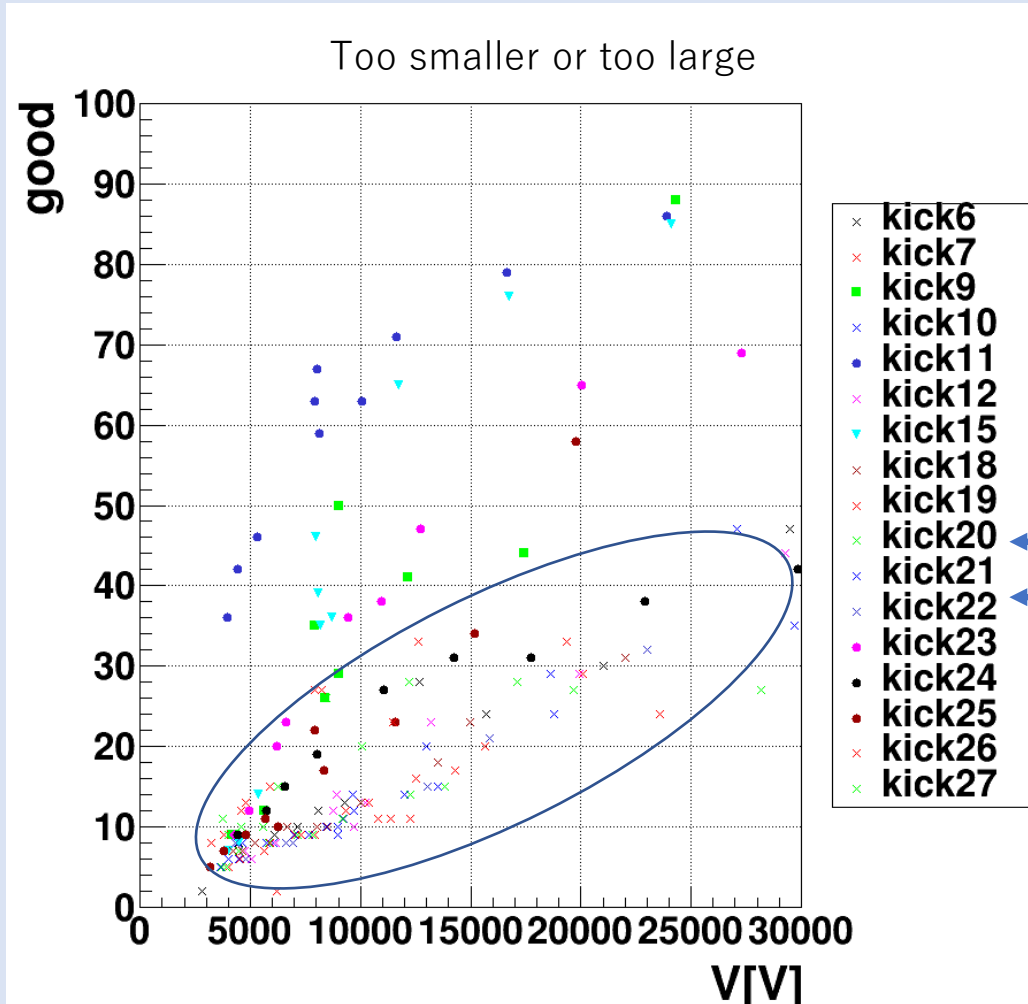
弱収束磁場（静磁場）とキッカーが作る磁場のバランス



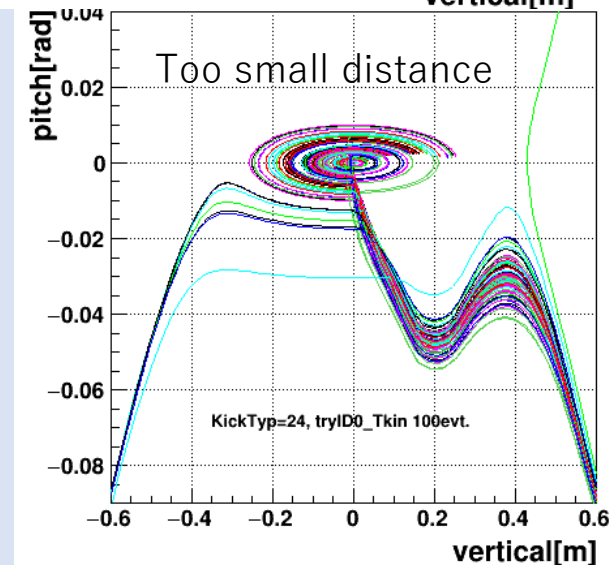
Because of weak focus BR shape as a function of z , kicker-BR does favor position to apply "focus" effectively.

Point-2:上下コイルの距離も重要

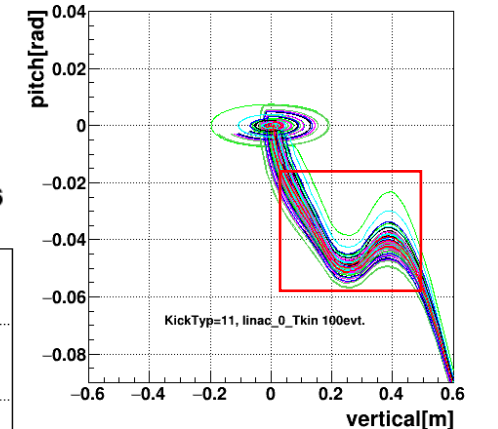
- ✓ 近すぎると、キック時間が短すぎる。
- ✓ 離れすぎても、十分な収束を与えられない。
- ✓ 磁場プローブとの取り合いで決めた。



Upper center 0.45m
Lower center -0.11



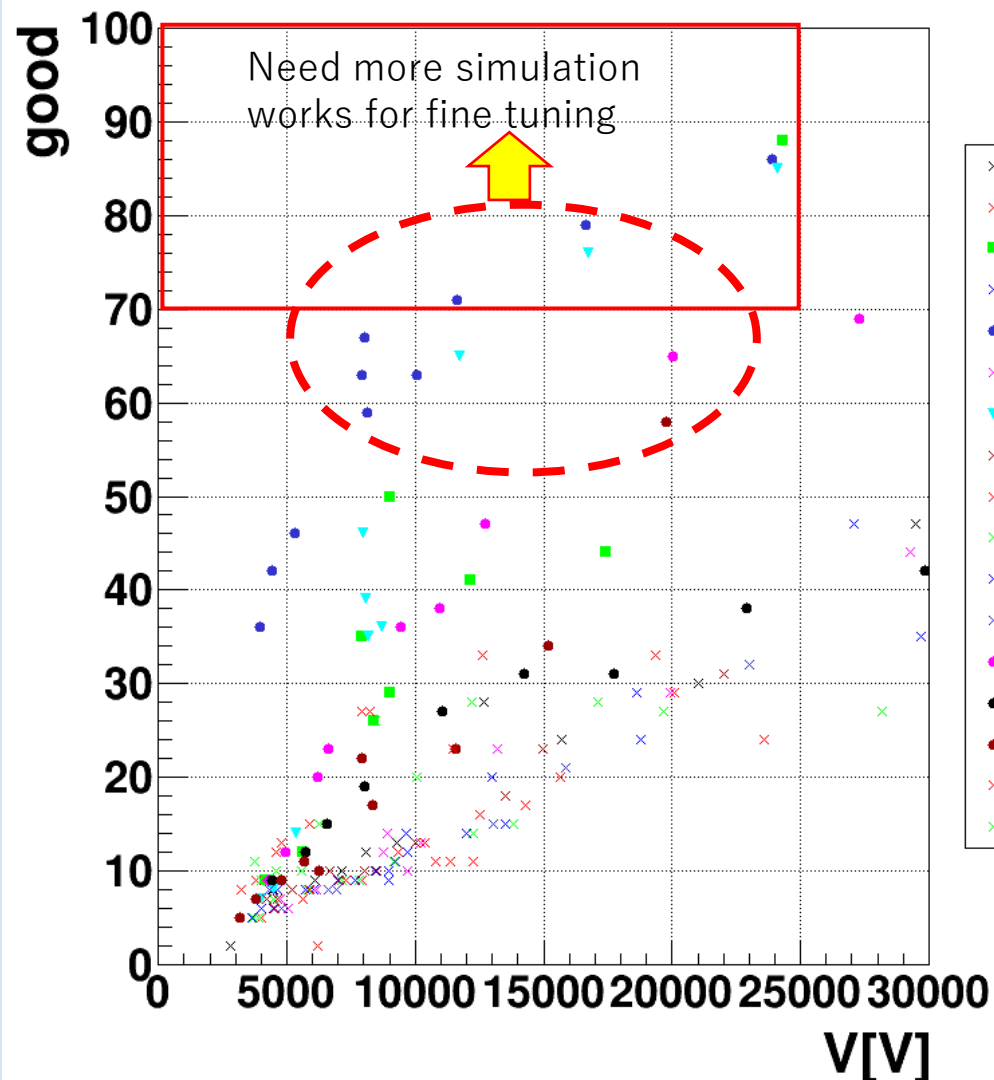
Upper center 0.25m
Lower center -0.1



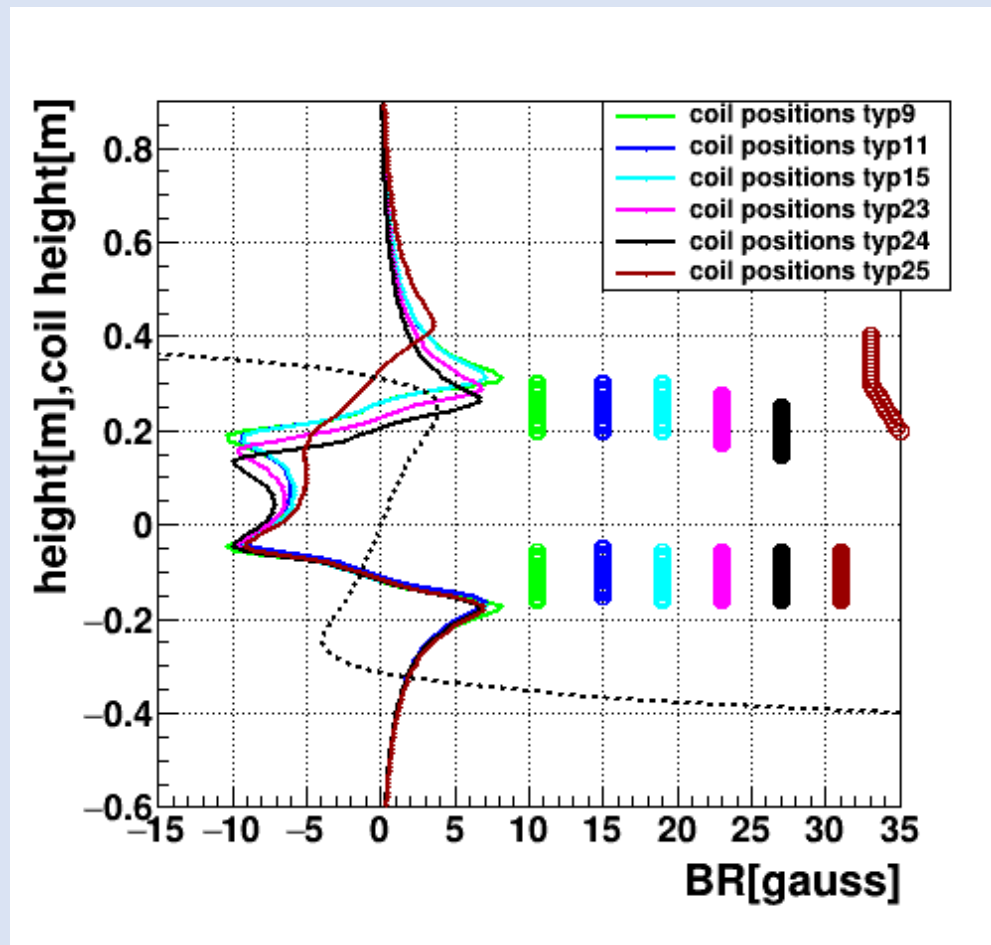
Focusing but poor efficiency, why?

Upper center 0.2m
Lower center -0.11

Typ#9,11,15 and 23,25



- × kick6
- × kick7
- kick9
- × kick10
- kick11
- × kick12
- ▼ kick15
- × kick18
- × kick19
- × kick20
- × kick21
- × kick22
- kick23
- kick24
- kick25
- × kick26
- × kick27

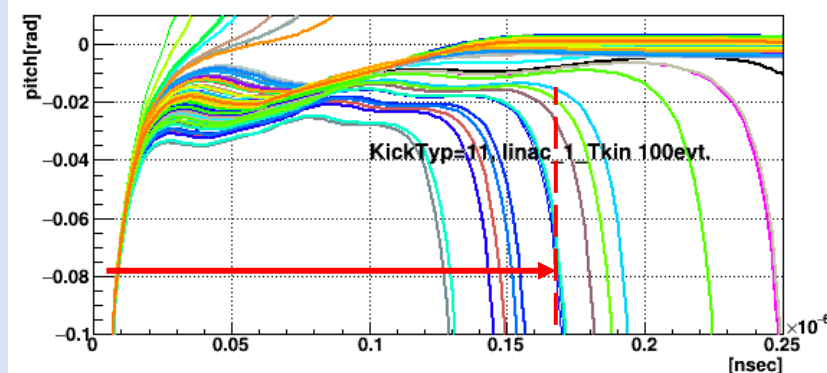
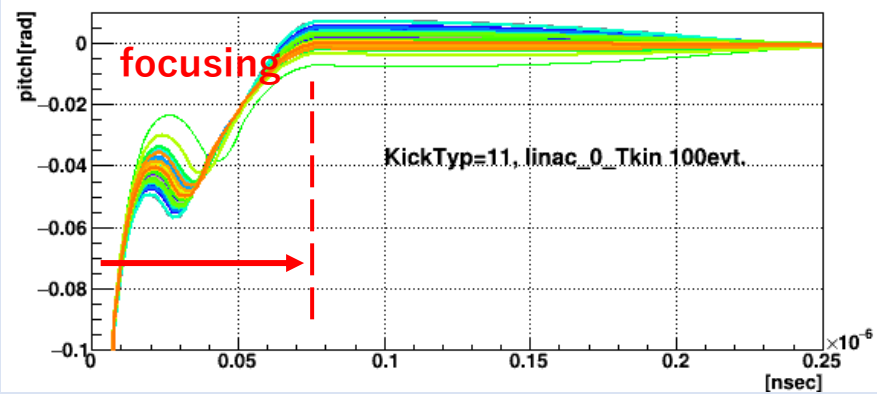
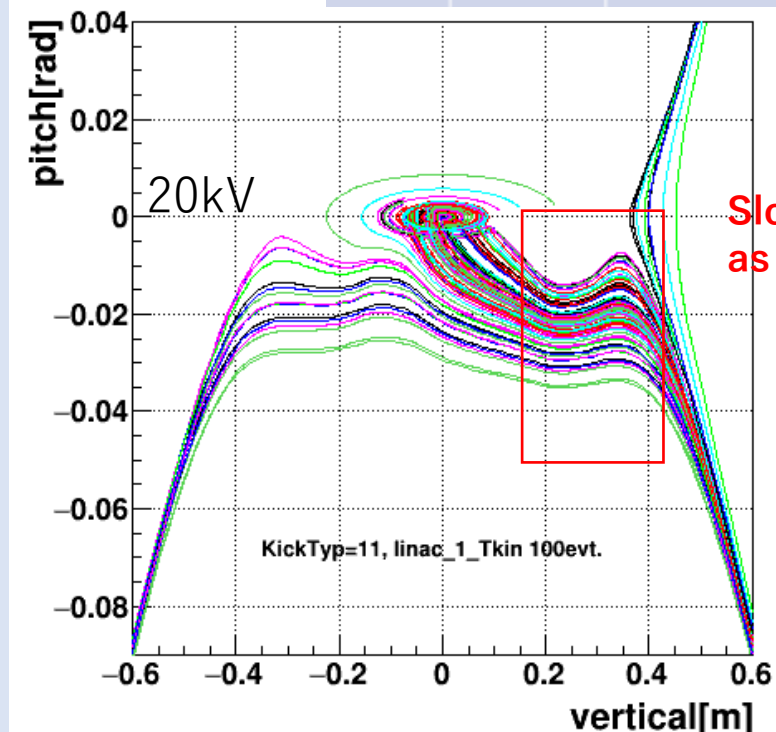
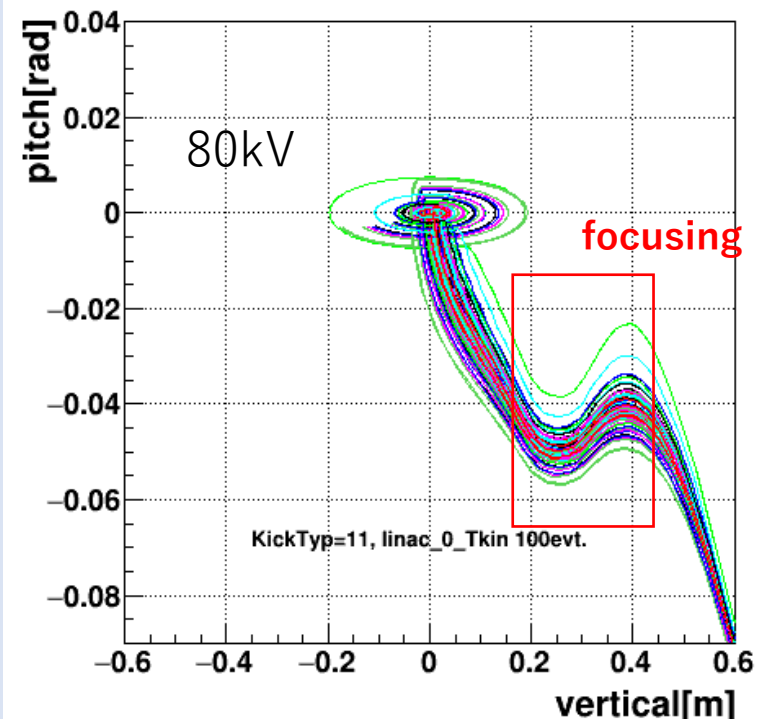


あまり効き目はなかった。

STEP2:入射角と電源パラメータを更に調整する。

100 samples(typ#11)

ID#	TK/2 [nsec]	IK[500A]
0	81	5.5
1	157	1.0

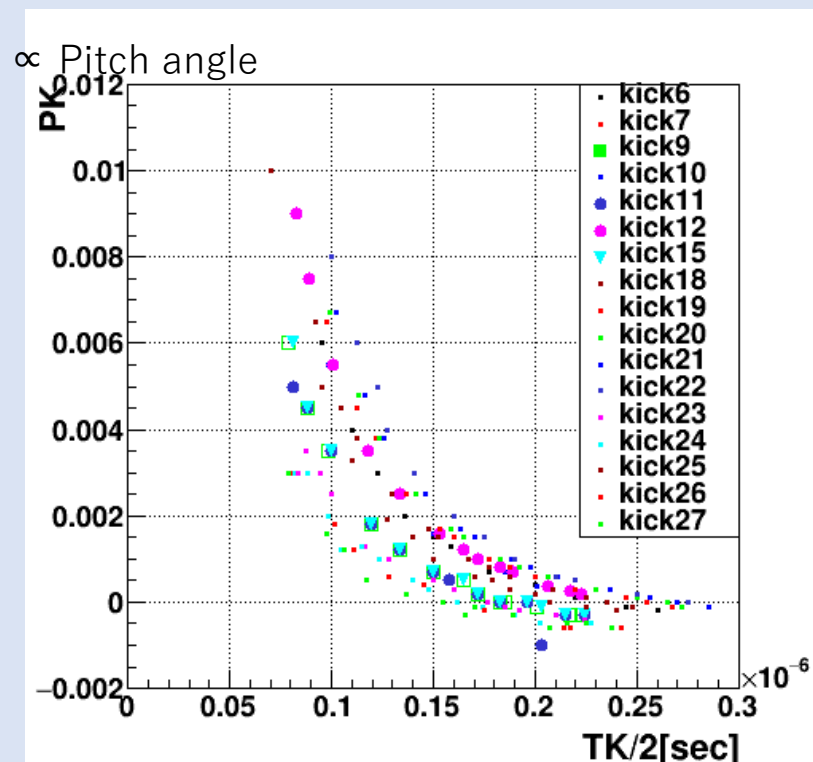
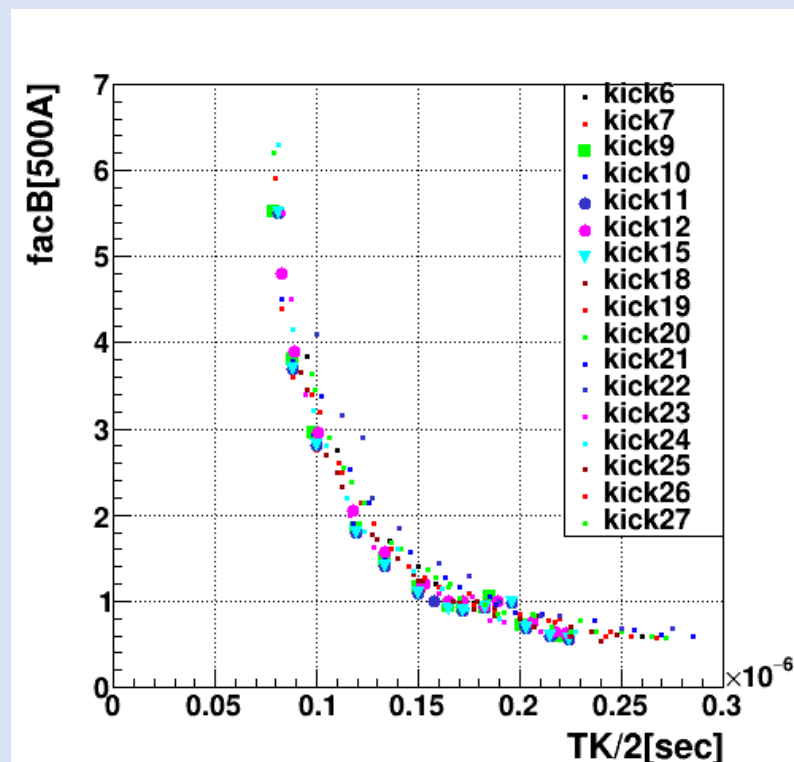
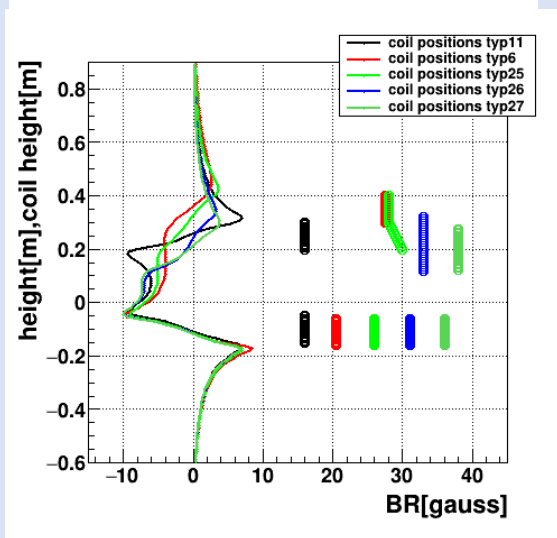
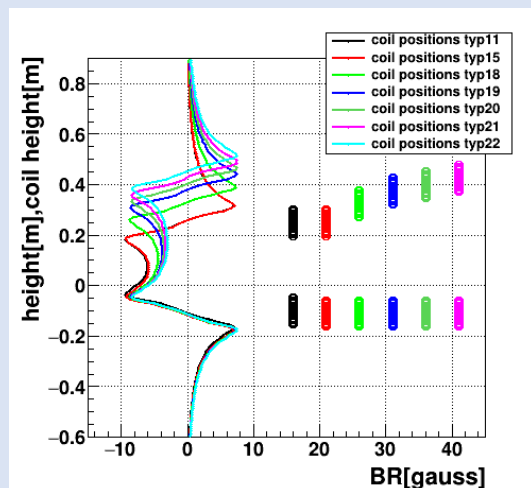


様々なコイル形状、キック時間、キック電流を試した。一覧を示す。

$$B_R(z) \sin \frac{2\pi}{T_{kick}} (t - t_0) = \underbrace{F(z)}_{\text{Kick-coil shape}} \underbrace{I_0}_{\text{Power supply}} \sin \frac{2\pi}{T_{kick}} (t - t_0)$$

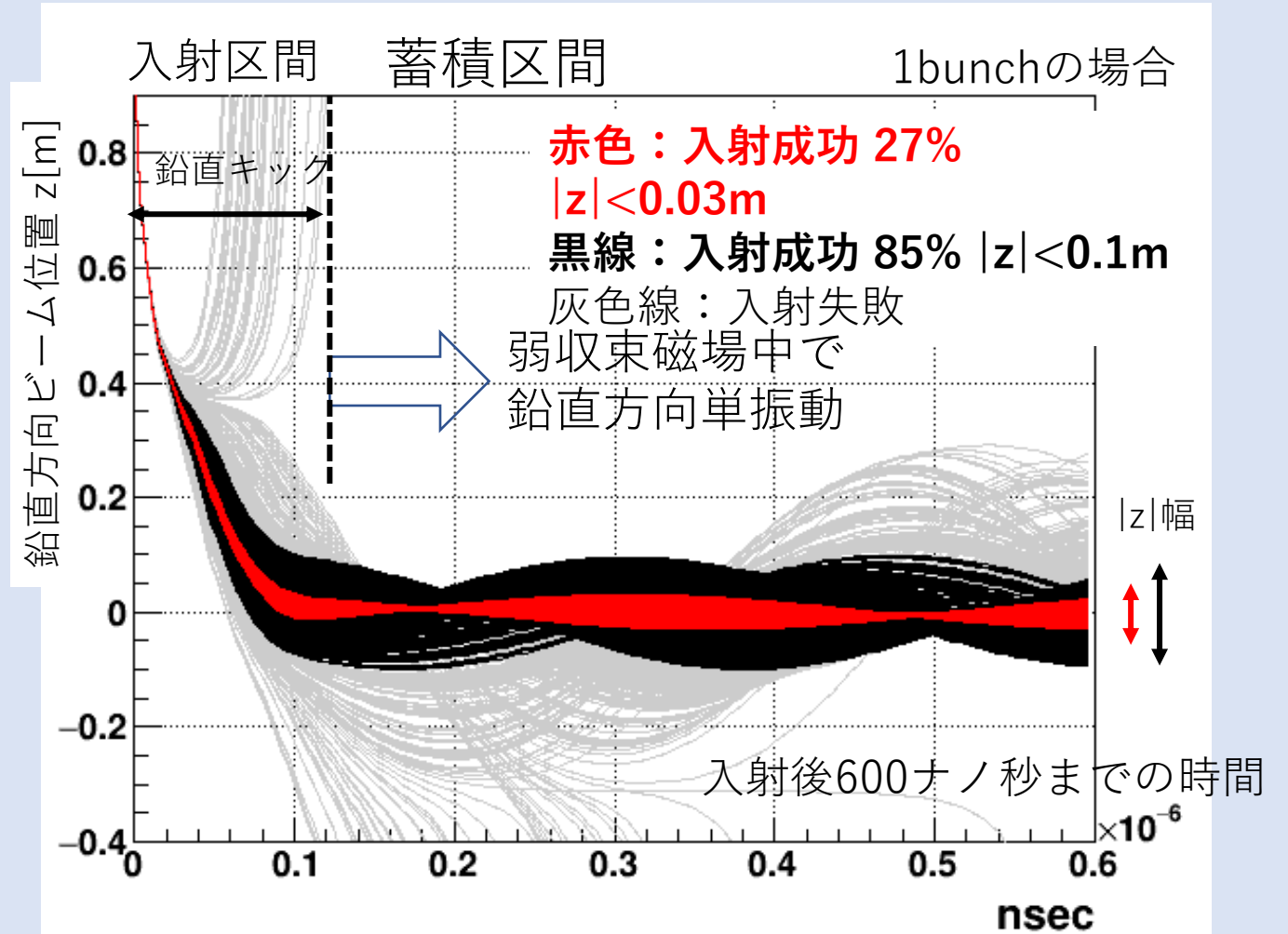
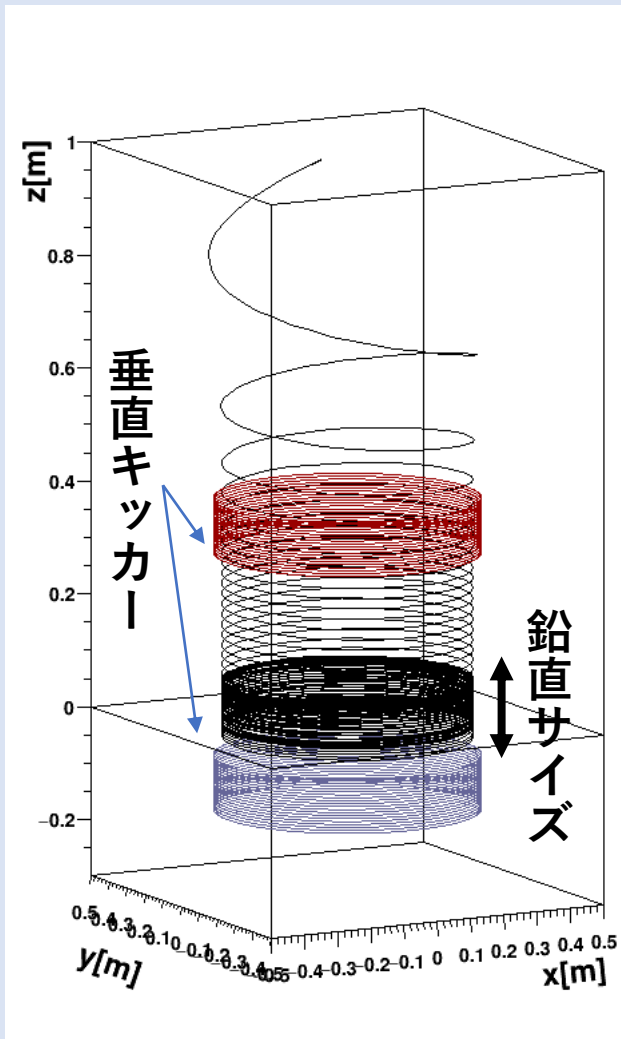
Kick-coil shape Power supply

I have tried to check how power supply's parameters ($T_{kick}/2$, I_0) do change among **17** different coil types.



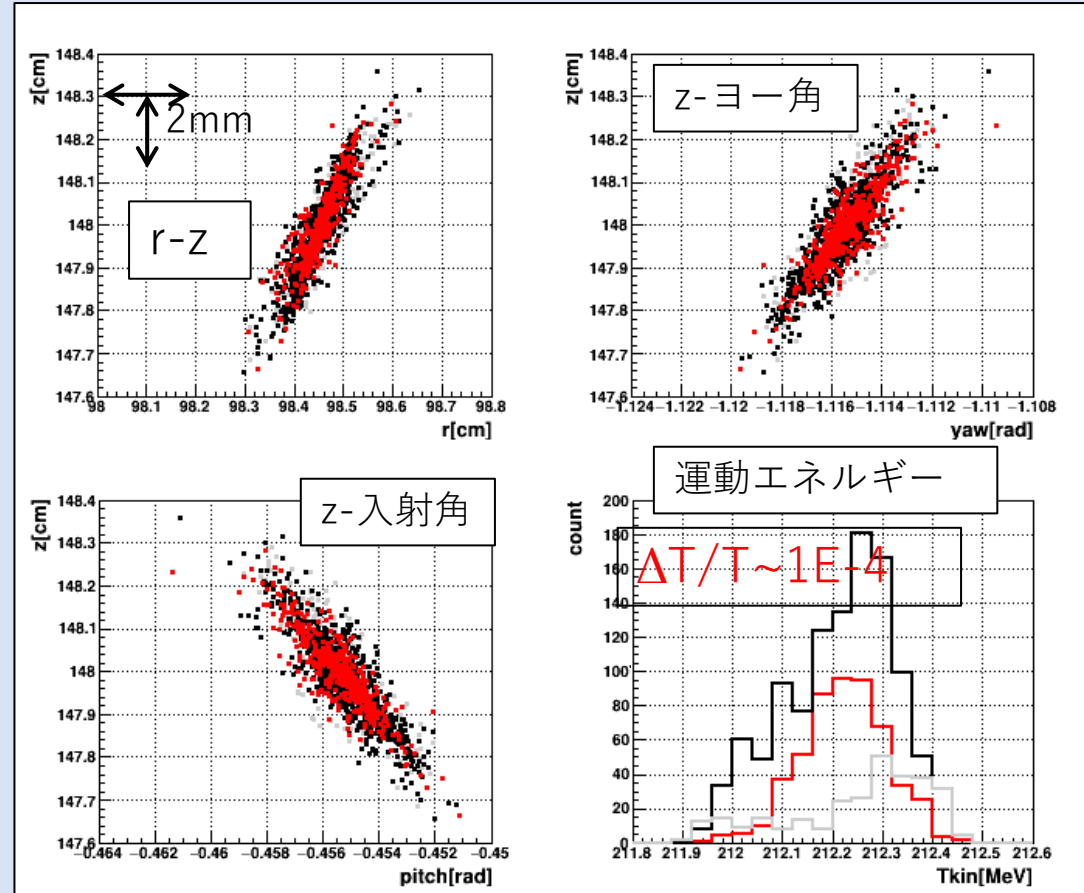
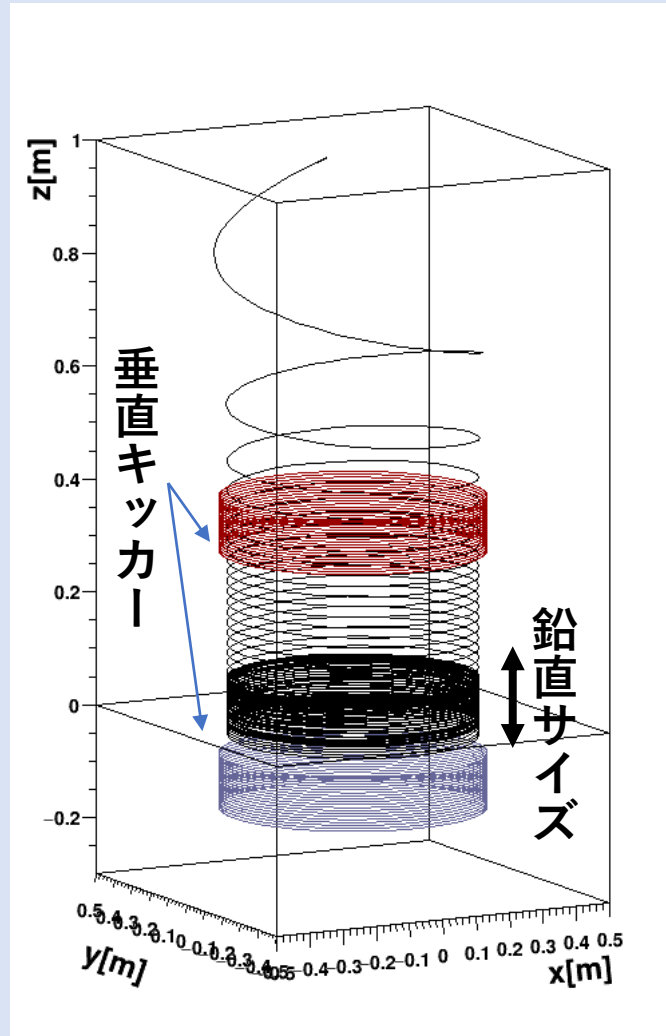
Shorter kick period (TK/2) requires high current, and bigger pitch angle

STEP3と現状計算結果



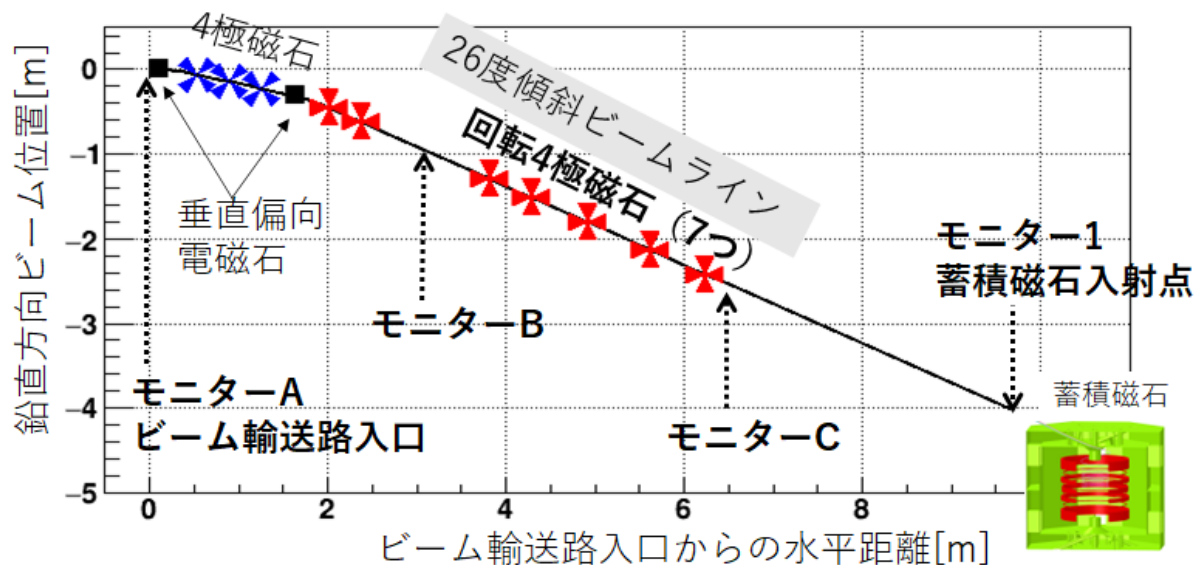
蓄積後の $|z|$ を更に絞るには、運動量の調整、位相空間の調整、最適軌道の三つを精密調整せねばならない。

STEP3と現状計算結果



蓄積後の $|z|$ を更に絞るには、運動量の調整、位相空間の調整、最適軌道の三つを精密調整せねばならない。

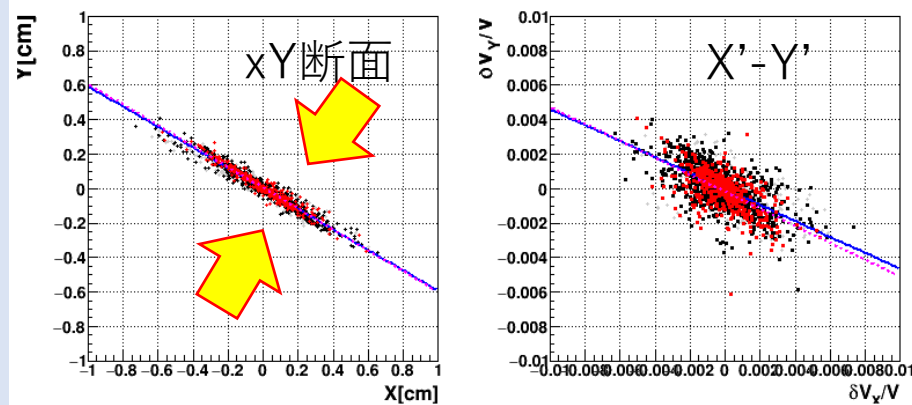
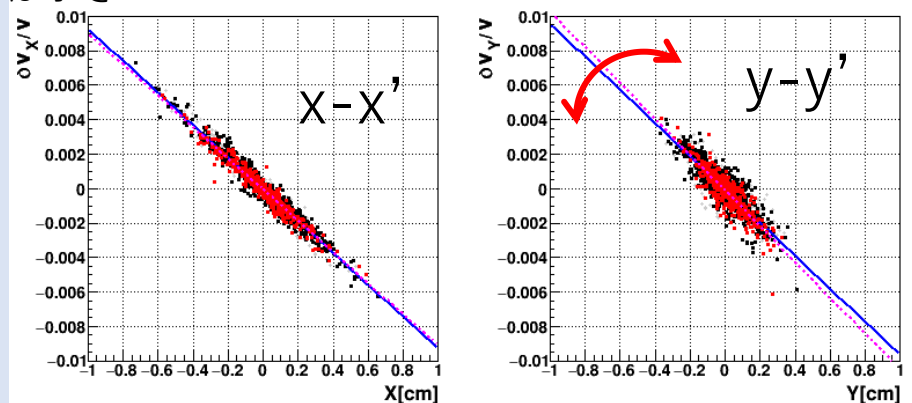
今後は、ビーム位相空間を更に調整する。



輸送ラインでのビーム位相空間調整を行い、
さらに蓄積ビームの鉛直サイズを小さくする。
→ g-2精度向上や、EDM感度向上につながる

y-y'の調整 → 鉛直成分ビーム収束
x-y断面 → 磁場分布形状に合わせる

入射点のビーム位相空間を表示すると、
強い相関を持ち、入射後の $|dz|$ 分布の差を色分けしたが、傾きの差は小さい



X-Y結合をかける前のエミッタンス

$\epsilon_{ps_x} = 9.459E-8$,

$\epsilon_{ps_y} = 1.23E-7$

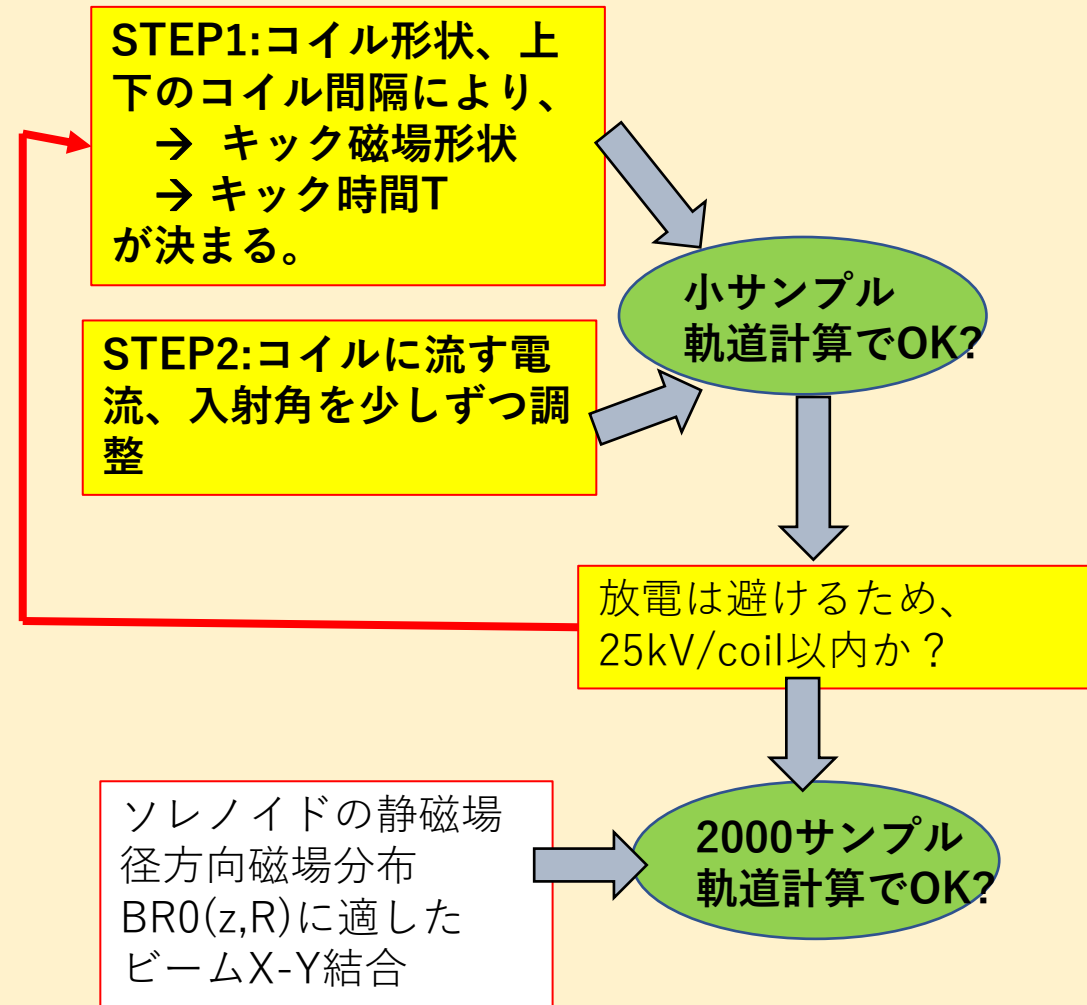
→ $\epsilon_{ps_x} = 8.46E-8$

→ $\epsilon_{ps_y} = 9.66E-8$

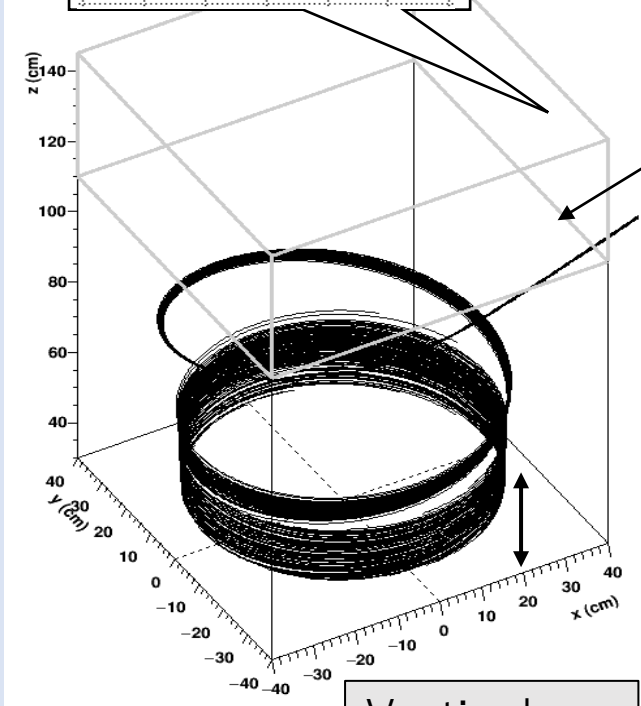
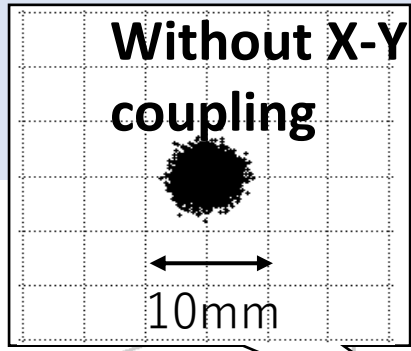
まとめ

- ◆ 物理動機
- ◆ 3次元螺旋入射の紹介
- ◆ 蓄積領域への入射・蓄積効率は第1目標を達成した
 - ◆ が、さらに、ビームの鉛直幅（ベータatron振幅）を抑える。
- ◆ 今後：
 - ◆ 位相空間の精密調整に取り組む。
 - ◆ 浮遊インダクタンスを最小にするよう、コイルと電源までの接続方法を検討中。
 - ◆ キッカー電源製作、放電試験

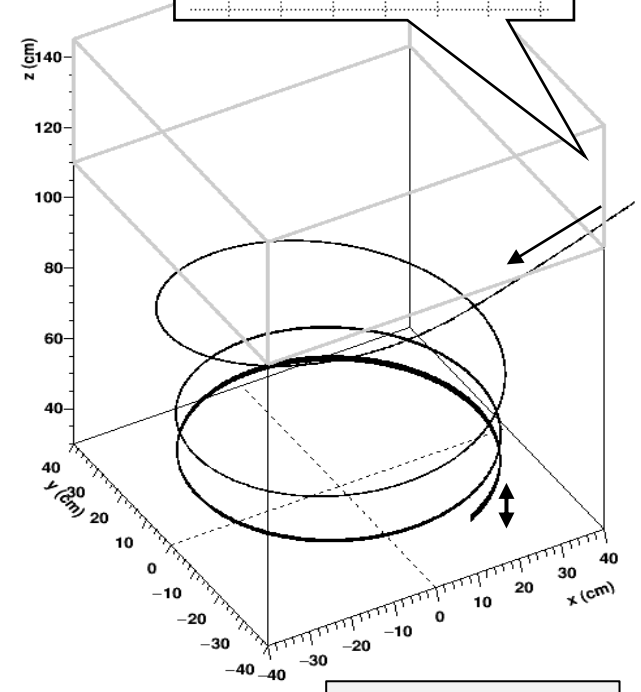
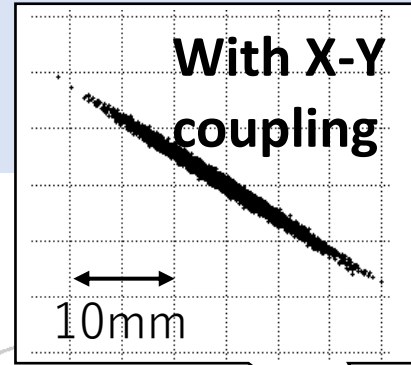
キッカーパラメータを決めるまで。



細かいパラメータ調整は機械学習で自動化したかったが、結局、自分が散々学習した。



Vertical beam size is larger



smaller