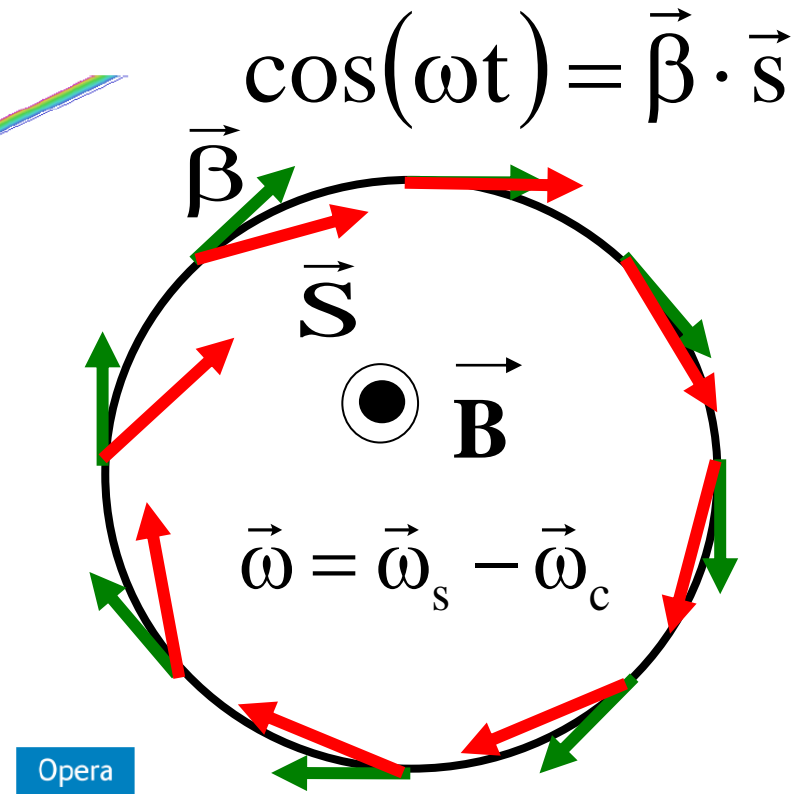
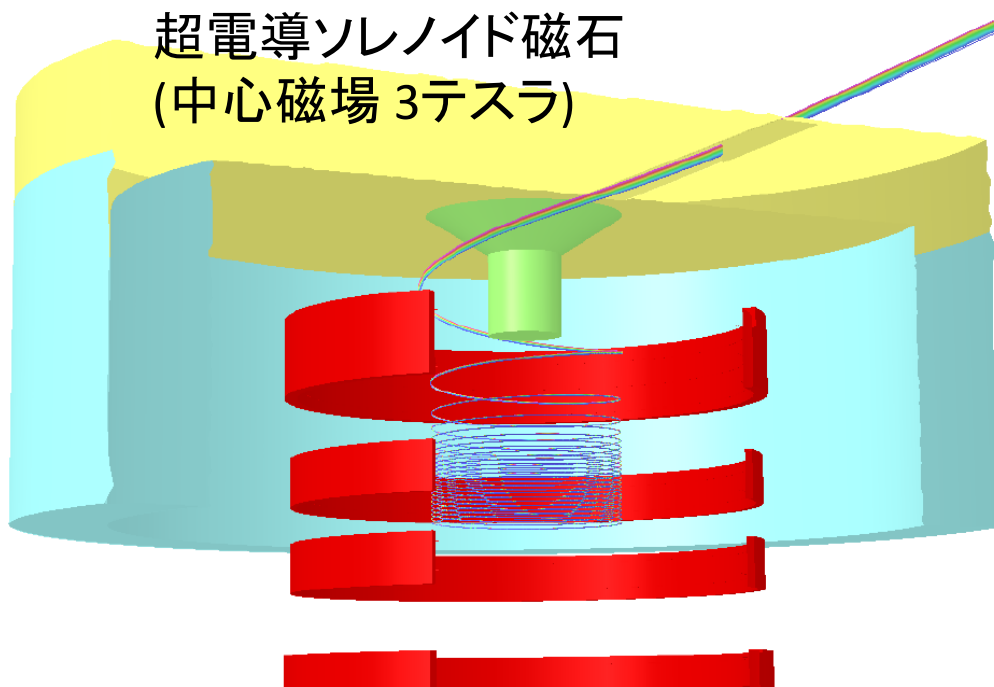


# ミューオンビーム蓄積用リング設計と ビーム入射手法の開発

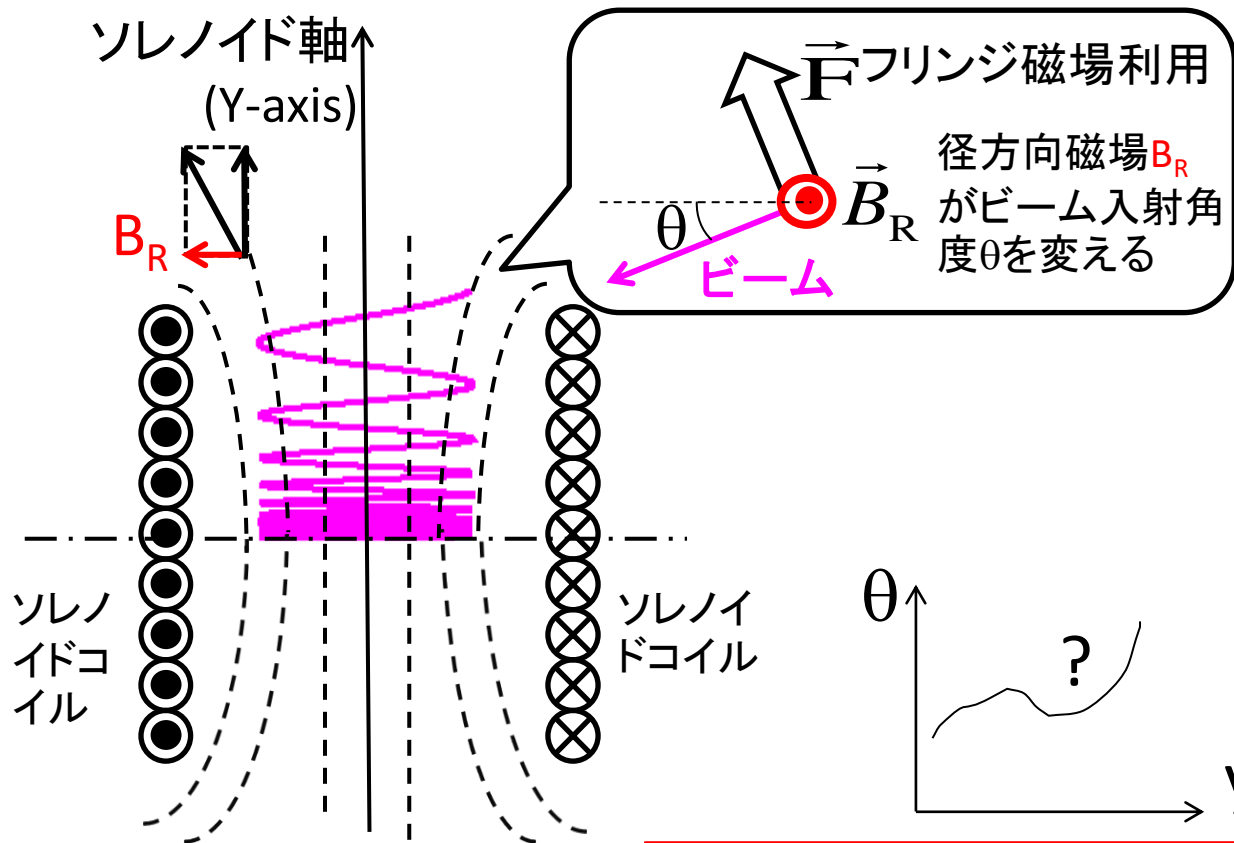
高エネ研 飯沼裕美、荻津透、齊藤直人、佐々木憲一、  
菅野未知央、中山久義、三増俊広、Etienne Forest  
日立日立研 阿部充志

19/Jan/2012 15:04:31



# 基本コンセプト：3次元螺旋軌道入射

- ソレノイド磁場を利用。→軸対称
- 磁石斜め上から入射、
- 磁石長手方向中心部分に蓄積する。



By: ソレノイド軸方向成分  
BR: 径方向成分

磁場中の運動:  
運動量絶対値  $p$  は一定

$$p = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2} = \text{const.}$$

$$\sin\theta = \frac{p_y}{p}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta\theta}{\Delta y} = \frac{q}{p} \frac{B_R}{\tan\theta}$$

入射角度  $\theta$  をソレノイド軸位置 ( $y$  の関数) で決めると、軌跡に沿った磁場分布を一意に定めることができる。

# 蓄積リングとビーム入射イメージ

超電導ソレノイド磁石

- 中心磁場 3テスラ
- 高さ3m

ソレノイド磁石具体設計進行中

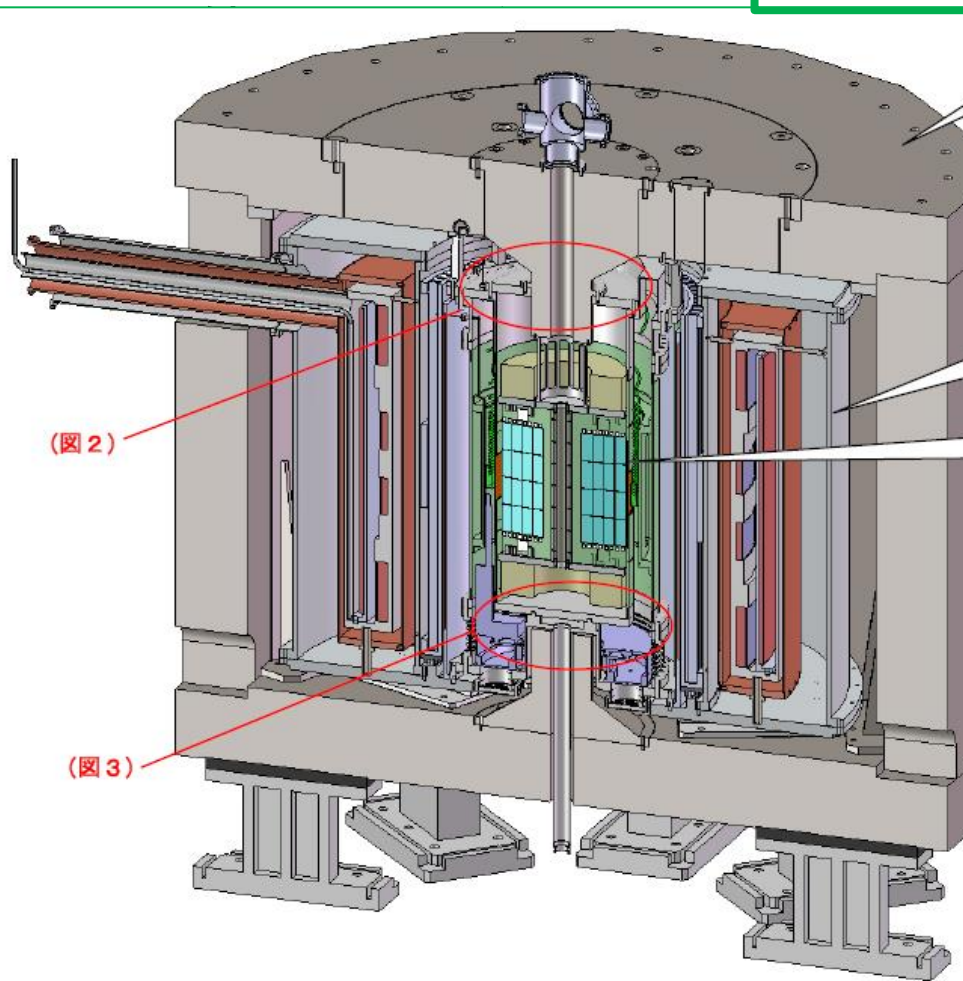
- ✓KEK低温センター
- ✓日立研究所と共同研究

19/Jan/2012 15:04:31

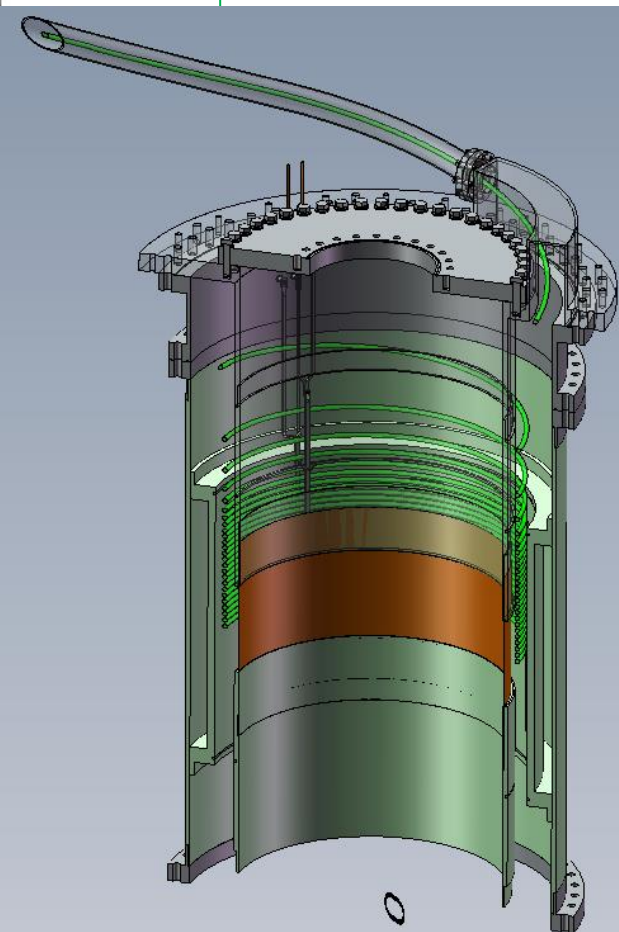
天板(銅)

円筒型  
リターン  
(純鉄)

超電導主  
コイル



ヨーク部

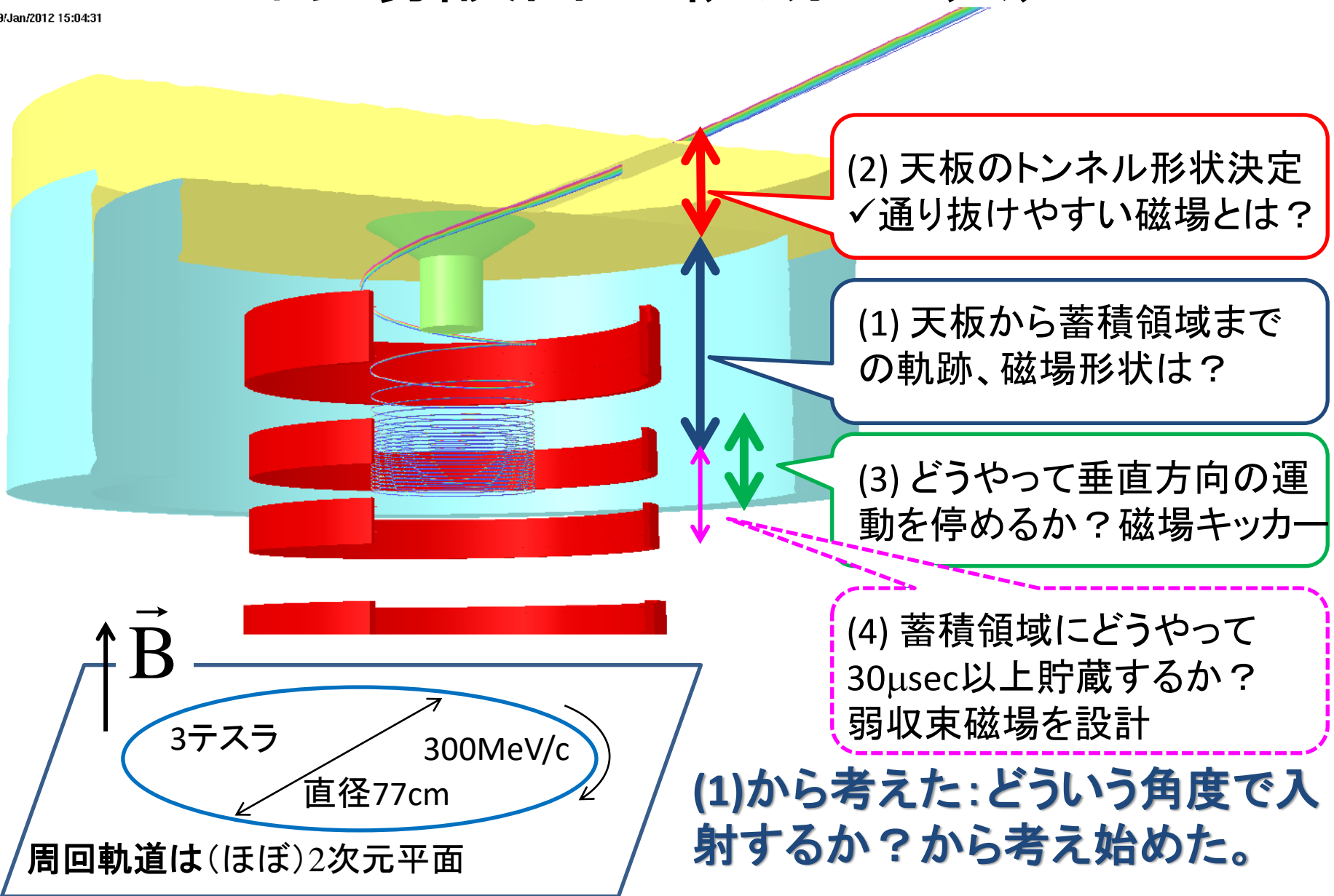


2010/9/28

図1 ミューオン蓄積リング用電磁石全体構造案 (正面断面図)

# 磁場設計と軌跡の決定

19/Jan/2012 15:04:31



(1)から考えた: どの角度で入射するか? から考え始めた。

# (1) 磁石内部の基準軌跡と 磁場分布(軸対称)の設計

入射軌道の確認  
+ トンネル計算  
(OPERA)

入射角度 $\theta$ を軸方向成分:  
 $y$ の関数で決めると、軌跡  
に沿った磁場分布が一意  
に決まる。

磁石モデル作成  
ポイント3つ:

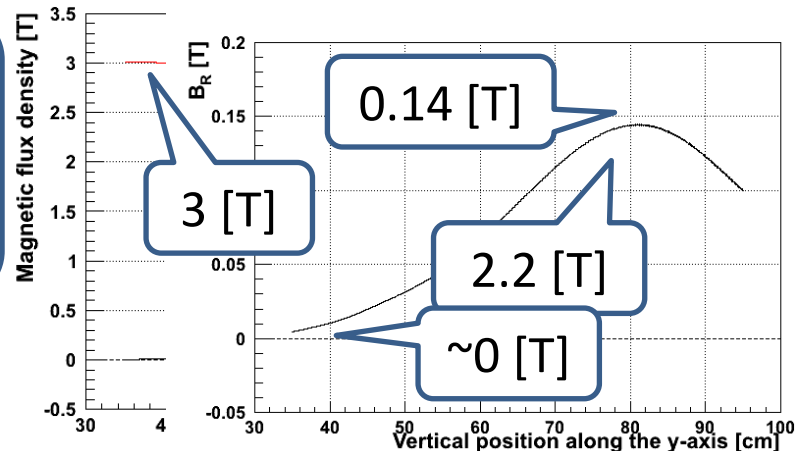
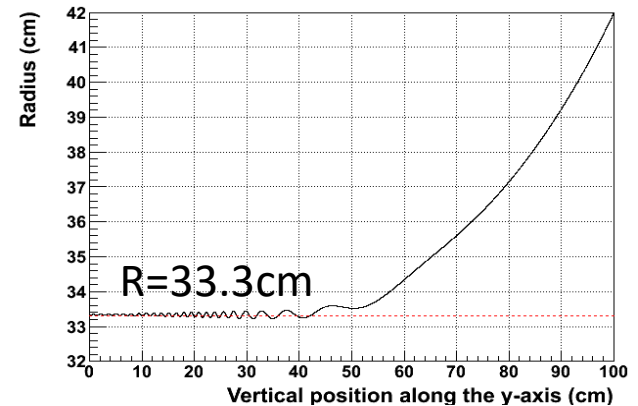
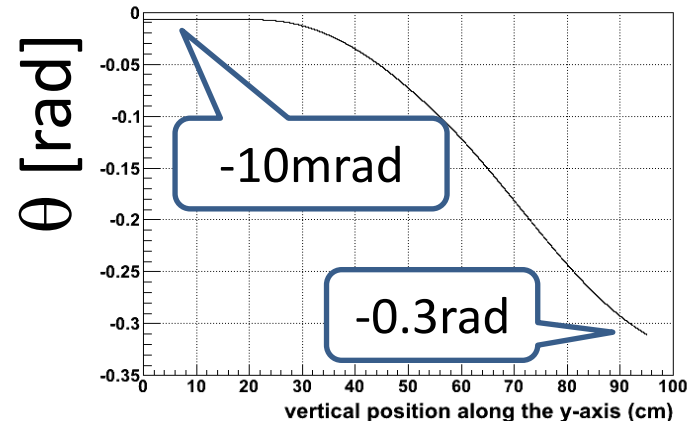
1.  $B_r \times B_y > 0$
2. 滑らかな $B_r$
3. Maxwell方程式

$$\frac{\partial B_r}{\partial r} + \frac{B_r}{r} + \frac{\partial B_y}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial B_r}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial r} = 0$$

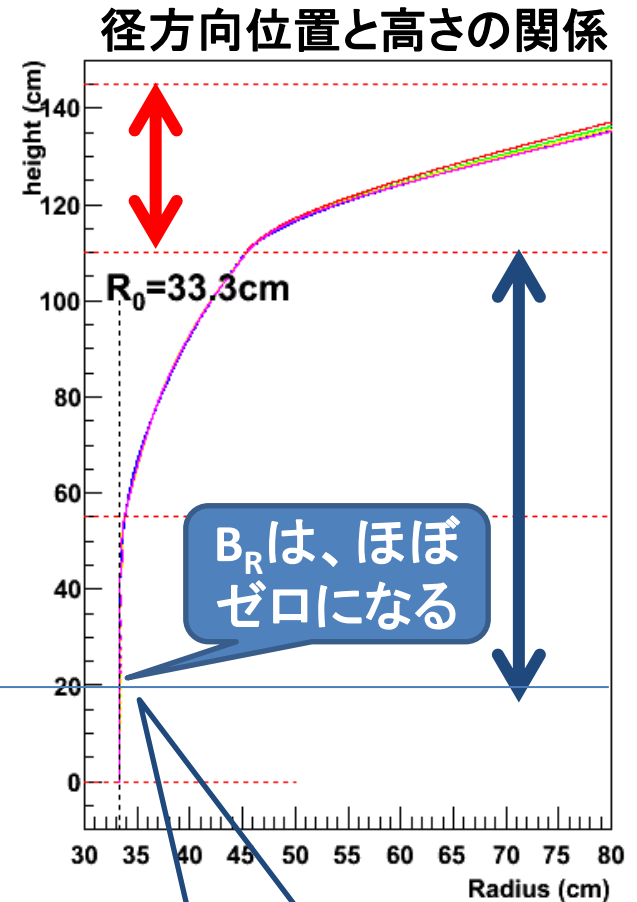
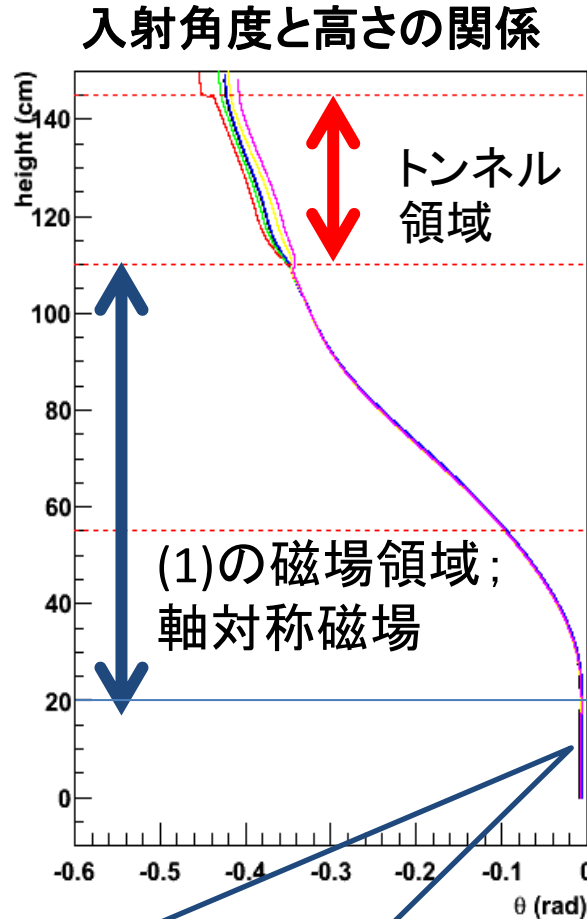
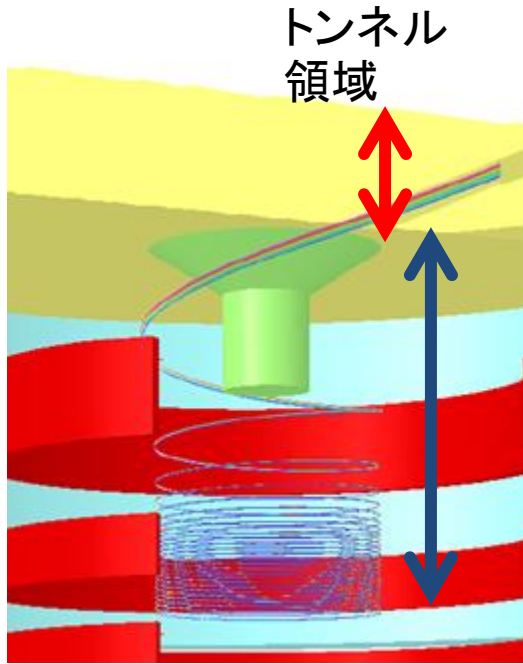
初期条件:  $y=0$ のとき、 $B_r=0$   
で、軌道は $r=33.3\text{cm}$ の円  
より、 $y$ - $R$ 形状が決まる。  
→ 基準軌跡を決めてしまう。

軌跡に沿った軸対  
称な磁場分布、  
 $B_R(y,R)$ ,  $B_y(y,R)$ がも  
とまる。



# 決定した基準軌跡

(高さ20cm地点の進入角度を-7mrad から -9mradで複数候補)



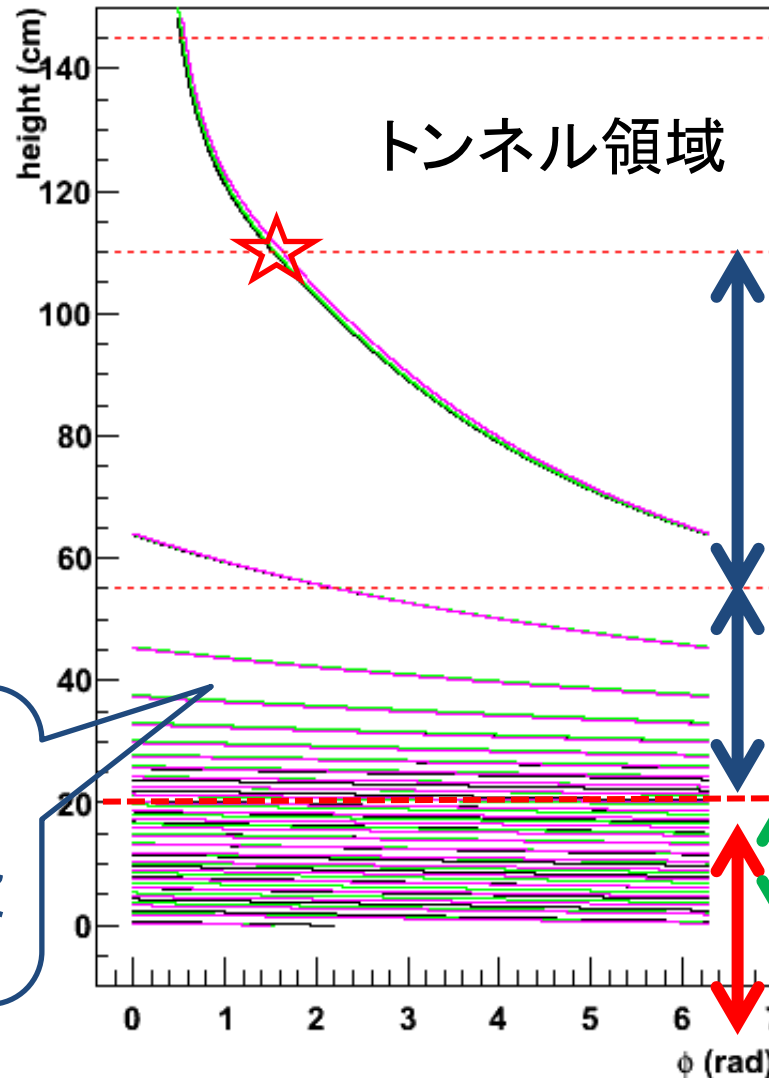
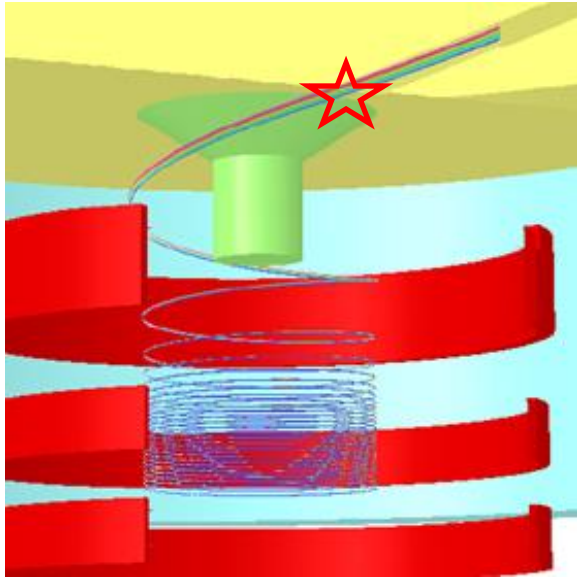
最終的な進入角度-6mrad から -9mradの間になるように複数候補を決める

回転半径はどの候補でも33.3cm

# 決定した基準軌跡の特徴

(進入角度を-7mrad から -9mradの複数候補について)

星印:トンネル出口



高さ110cm

高低差55cmを  
1回転で抜ける

高さ55cm

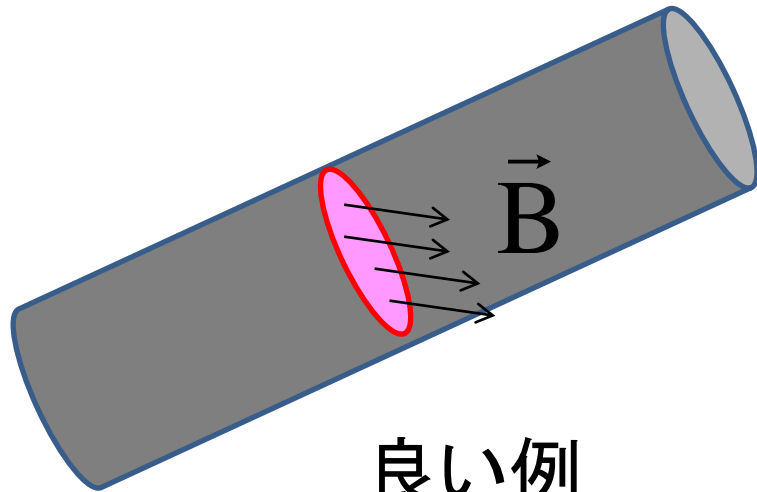
10~20回転

高さ20cm

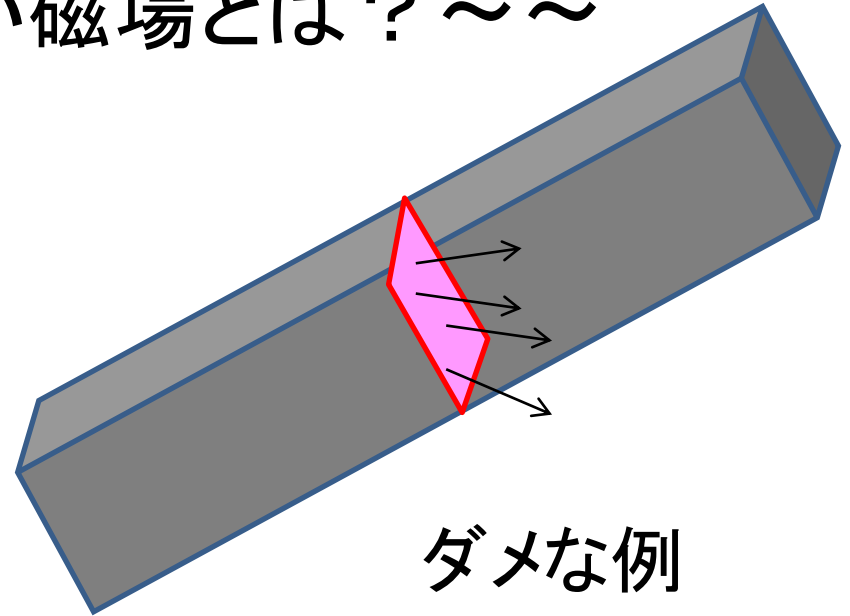
キッカー、収束磁  
場で軌道を調整

-7mrad から -9mradの  
候補によって回転数が  
変わる;磁場キッカー設  
計と兼ね合い

## (2) 天板のトンネル形状決定 ～～通り抜けやすい磁場とは？～～



良い例



ダメな例

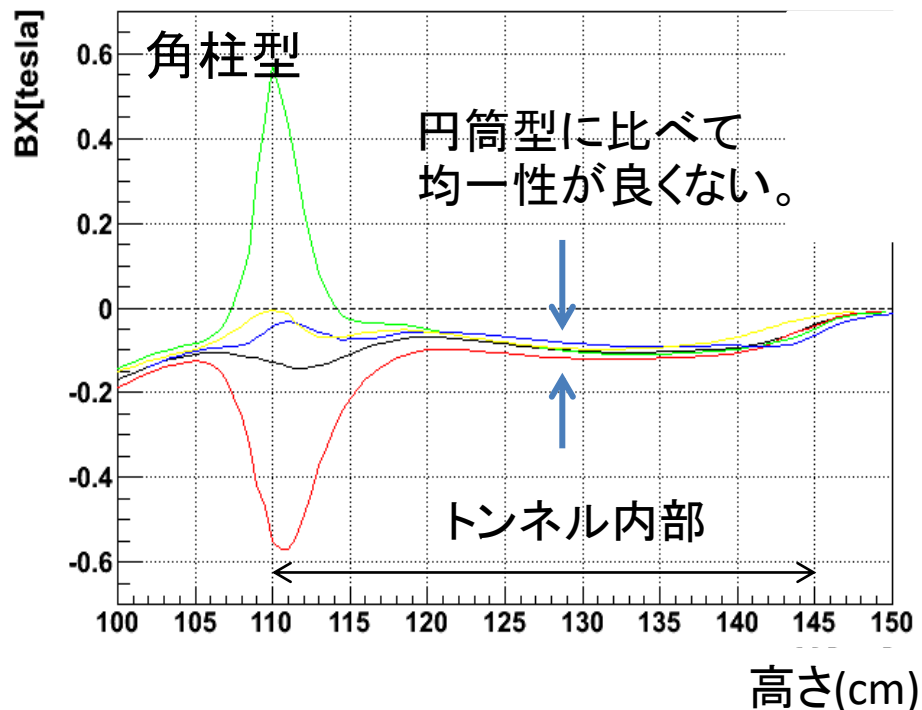
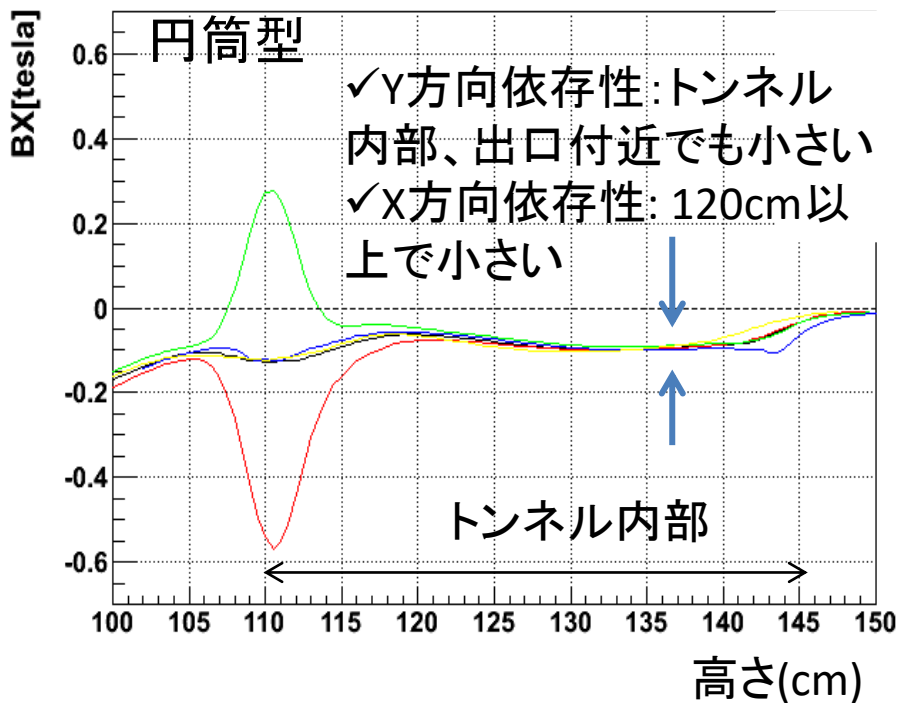
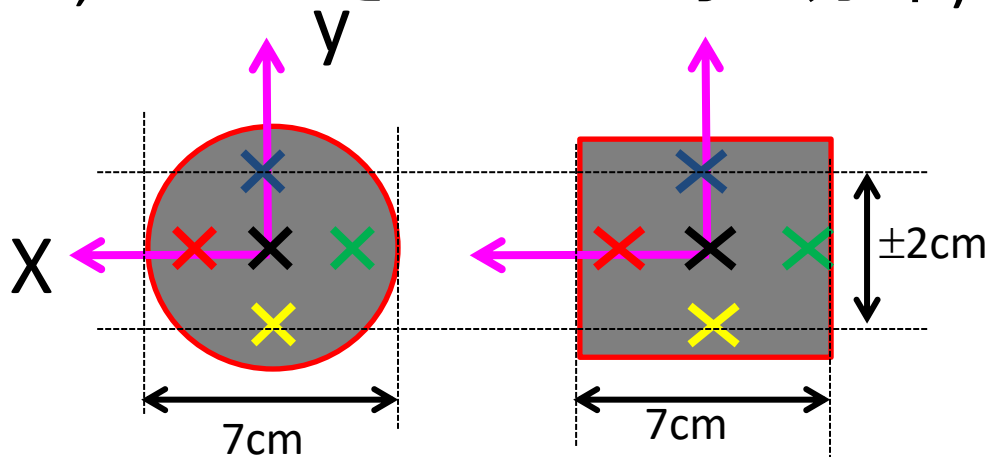
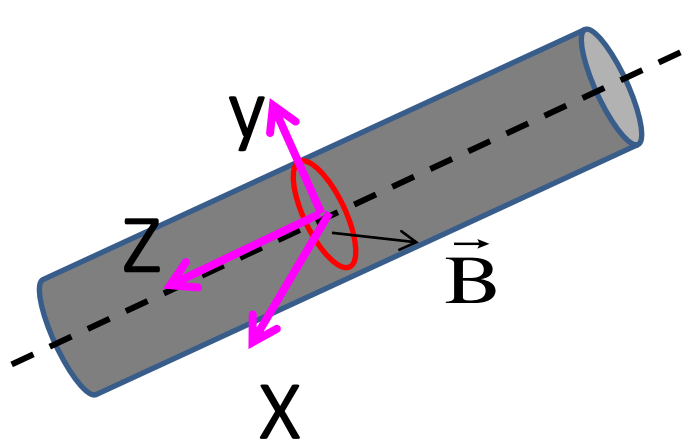
- トンネル断面平面上の磁場分布が均一であること。
- 均一であれば、必ずしも、トンネル内の磁場がゼロでなくても良い。
- ただし、まっすぐトンネルにするには、内部磁場は小さい方が良い。

- 半径3.5cmの円筒、1辺が3.5cmの角柱のトンネルを試す。
- 円筒の方が良い。特に、高さ105~120cmのトンネル出口付近の磁場分布に違いがでる。
- 120~145cm領域を見ても、やはり円筒の方が断面平面上の磁場分布が均一

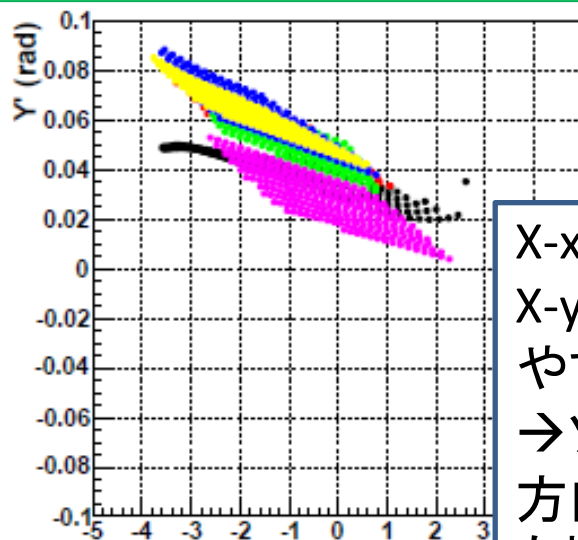
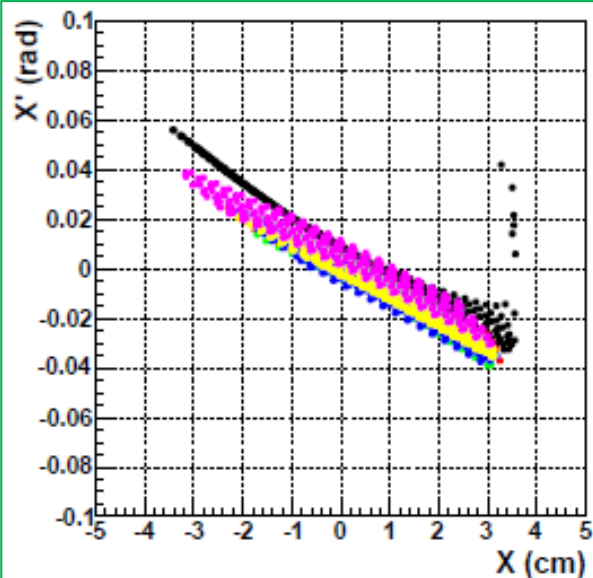


# トンネル内の断面の磁場分布比較

(主成分のBXについて。BY, BZは小さい+ほぼ均一分布)

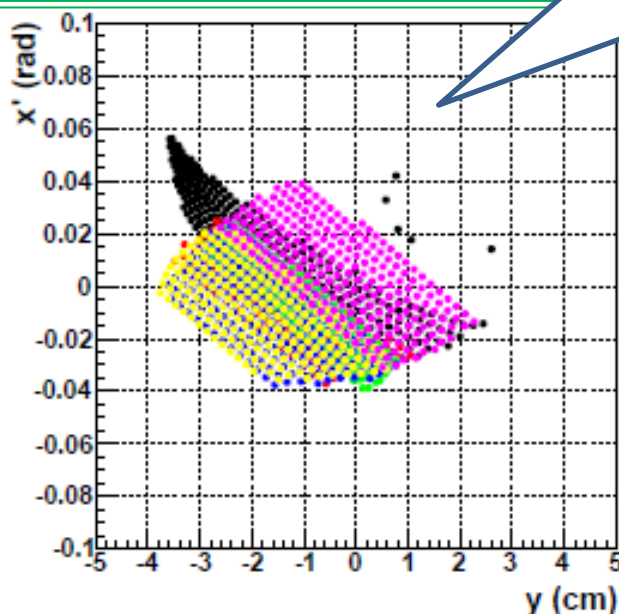
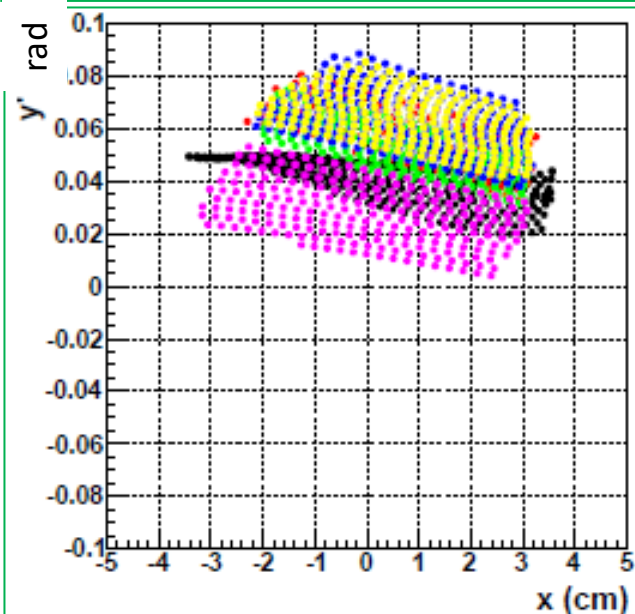


# トンネル入り口、出口の位相空間分布



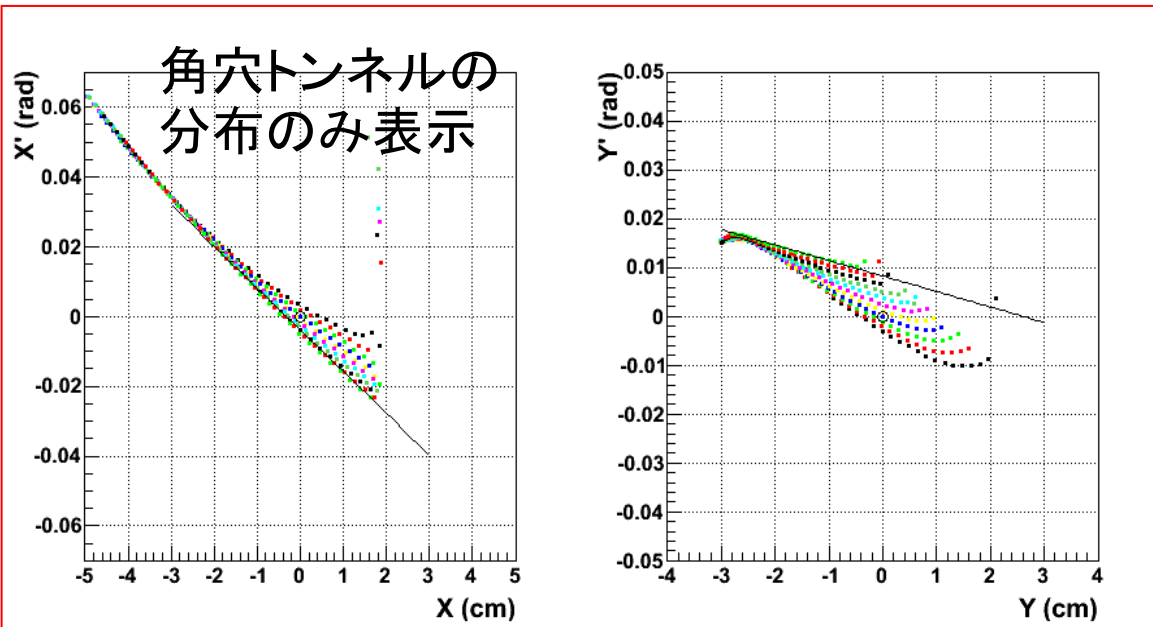
黒色:角穴トンネル  
その他の色:丸穴トンネル、  
6~9mradの進入角候補

$X-x'$ ,  $y-y'$ 分布よりも、  
 $X-y'$ ,  $y-x'$ 分布表示の方が分かり  
やすい。  
→ソレノイド磁場は径方向と軸  
方向の相関が強い。トンネル内  
も相関が残る。

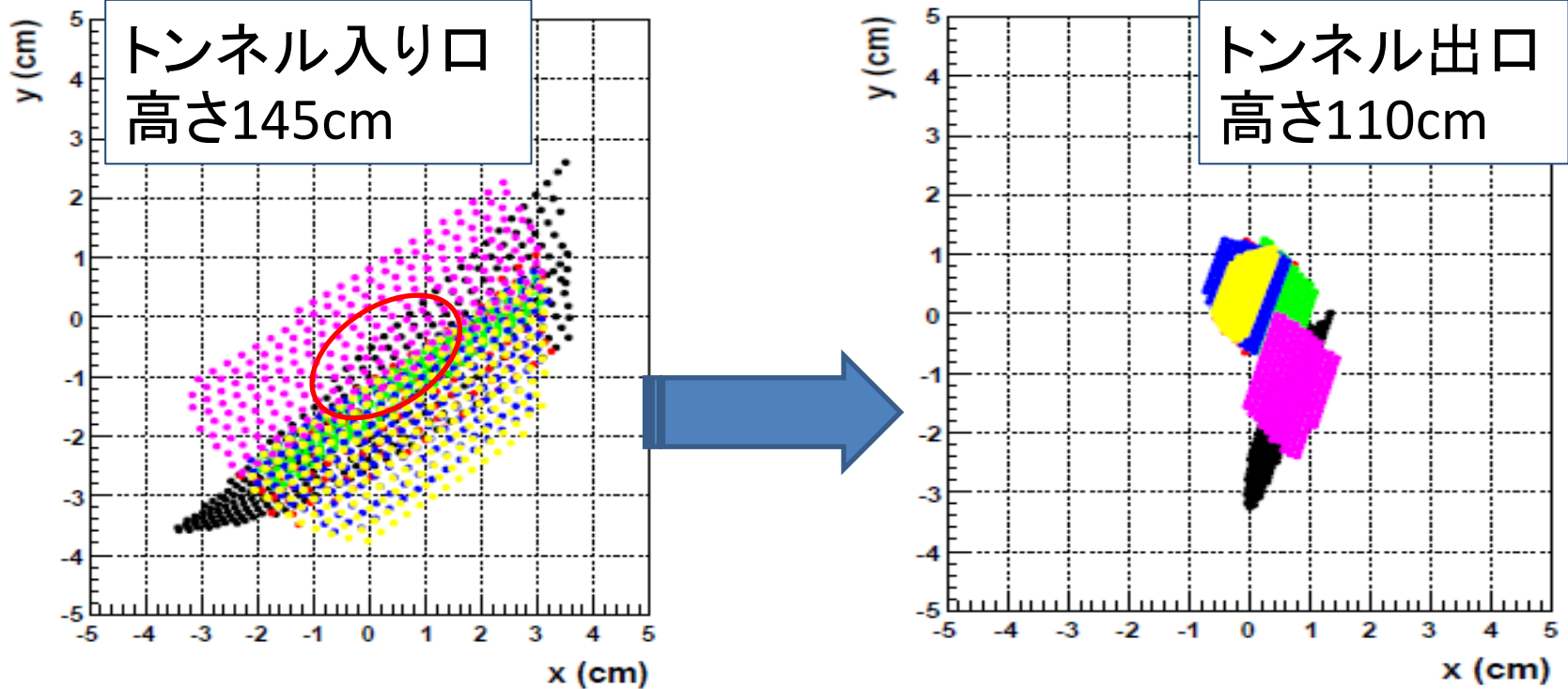


**トンネル出口  
高さ110cm**

“ローカルに線形な相  
関”なら、ビームをその  
ように作れる！



# トンネル断面でスライスした、 ビームの空間分布



- 高さ145cm地点から、 $\pm 1$ cm程度で、“ローカル線形の相関”条件を満たす初期条件をランダムに作り入射を試すと、高さ20cm地点で、 $\pm 1$ mrad以内の進入角広がり、高さ広がり $\pm 2$ cm程度で入射できる。→この分布に適したキッカー磁場を作る。
- トンネル入り口から遡り、LINAC出口までの輸送ライン設計取組中
  - ✓ LINAC出口: ガウス分布と過程 (具体的なビームパラメタが必要)
  - ✓ 適切な相関(ソレノイド軸方向と径方向の間)を持たせる。

### (3) キッカー装置軸対称径方向パルス磁場 $B_{kick}(t)$

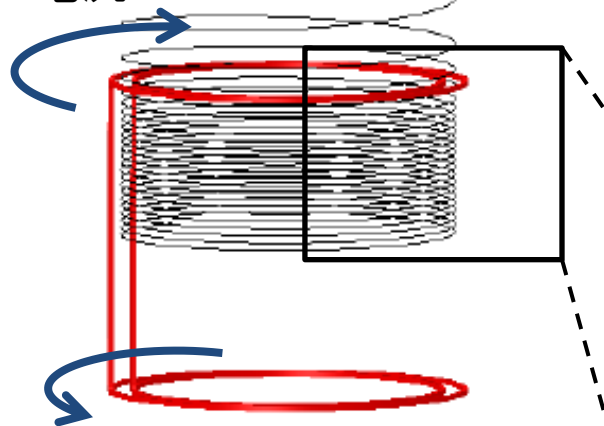
$$B_{kick}(t) = B_{peak} \times \sin(\omega t)$$

$$\omega = \pi / T_{kick}$$

- ✓ ソレノイド軸方向の動き  $\sim 10\text{mrad}$  を垂直キックする
- ✓ 磁場の強さ:
  - ピークで  $1 \sim 10$  ガウス程度
- ✓ 時間形状:
  - $T_{kick} = 150 \text{ nsec}$  (c.f. 20周くらい分)
- ✓ 空間分布:
  - 径方向  $33\text{cm} \pm 5\text{mm}$  範囲で  $1\%$  程度の均一度
  - ソレノイド軸方向 (高さ)  $\pm 10\text{cm}$  程度



パルス電流

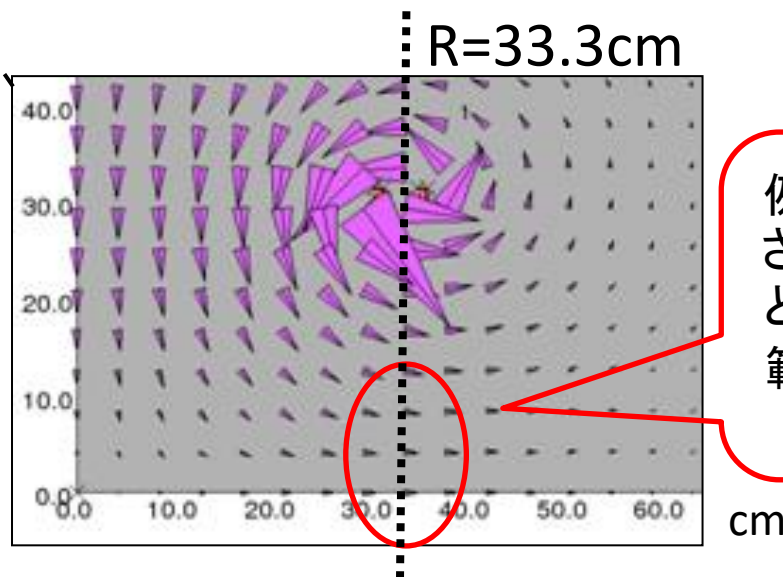


2ペアの内外銅コイル

$$I(t) = I_{peak} \times \sin(\omega t)$$

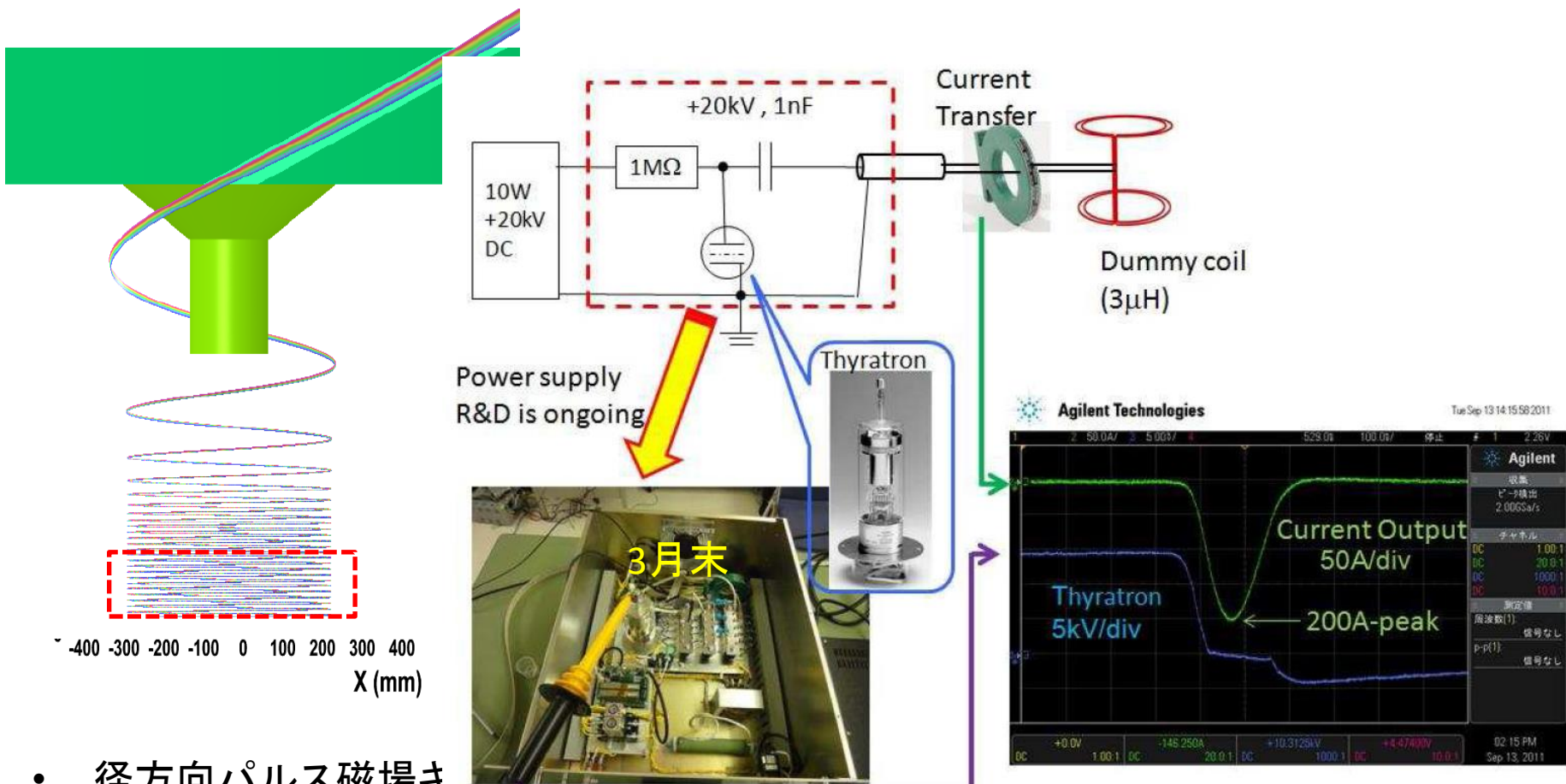
$$\omega = \pi / T_{kick}$$

$$I_{peak} \sim 20\text{A}$$



例: コイルを高さ  $\pm 30\text{cm}$  に置くと、高さ  $\pm 10\text{cm}$  範囲で径方向磁場を得る

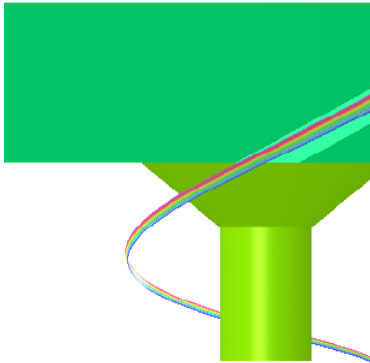
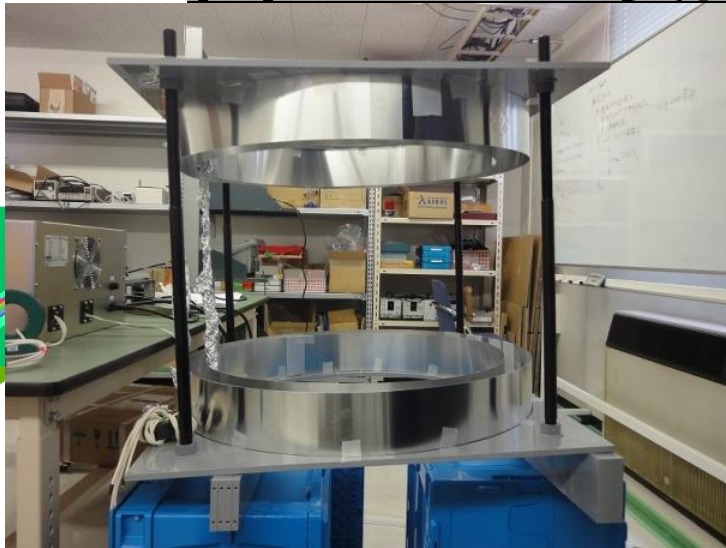
## (2) キッカー装置R&D



- 径方向パルス磁場キ
- $T_{\text{kick}}/2 = \sim 200\text{nsec}$  半サイン形状
- ピーク磁場  $B_0 = 1.5\text{ gauss}$

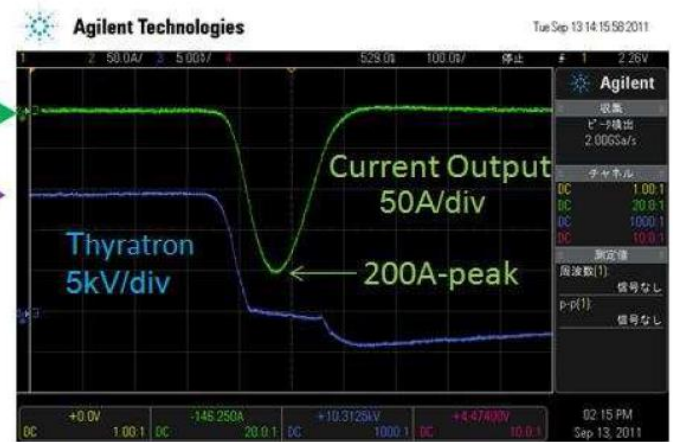
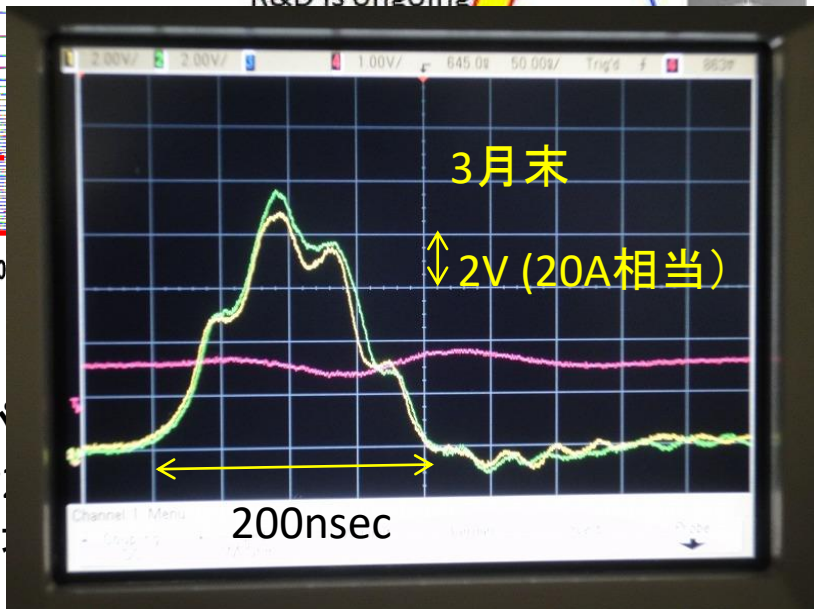
- ✓ 内コイル、外コイルそれぞれに流れる電流を測っている。
- ✓ 波形歪み除去が課題

## (2) キッカー装置 R&D



Power supply  
R&D is ongoing

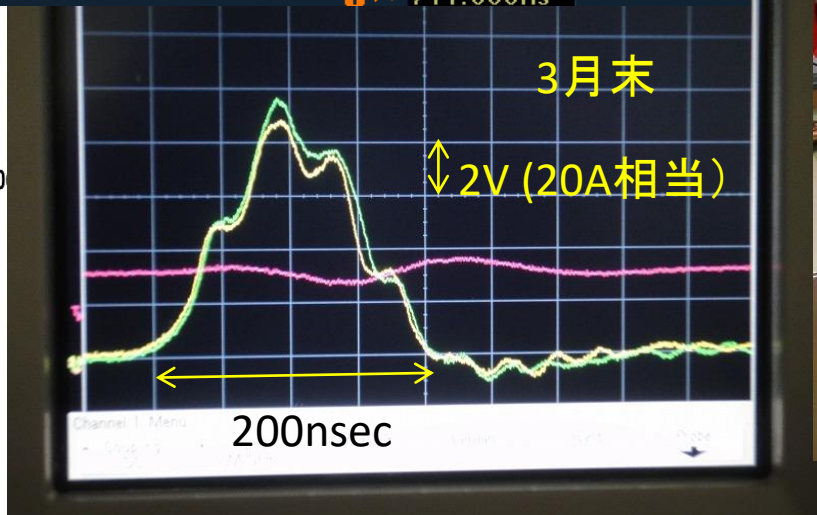
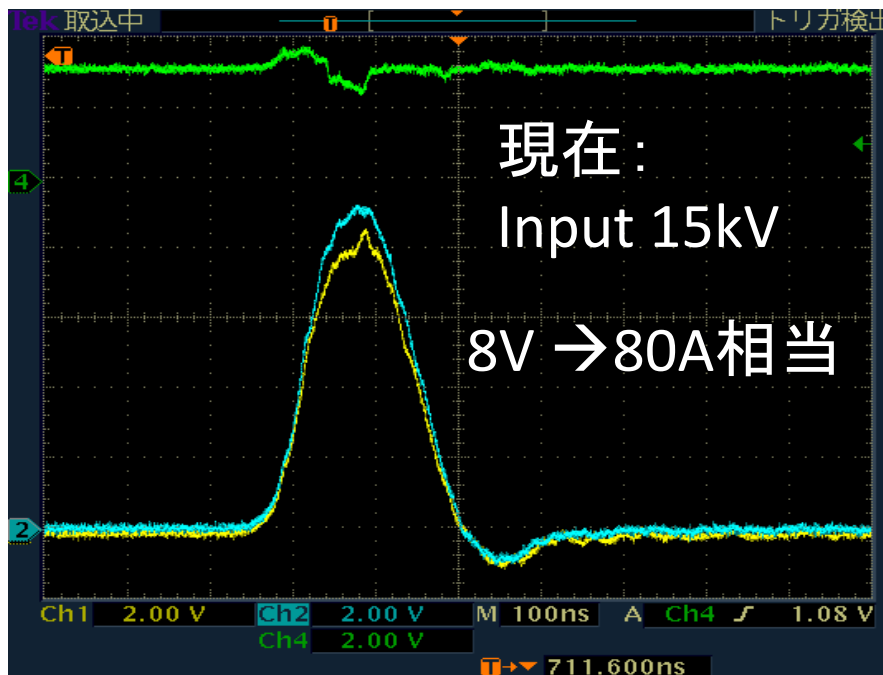
Thyratron



- 径方向バ
- $T_{kick}/2 = \sim$
- ピーク磁

- ✓ 内コイル、外コイルそれぞれに流れる電流を測っている。
- ✓ 波形歪み除去が課題

## (2) キッカー装置



✓ 波形歪み除去が課題



# まとめと今後

- (1) 3次元螺旋軌道入射の、天板から蓄積領域までの軌跡、磁場形状を決定
- (2) 天板のトンネル形状を調査: ビームが通り抜けやすい磁場の条件を出す。
- (3) ビームの垂直方向の運動を停める手法: キッカー装置軸対称パルス磁場  $B_{kick}(t)$  を使う。テストベンチで原寸サイズのカickerコイルをテスト中。
  - パルス幅200nsec, peak ~ 数ガウス程度

## A) 入射:

- トンネル入り口から遡り、LINAC出口までの間の輸送路を設計
- 種々のトンネル半径を試し、出口付近の磁場調整を行う。

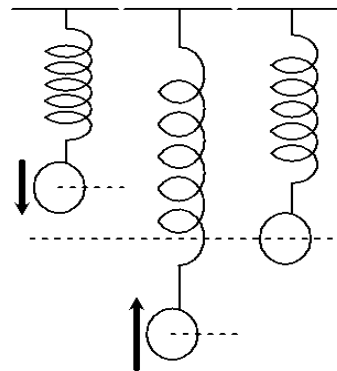
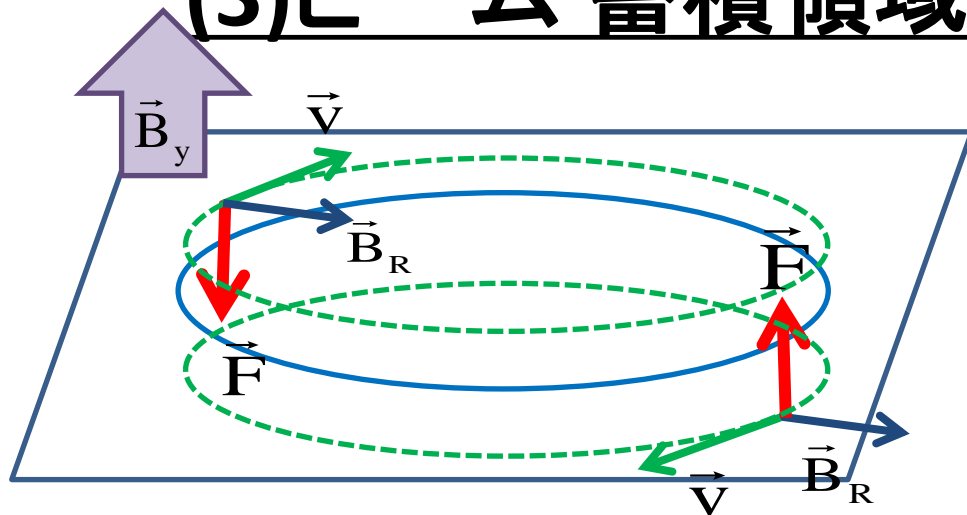
## B) キッカー:

- 磁場測定システムの立ち上げ
- 入射ビームの位相空間分布に即した磁場形状に調整

## C) 弱収束静磁場 (Backup参照)

- ~0.5ガウス程度なら歳差運動への影響は10ppbオーダーで問題ない。  
(理想的な場合)
- 蓄積領域の磁場調整とスピントラック解析:
- 誤差磁場の3次元分布見積もりと歳差運動への影響調査

# (3) ビーム 蓄積領域の弱収束静磁場



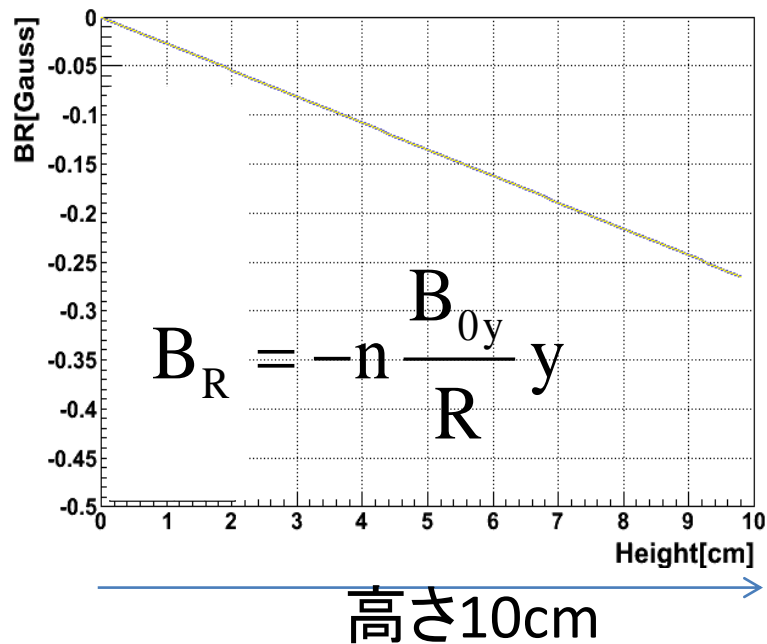
$$B_R = -n \frac{B_{0y}}{R} y, \quad n = -\frac{R}{B_{0y}} \frac{\partial B_y}{\partial r}$$

$$B_y = B_{0y} \left( 1 - n \frac{r}{R} \right)$$

**n < 1: 径方向収束**

**n > 0: ソレノイド軸方向収束**

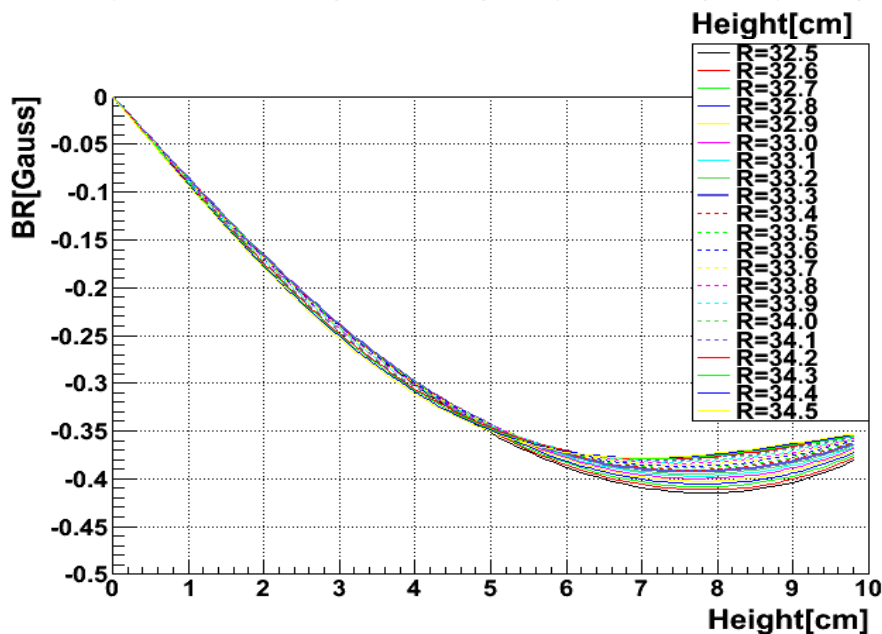
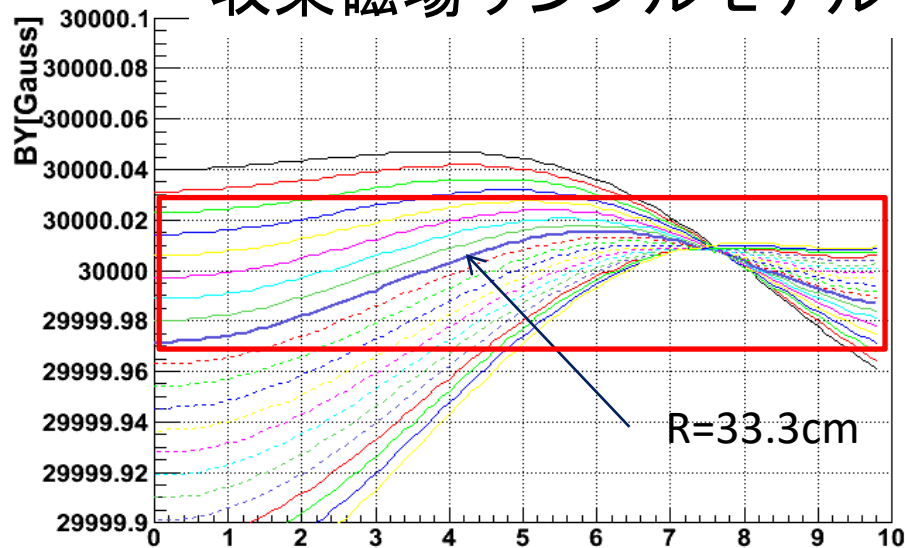
$$\frac{\partial B_y}{B_{0y}} = 0.1 \text{ppm}, \quad \partial r = 1 \text{mm}$$



**n = 10<sup>-5</sup> オーダが適す**

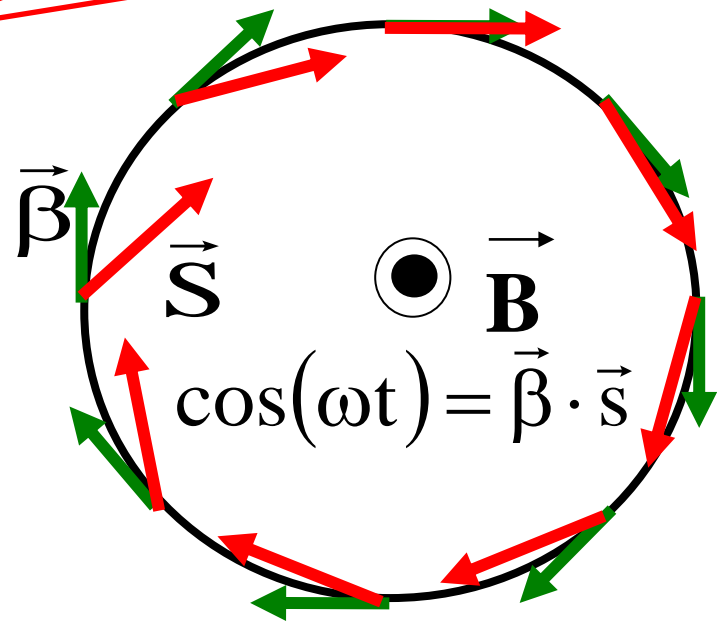
# 弱収束静磁場中の歳差運動は？

収束磁場サンプルモデル



(スピントラック解析)

$$\frac{\partial B_y}{B_{0y}} = 0.1 \text{ppm}, \quad \partial r = 1 \text{mm}$$



$$\frac{\Delta\omega}{\omega} \sim 10 \text{ppb}$$

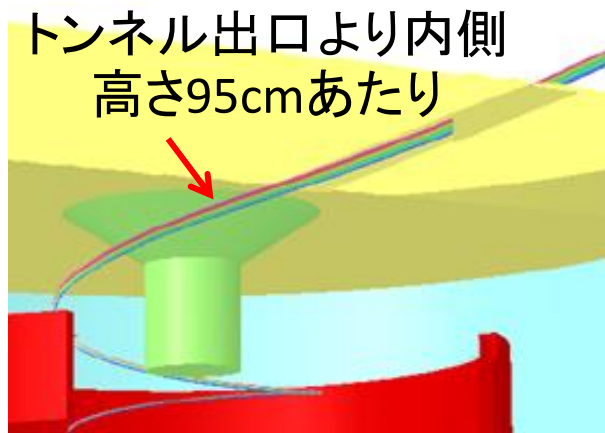
(誤差磁場は考慮せず)

# 基準軌跡まわりのビーム位相空間分布

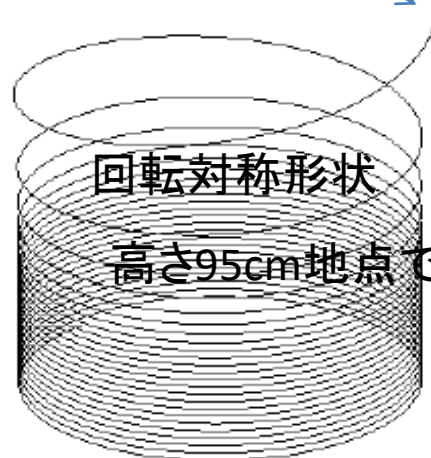
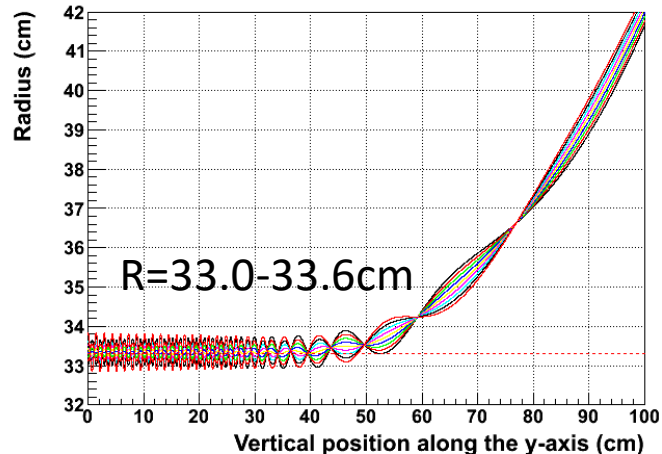
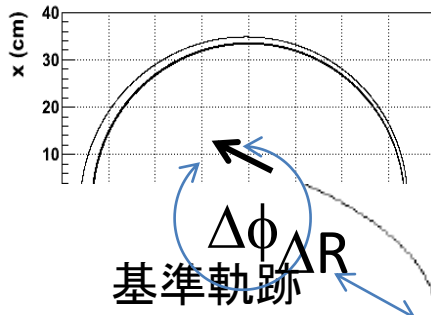
1. 回転対称な軌跡群
  - ◆  $y$ - $R$ 形状が全く同じ
  - ◆  $\Delta\phi \sim \pm 10^\circ$  回転可能
2.  $Y$ - $R$ 形状が異なる軌跡群
  - ◆  $\Delta R \sim \pm 3\text{mm}$ 程度可能

⇒逆入射軌跡を試す

トンネル出口より内側  
高さ95cmあたり



トンネル通過できるか？



高さ95cm地点でのビーム形状 (=位相空間)

