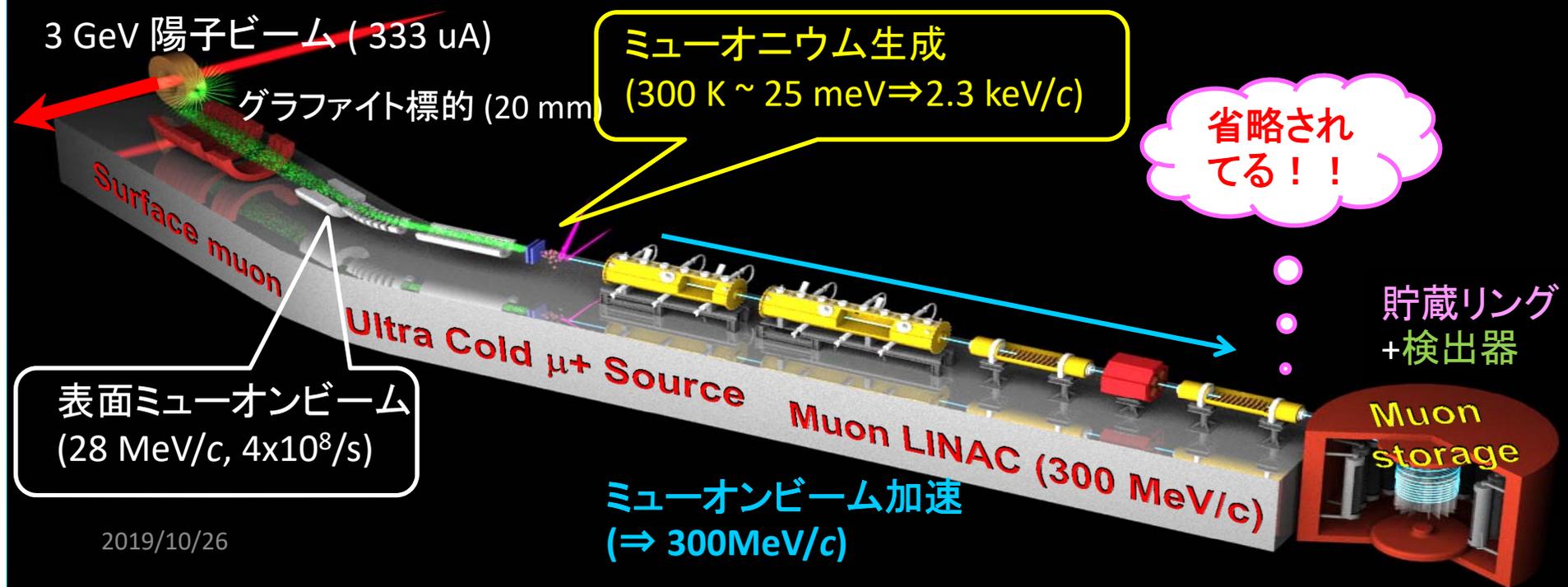


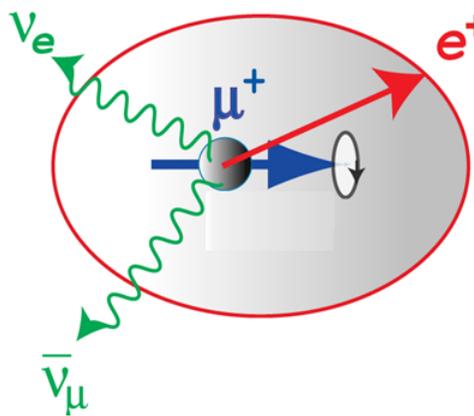
J-PARC ミューオンg-2/EDM実験のための高度のX-Y結合を生成するビーム輸送ライン設計

1. MRI技術を応用し高精度に磁場調整された蓄積磁石内へのビーム入射と蓄積ビームの軌道制御の概要
2. 垂直キッカーの設計(ビーム入射効率アップの鍵)
3. 3次元螺旋入射の実証実験
4. まとめと今後

2010年頃につくったイメージ



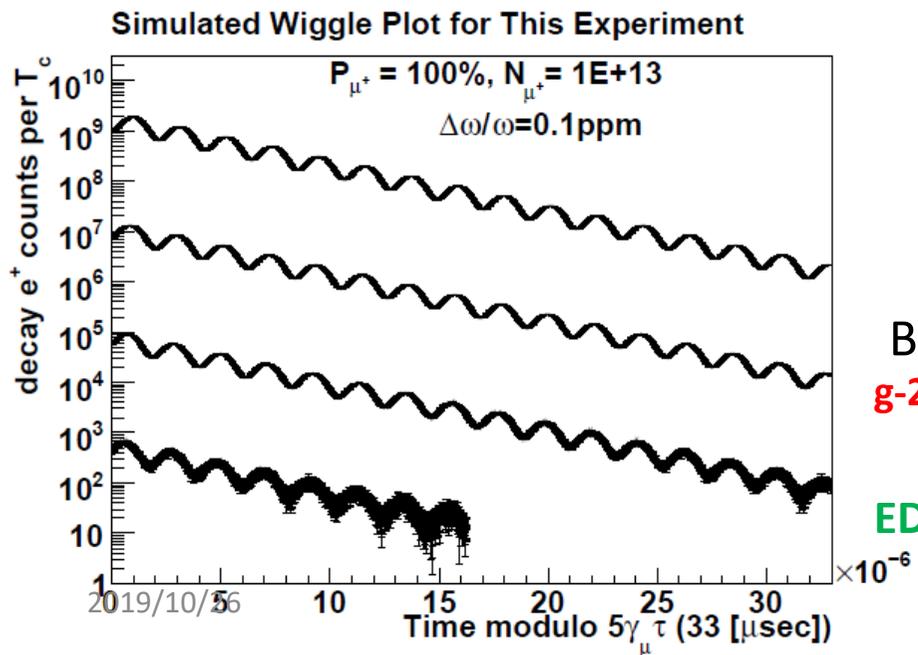
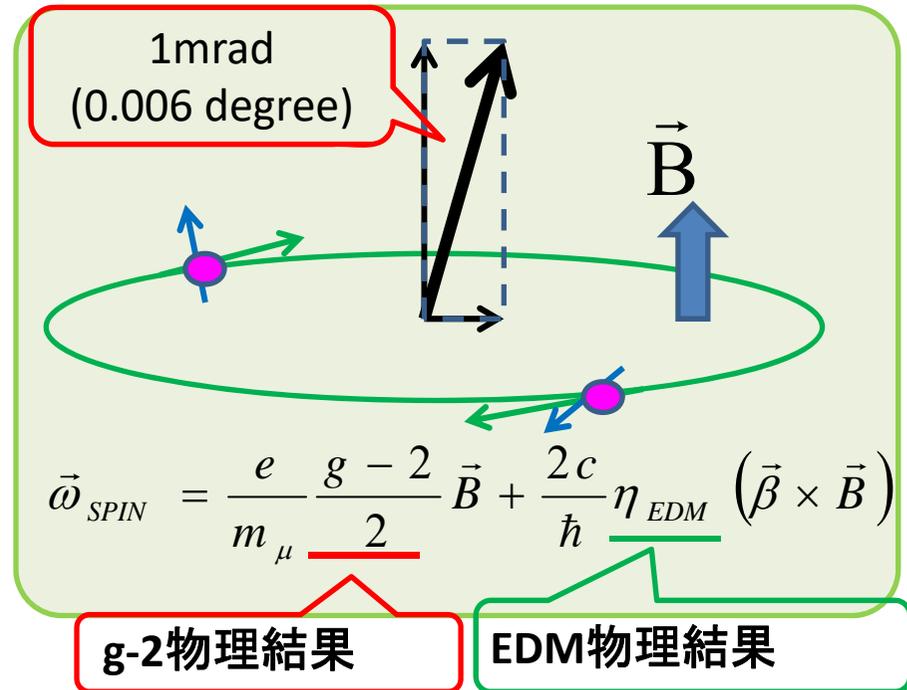
新しい物理はミュオンスピン歳差運動に現れる



e^+ 歳差運動周期と、角運動量ベクトルを精密測定

$$\vec{\mu}_s = \frac{g}{2} \left(\frac{e}{m_\mu} \right) \vec{S}$$

$$N(t) = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\gamma\tau}\right) [1 + A \cos(\omega_{mes}t + \delta)]$$

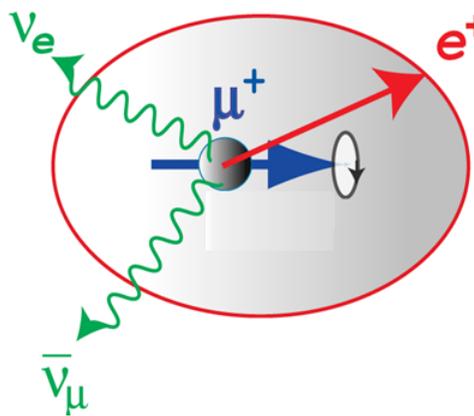


BNL/E821実験
g-2: 0.54ppmで計測
 標準理論と3σのズレ

J-PARC実験目標
精度: 0.37ppm
感度: 1.3e-21 e.cm

EDM: 上限値 ~ 1e-19 e.cm

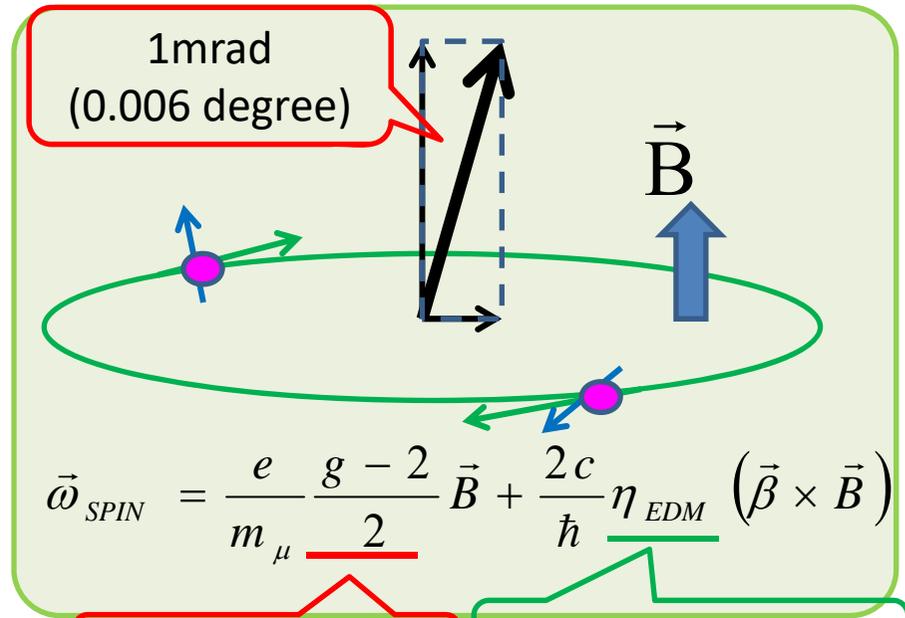
新しい物理はミュオンスピン歳差運動に現れる



e^+ 歳差運動周期と、角運動量ベクトルを精密測定

$$\vec{\mu}_s = \frac{g}{2} \left(\frac{e}{m_\mu} \right) \vec{S}$$

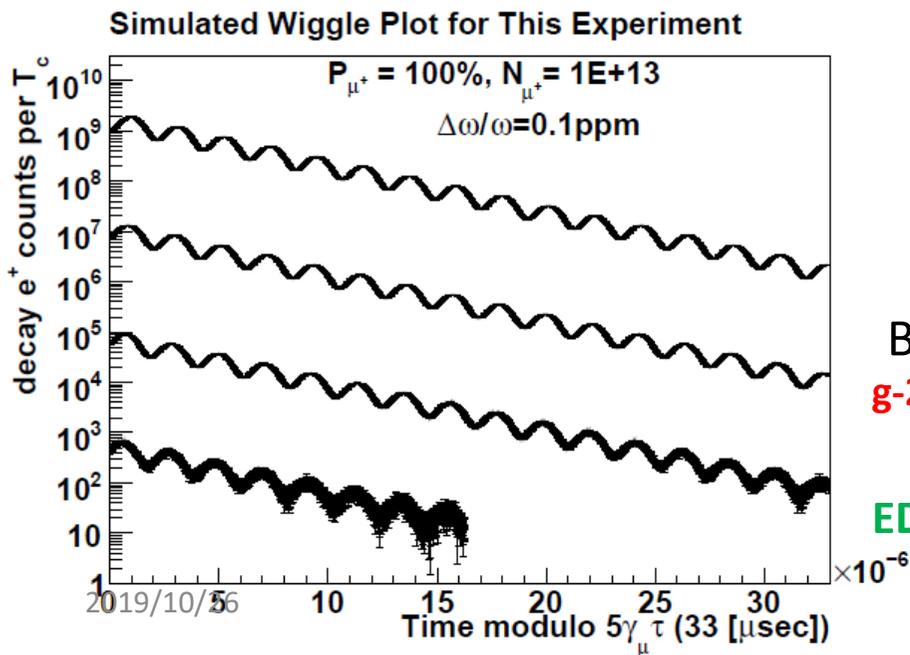
$$N(t) = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\gamma\tau}\right) [1 + A \cos(\omega_{mes} t + \delta)]$$



$$\vec{\omega}_{SPIN} = \frac{e}{m_\mu} \frac{g-2}{2} \vec{B} + \frac{2c}{\hbar} \eta_{EDM} (\vec{\beta} \times \vec{B})$$

物理結果 EDM物理結果

**EDM測定のコモは、
ミュオンビーム軌道
安定制御！！**



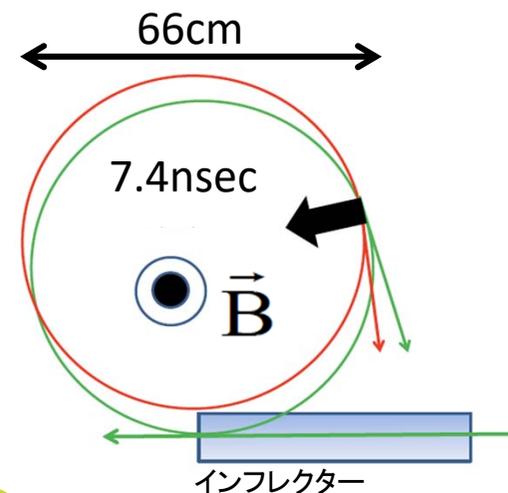
BNL/E821
g-2: 0.54ppm
標準理

EDM:上限値 $\sim 1e-19$ e.cm 感度: $1.3e-21$ e.cm

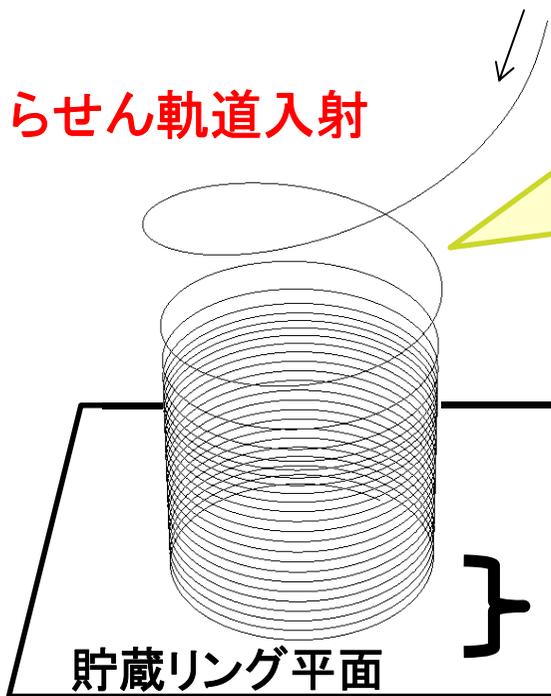
3次元らせん軌道入射手法の開発

コンパクト強磁場リングへの水平入射は技術的に難しい:

- インフレクターで3[T] 磁石のフリンジ磁場を消す
- 1ターン以内に水平キック(~ 60 mrad)



らせん軌道入射



- 入射部と蓄積部を長手方向に距離を取りつつなめらかにつなぐ一体型磁石を採用可能
- 3次元的な動きを止めるキックも1ターン以内にする必要がない。

入射時に貯蔵空間に誤差磁場を与えない



垂直方向キック



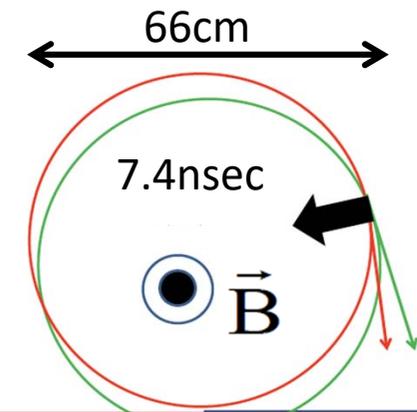
貯蔵リング平面

MRI型ソレノイド磁石1個で入射と蓄積リングを実現！
前例がない。

3次元らせん軌道入射手法の開発

コンパクト強磁場リングへの水平入射は技術的に難しい:

- インフレクターで3[T] 磁石のフリンジ磁場を消す
- 1ターン以内に水平キック(~ 60 mrad)



➤ 入射方法の概念設計

- Three-dimensional spiral injection scheme for the g-2/EDM experiment at J-PARC"

NIM. A: Volume 832, page 51–62 (2016).

➤ 科研費サポートで独自研究

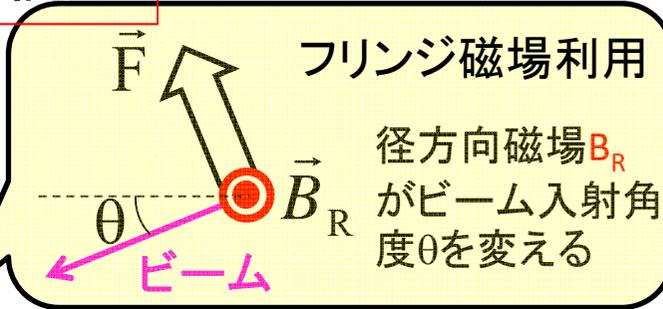
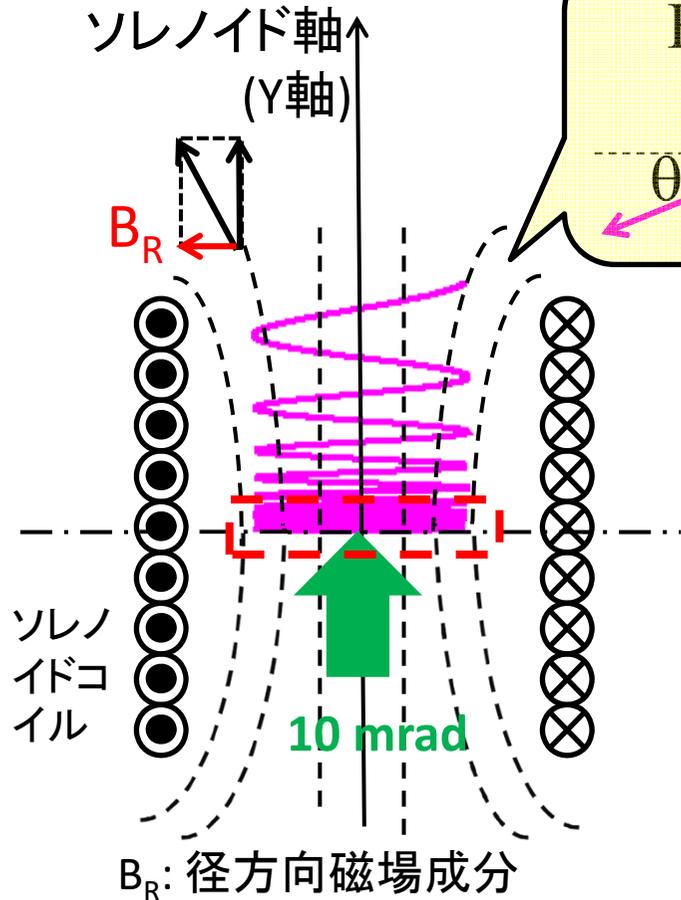
- 3次元らせん軌道ビーム入射のためのパルス状磁場発生装置(垂直キッカー)の開発
若手B:2011年4月~2014年3月
- ソレノイド型蓄積磁石への3次元らせん軌道によるビーム入射の実証試験
基盤B:2014年4月~2018年3月
- ミューオンg-2・EDMの同時測定に向けた、3次元螺旋ビーム入射の精密制御の確立
基盤研究A 課題番号19H00673 (2019-2022)

MRI型ソレノイド磁石1個で入射と蓄積リングを実現!

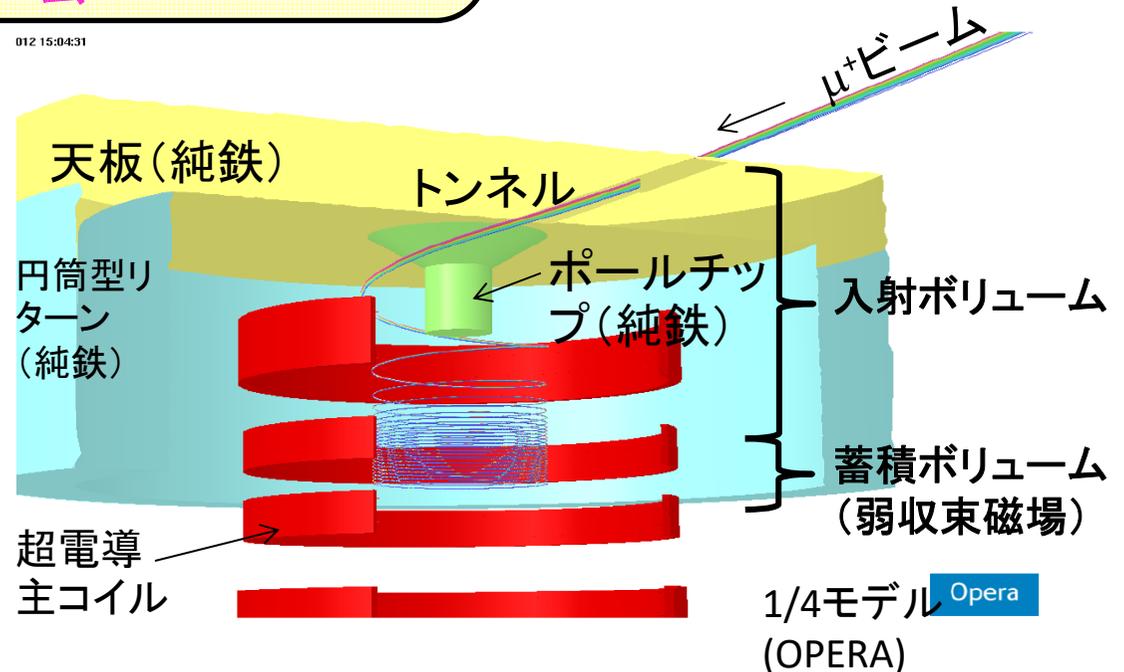
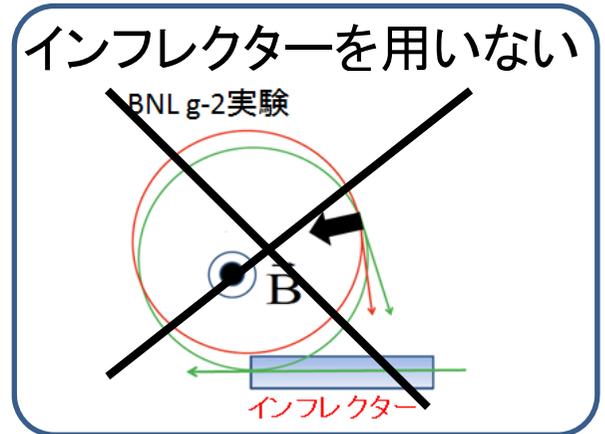
前例がない。

蓄積リング磁場仕様の決定

ソレノイド磁石1個



012 15:04:31

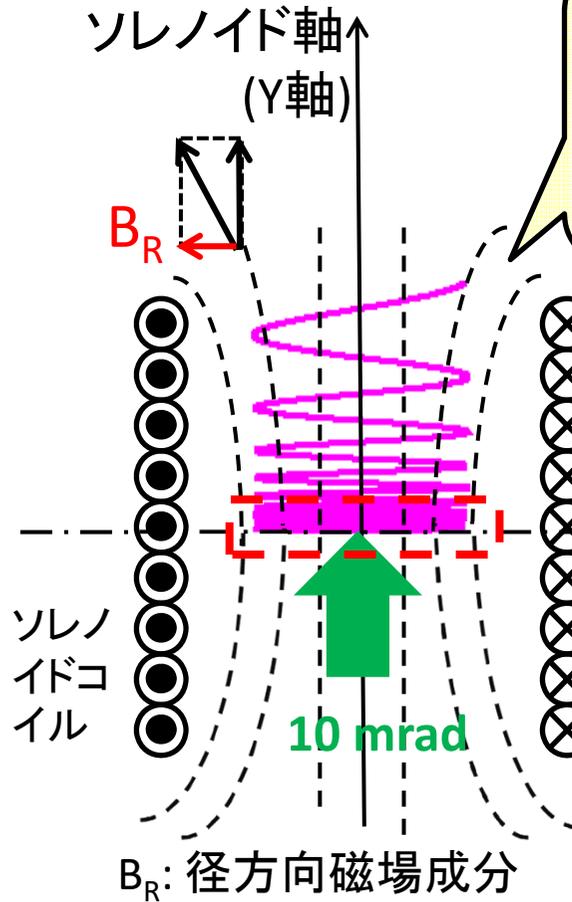


ソレノイド磁石具体設計進行中

- ✓KEK低温センター
- ✓日立研究所と共同研究

蓄積リング磁場仕様の決定

ソレノイド磁石1個

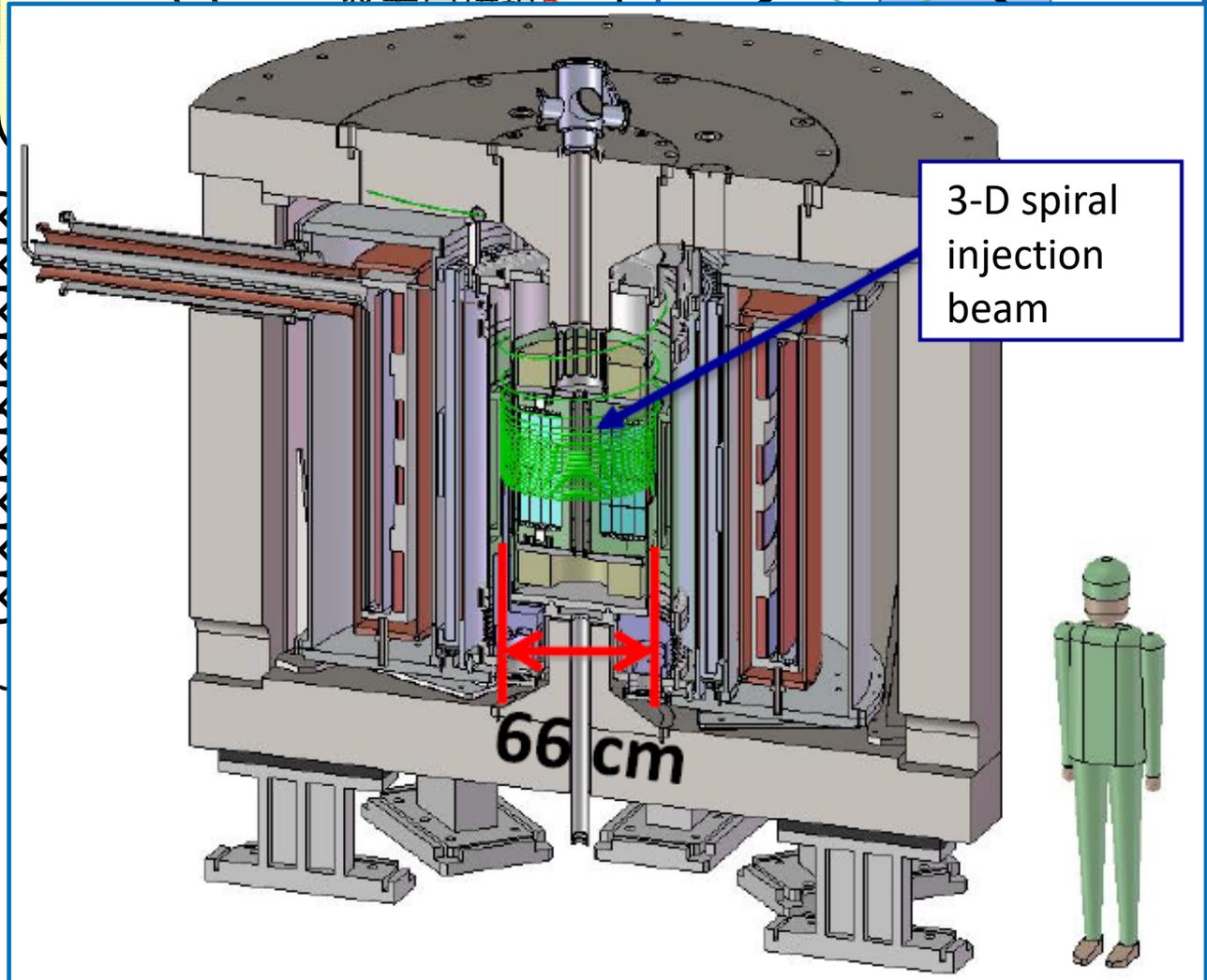


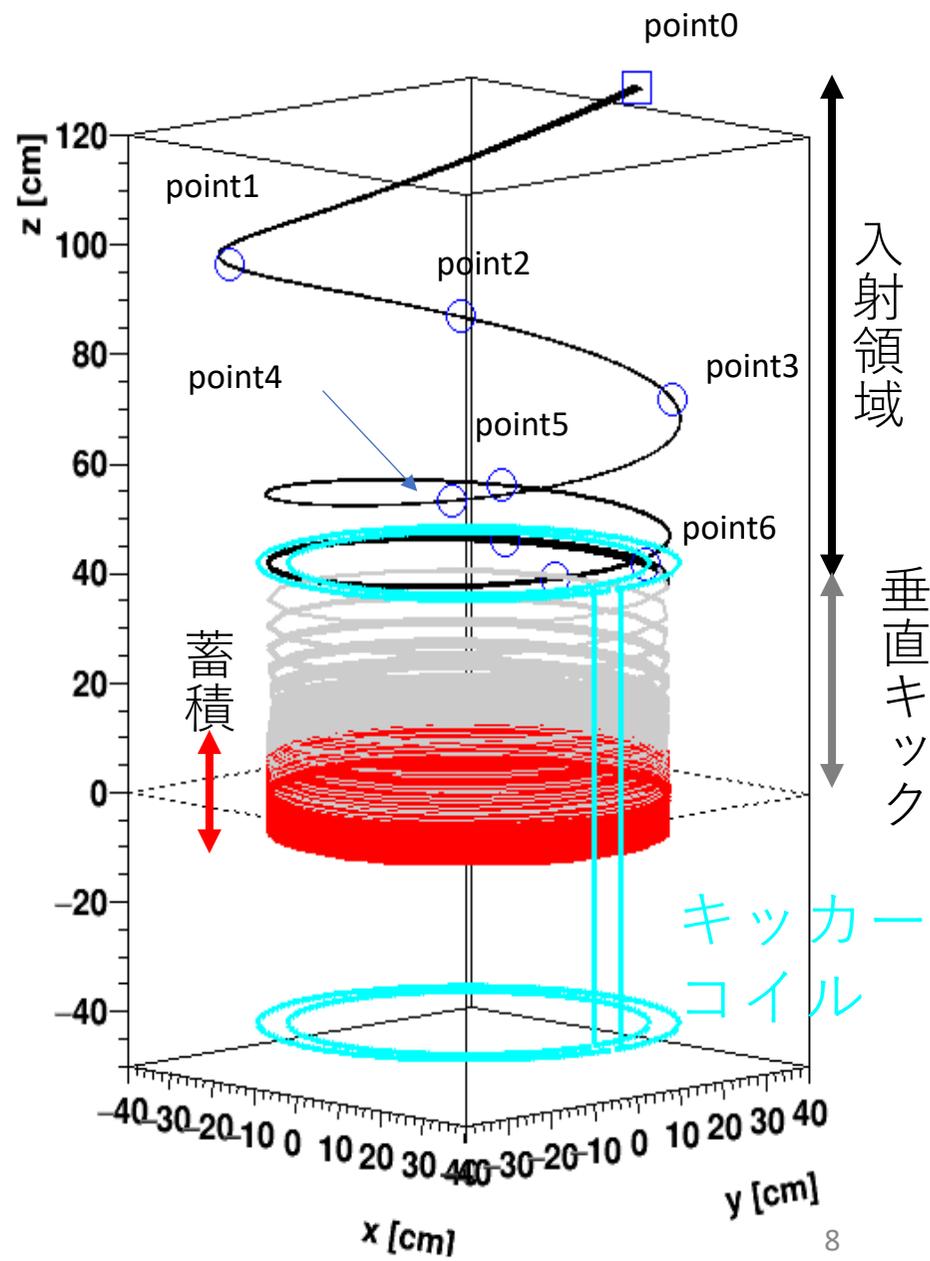
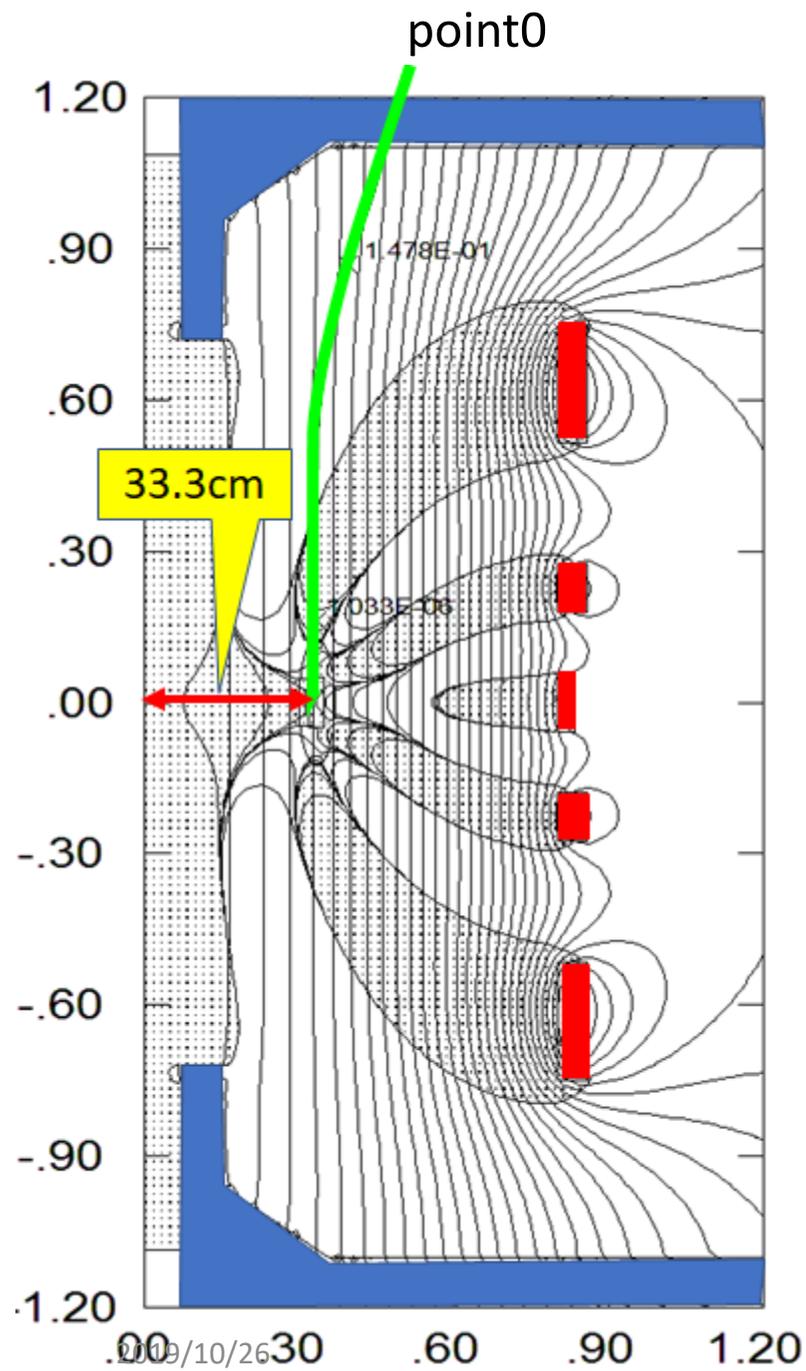
\vec{F} フリンジ磁場利用

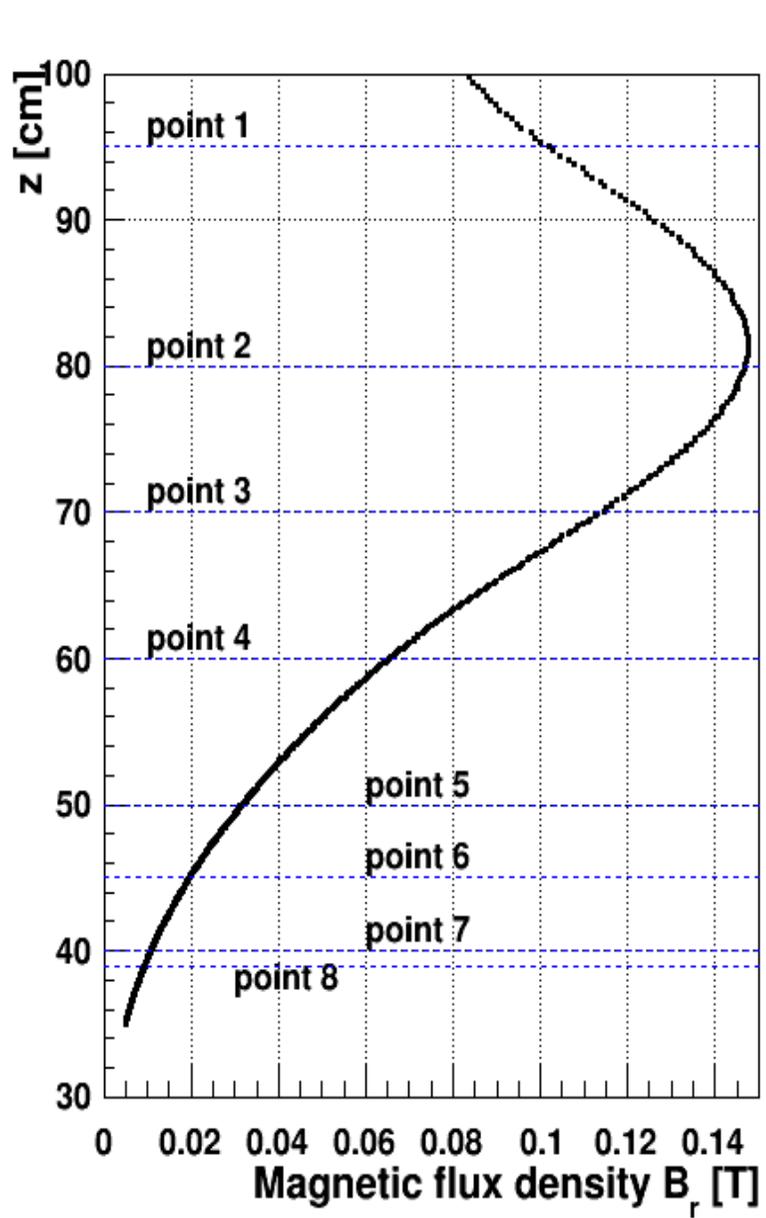
径方向磁場

The diagram shows a yellow callout box with an arrow pointing to the beam path, labeled with \vec{F} and 'フリンジ磁場利用' (Fringe field utilization). Below it, '径方向磁場' (Radial magnetic field) is written.

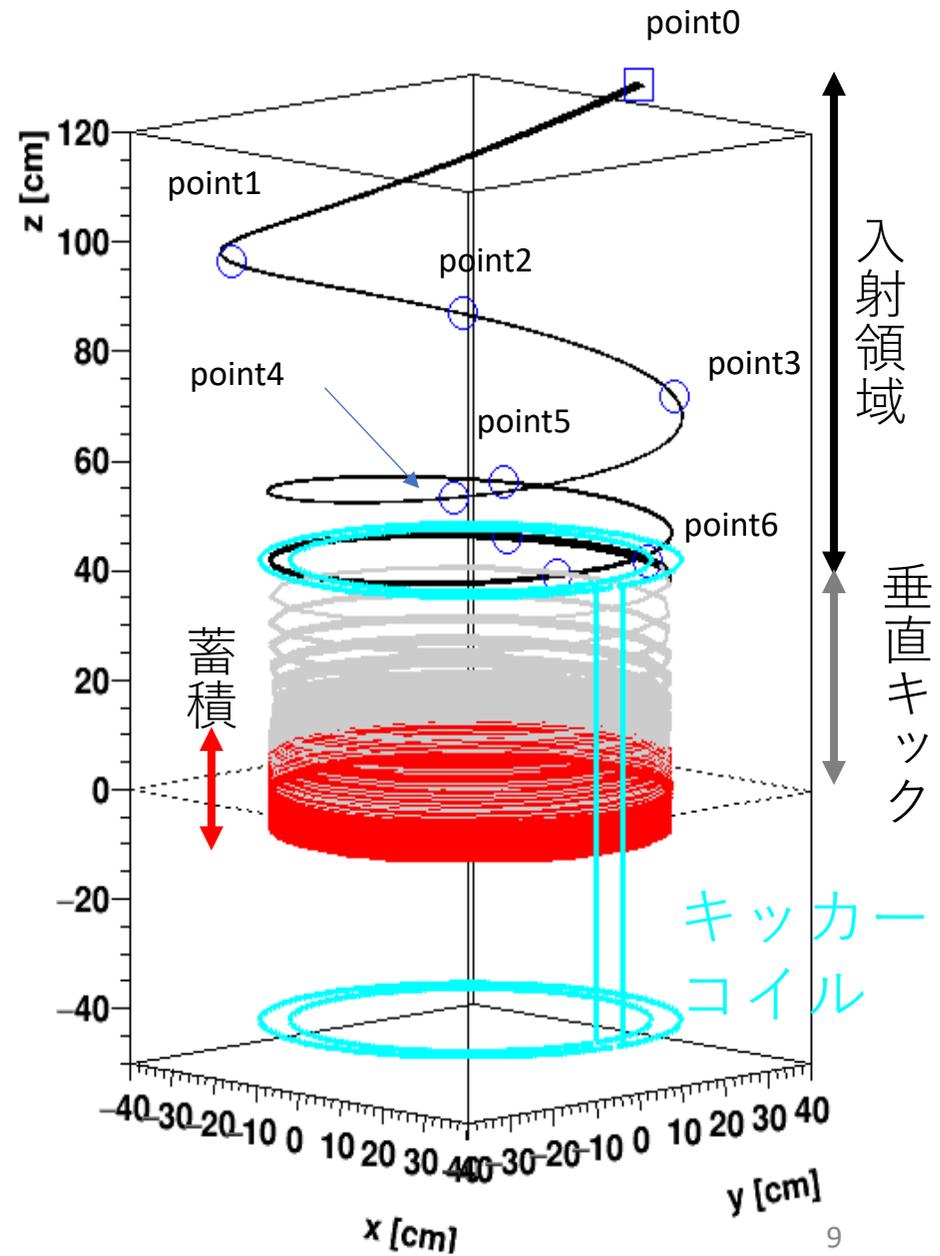
インフレクターを用いない

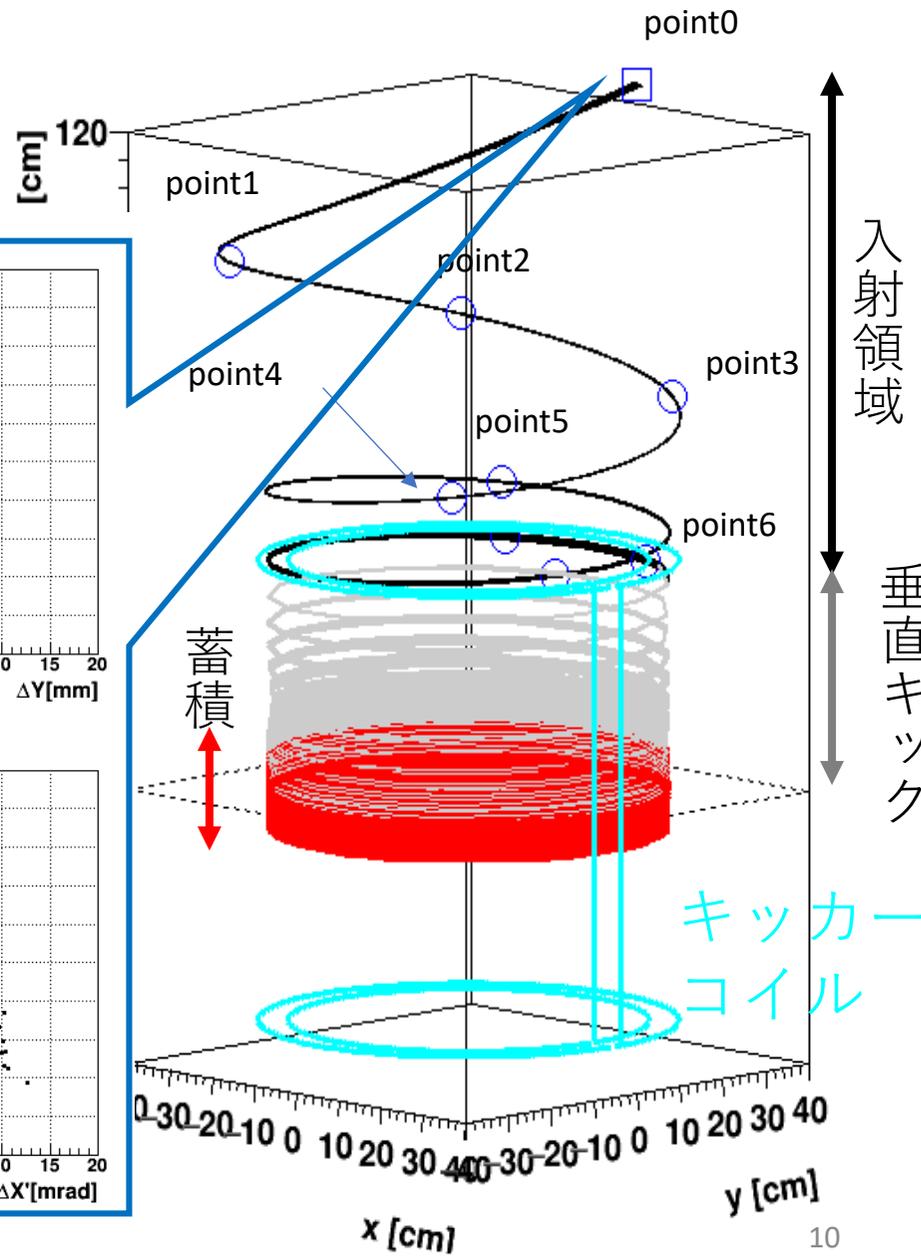
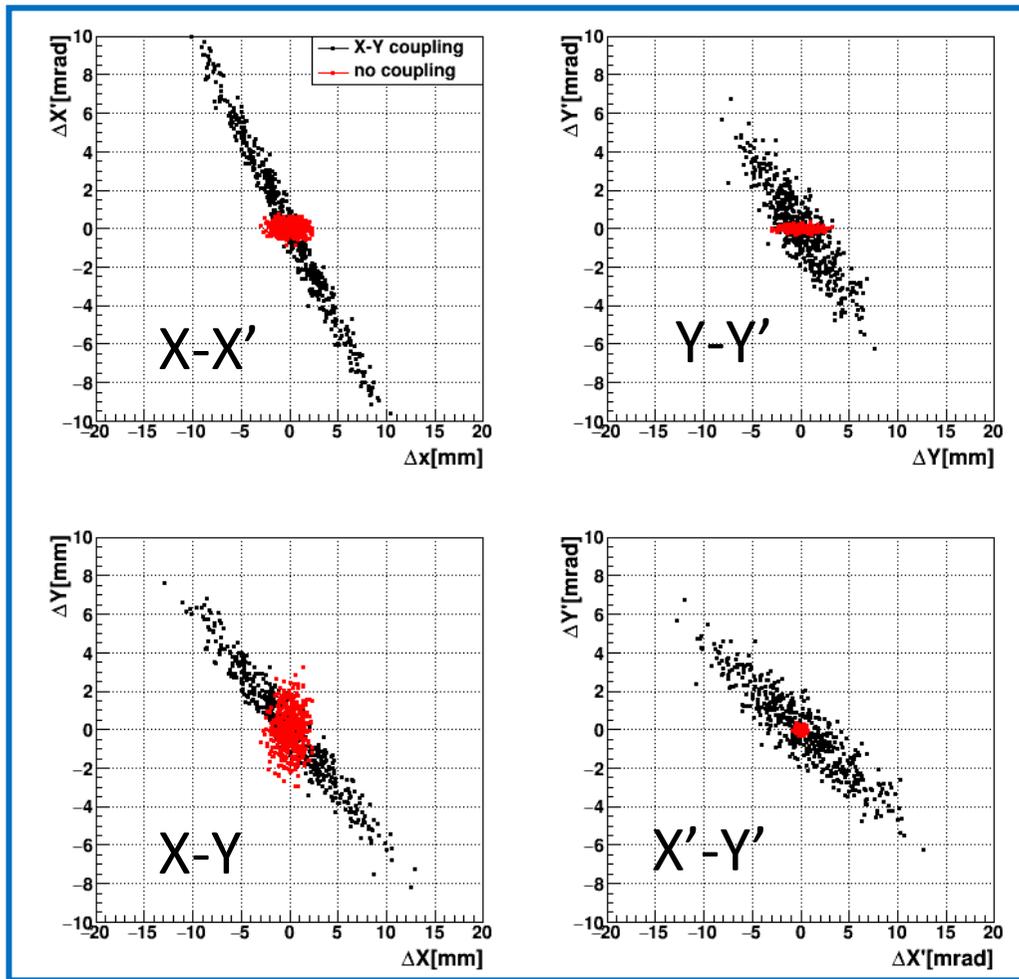
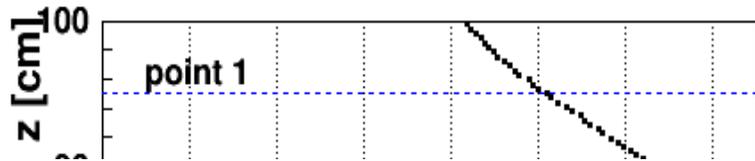




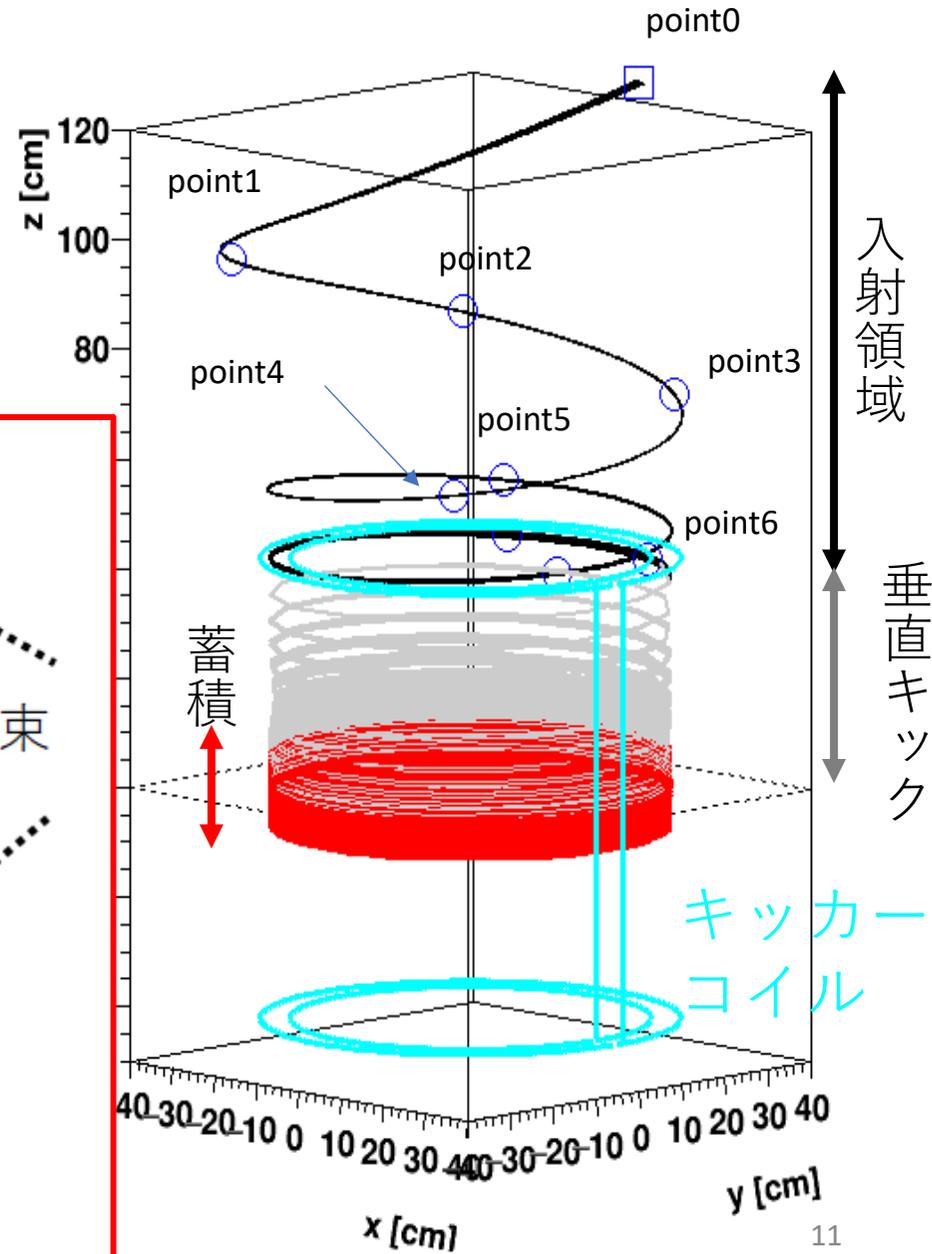
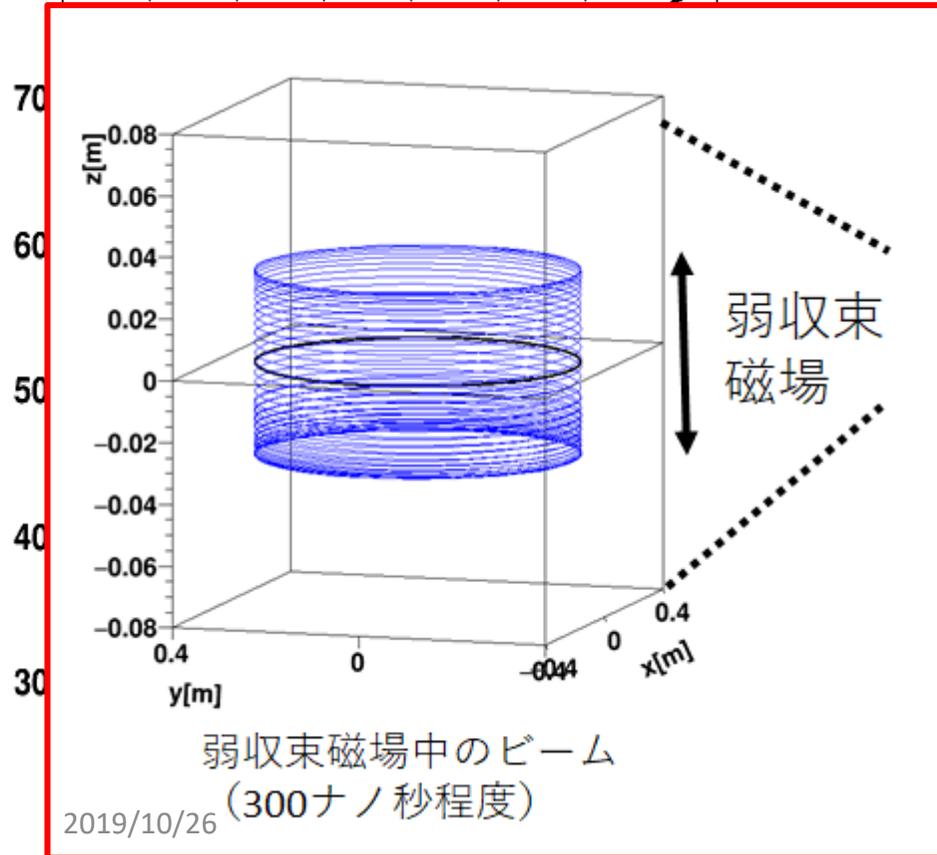
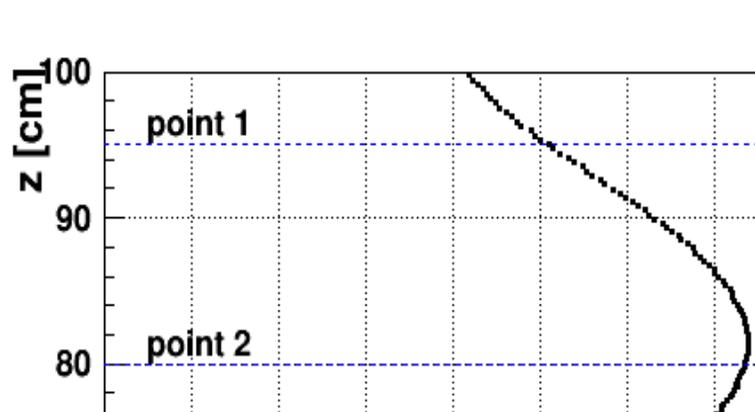


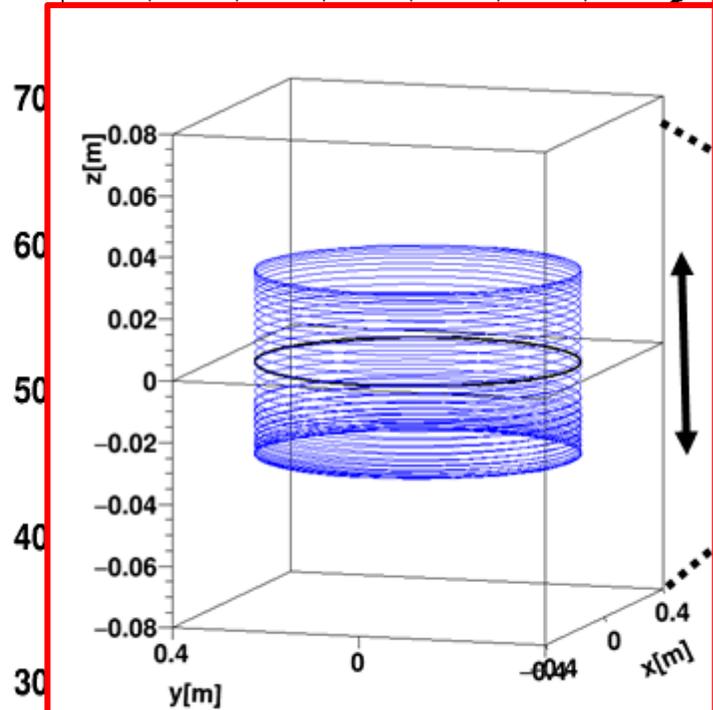
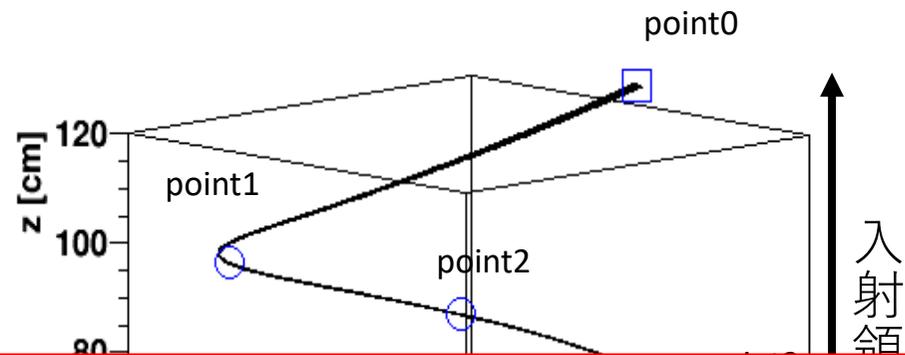
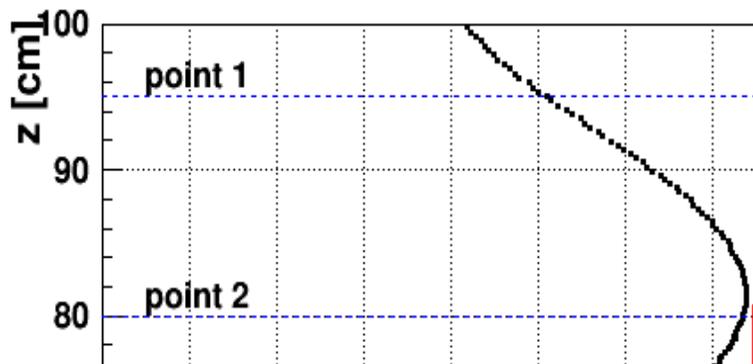
2019/10/26





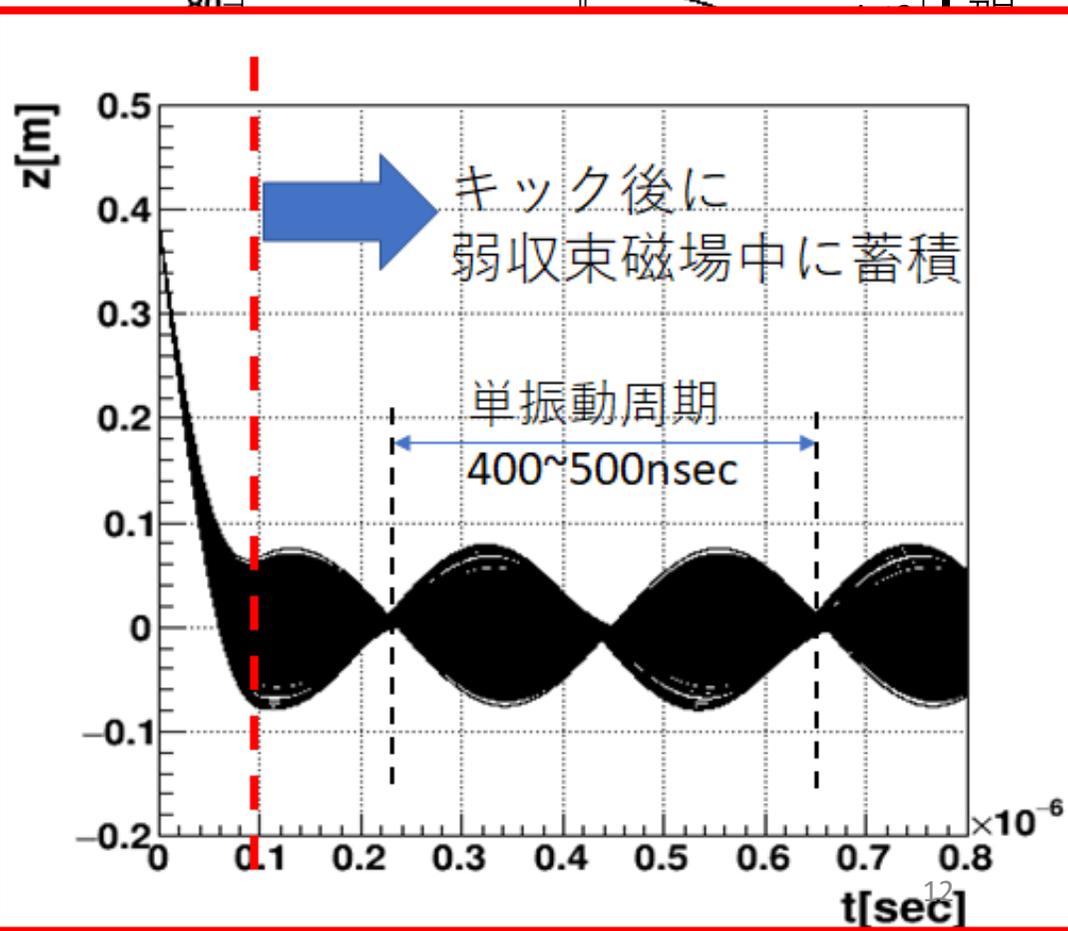
2019/10/26



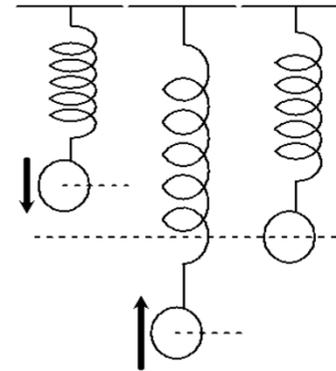
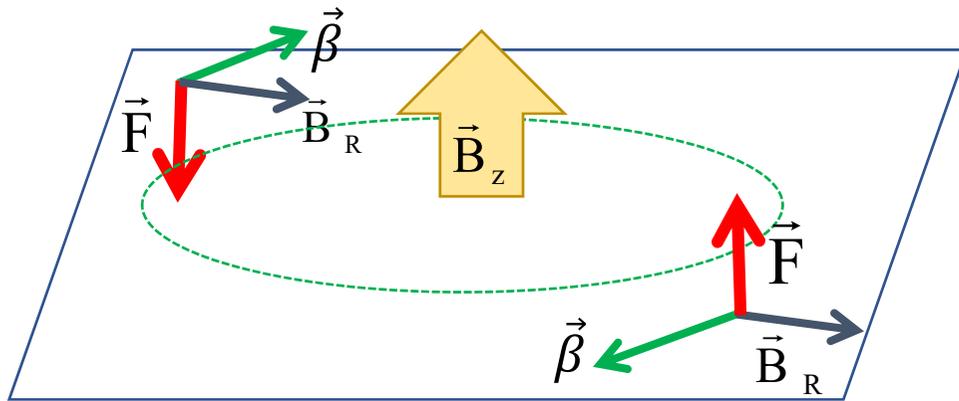


弱収束磁場中のビーム
(300ナノ秒程度)

2019/10/26



ビーム蓄積領域の弱収束磁場

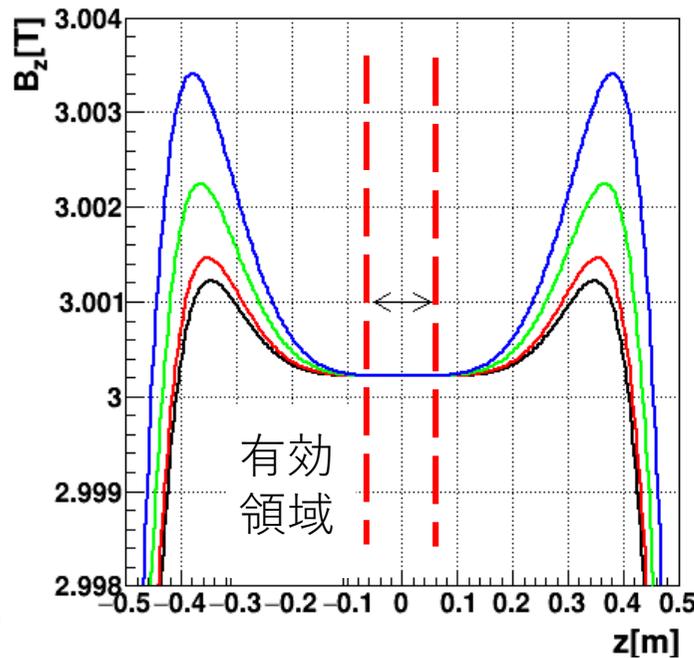
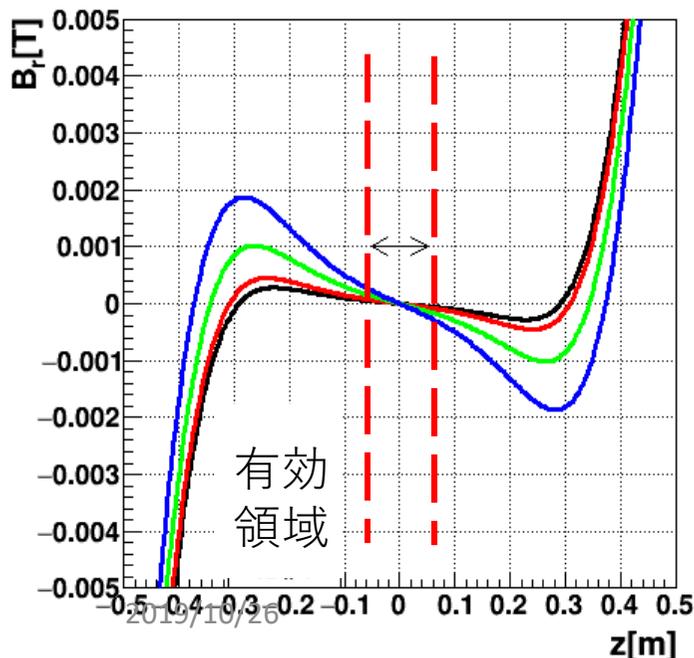


単振動

$$n = -\frac{R_0}{B_{0z}} \frac{\partial B_z}{\partial r}$$

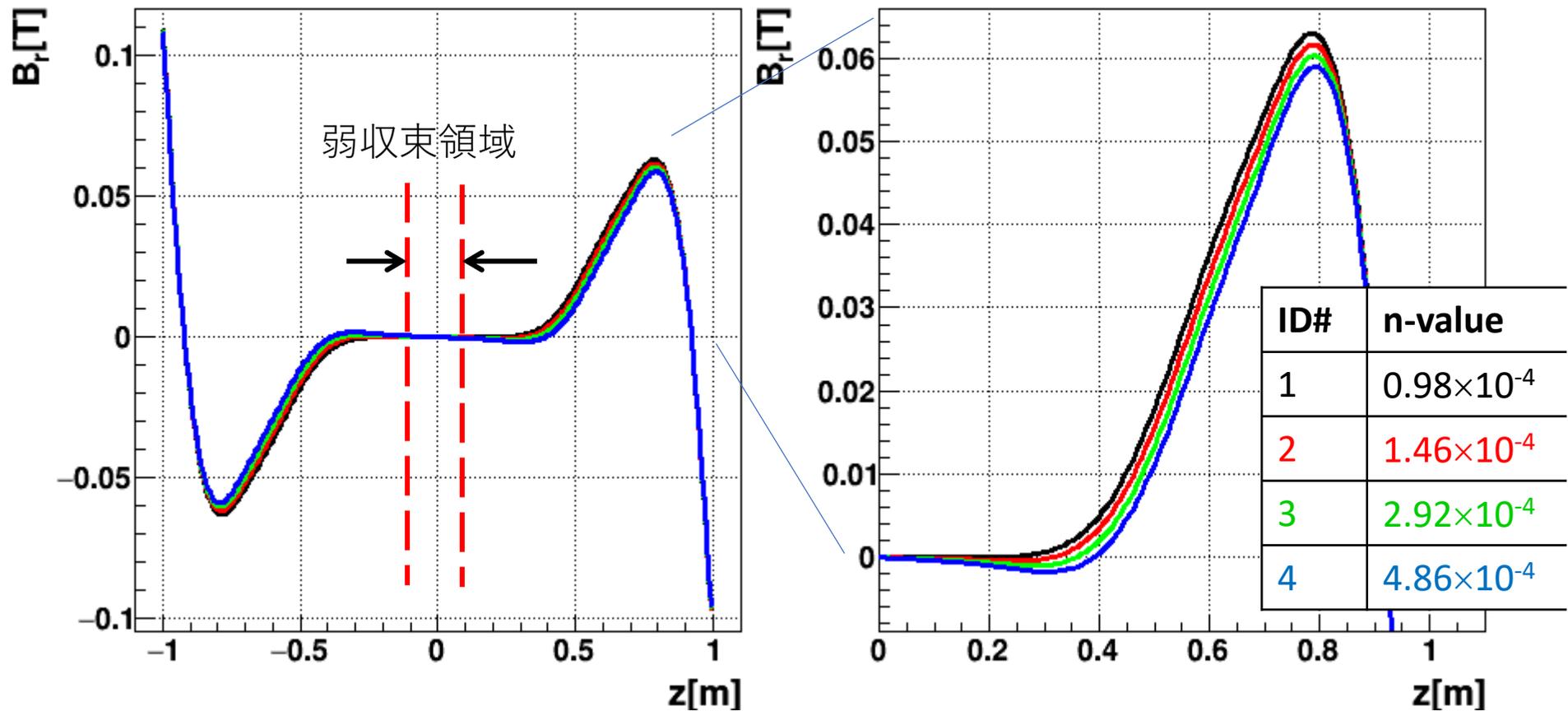
$$B_R = -n \frac{B_{0z}}{R_0} z,$$

$$B_z = B_{0z} \left(1 - n \frac{r}{R_0} + n \frac{z^2}{2R_0^2} \right)$$

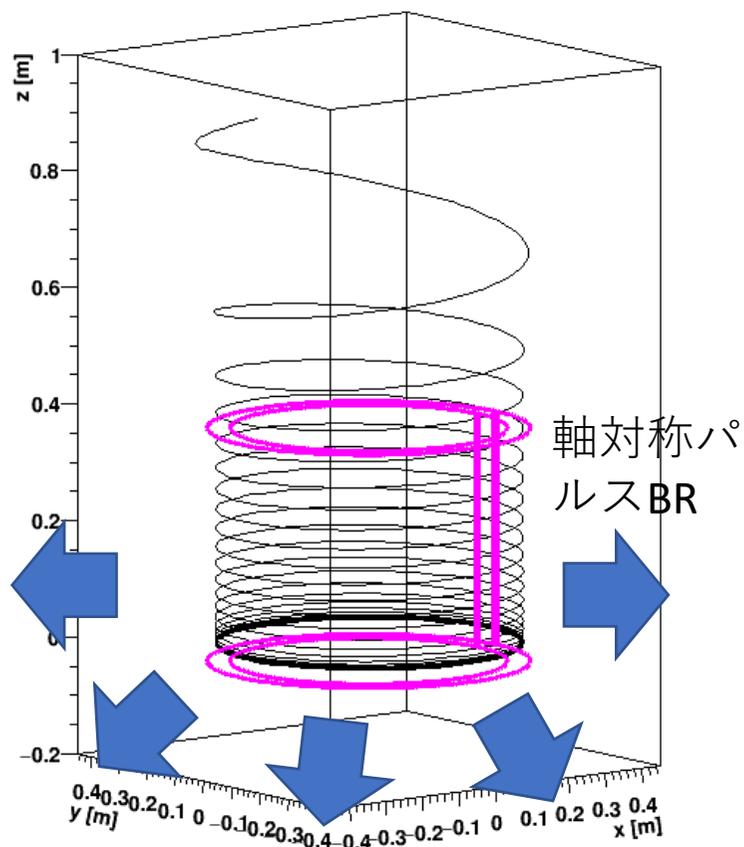


ID#	n-value
1	0.98×10^{-4}
2	1.46×10^{-4}
3	2.92×10^{-4}
4	4.86×10^{-4}

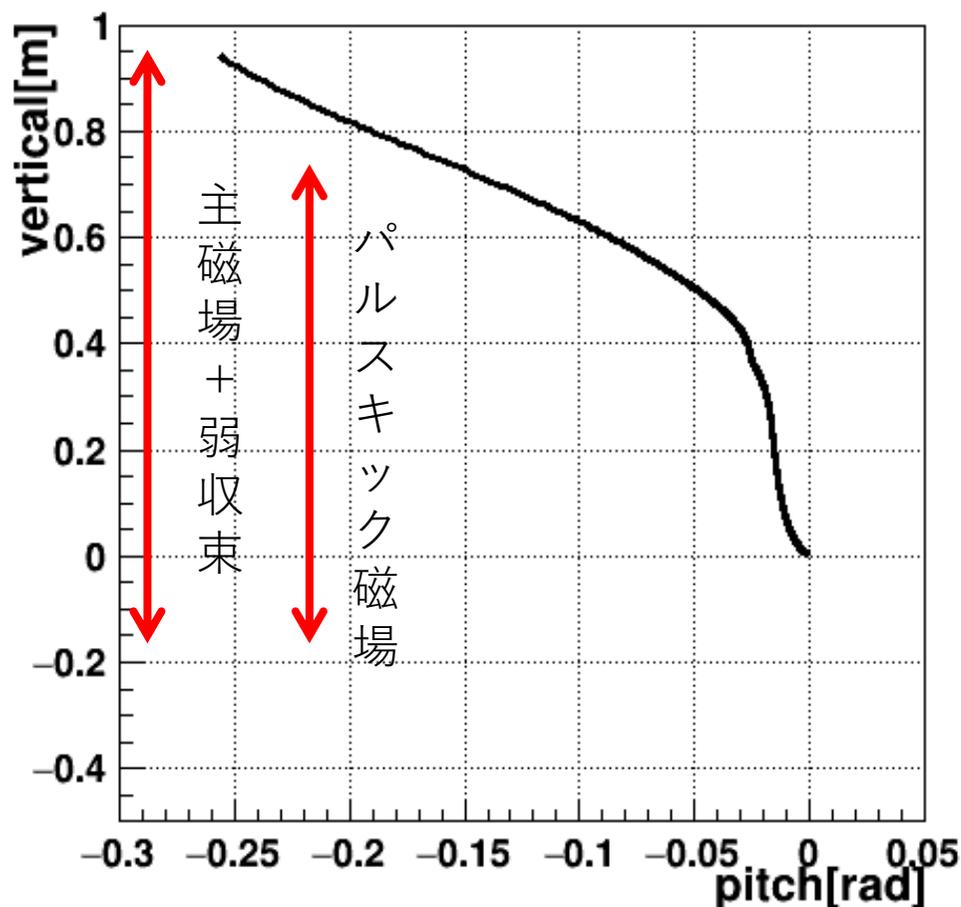
弱収束のパラメータを変えるとメインコイルが作るフリンジ磁場BRの空間分布にも影響が出る。



中心軌道の設計は弱収束磁場と、キッカー磁場とバランス調整しながら行う

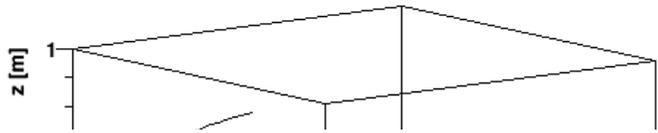


□ 4th order Runge-Kutta method
 $\Delta t = 1E-12$ sec

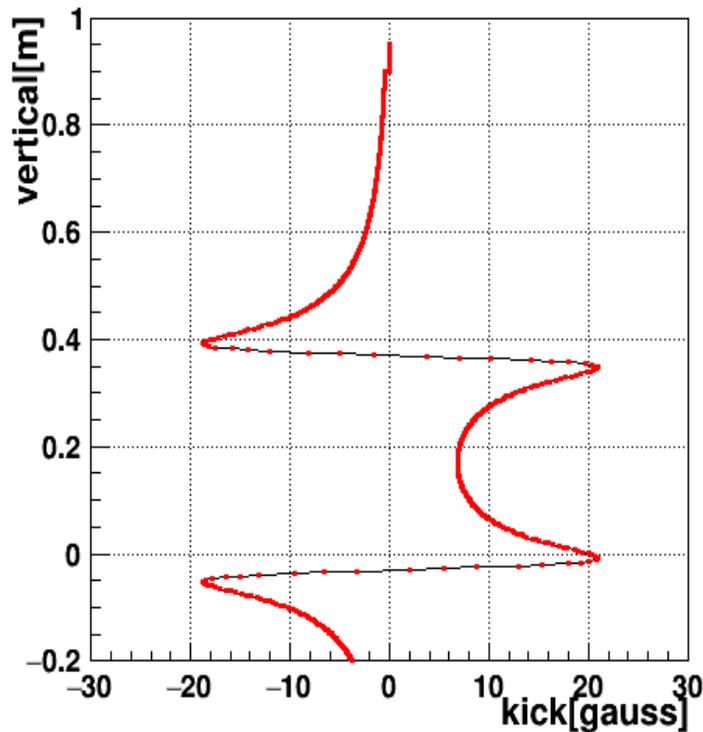


$$B_{kick} = B(z) \times \sin\left(2\pi \frac{t - t_0}{T_{kick}}\right)$$

中心軌道の設計は弱収束磁場と、キッカー磁場とバランス調整しながら行う

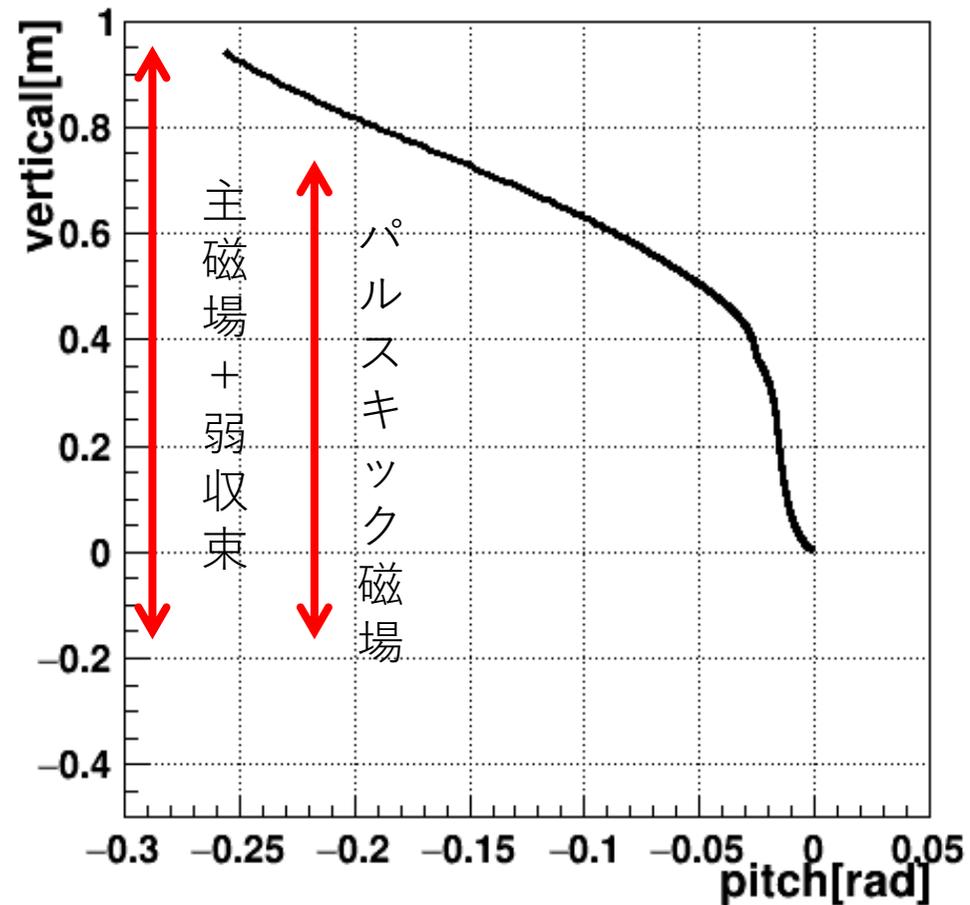


□ 4th order Runge-Kutta method
 $\Delta t = 1E-12$ sec

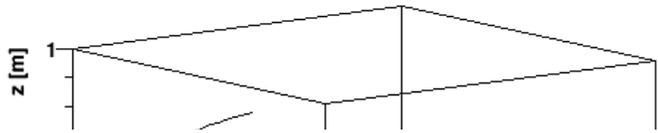


$$B_{kick} = B(z) \times \sin\left(2\pi \frac{t - t_0}{T_{kick}}\right)$$

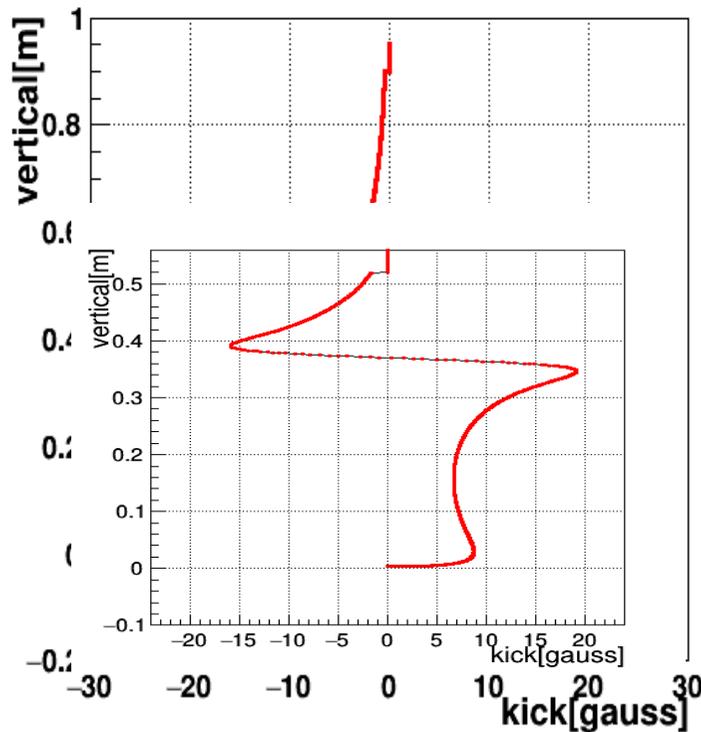
2019/10/26



中心軌道の設計は弱収束磁場と、キッカー磁場とバランス調整しながら行う

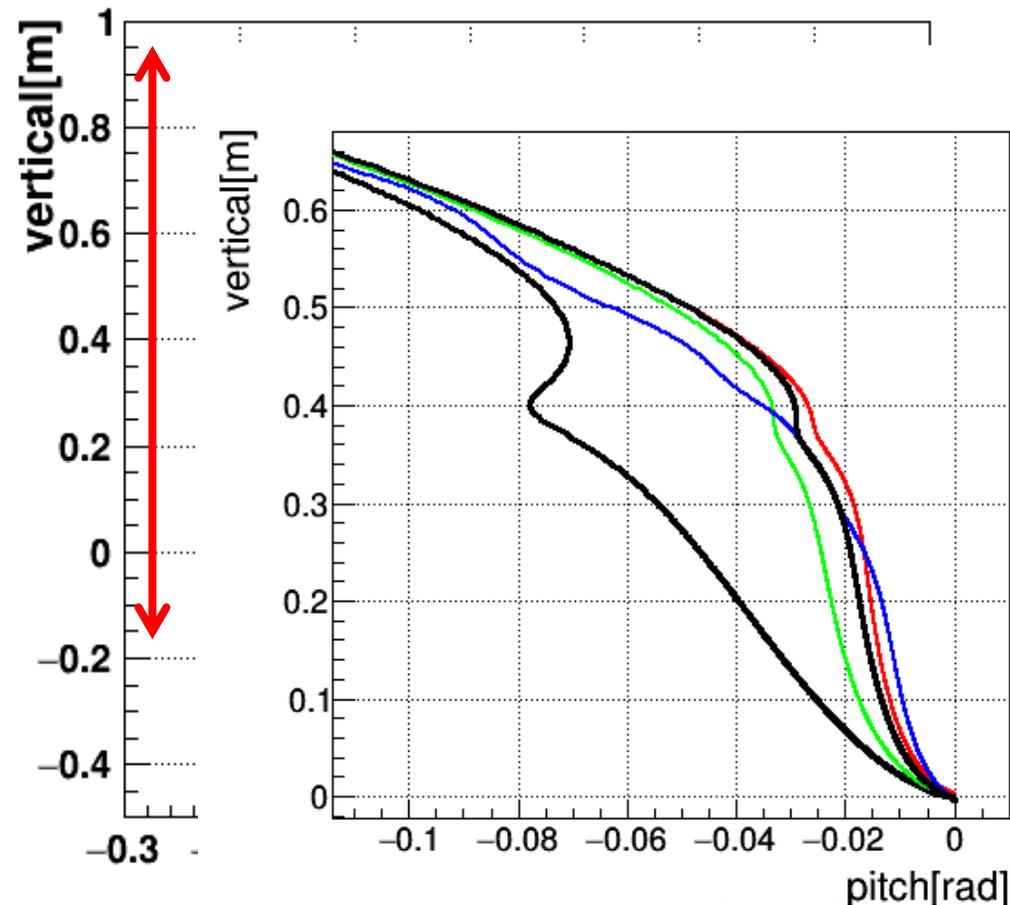


□ 4th order Runge-Kutta method
 $\Delta t = 1E-12$ sec



$$B_{kick} = B(z) \times \sin\left(2\pi \frac{t - t_0}{T_{kick}}\right)$$

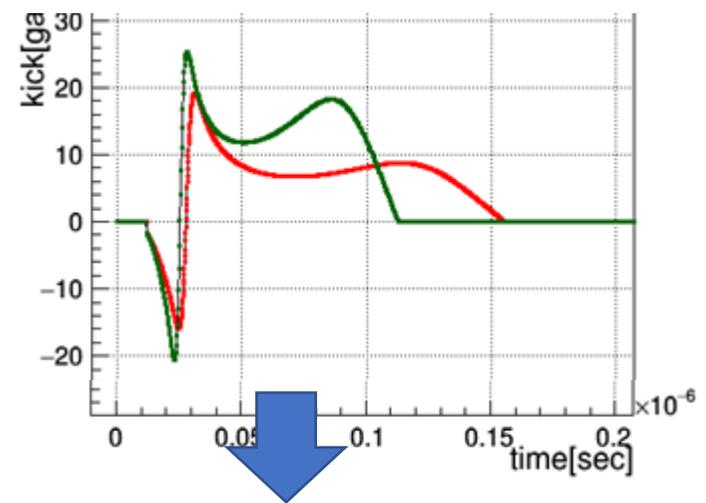
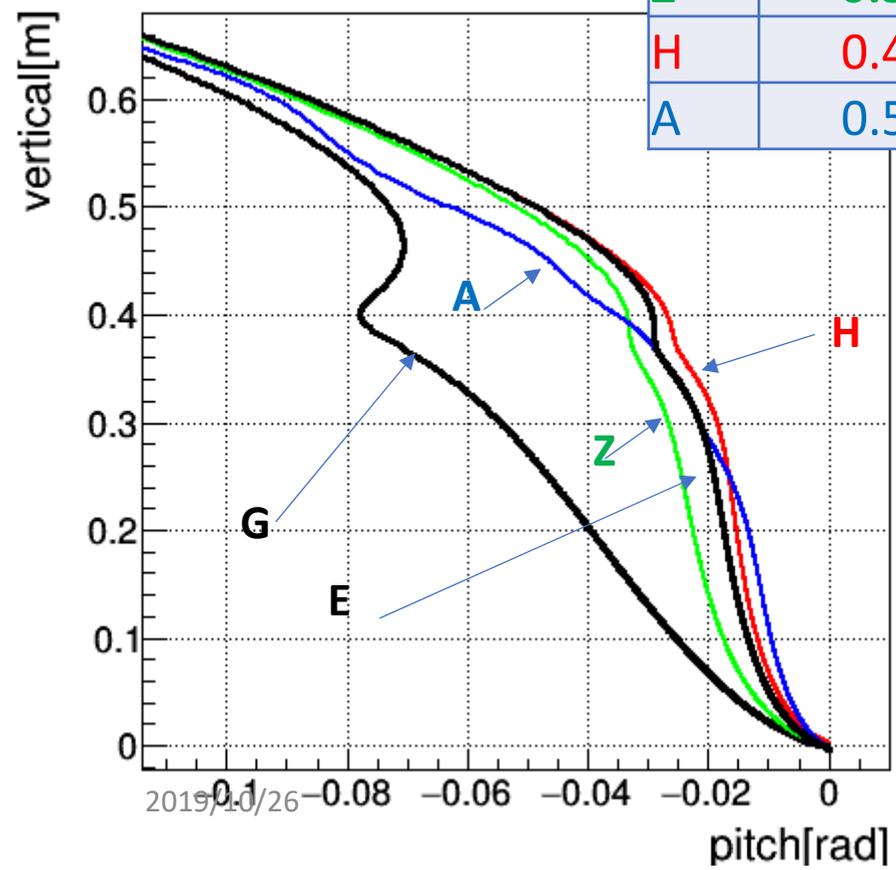
2019/10/26



弱収束磁場 + キック磁場 → 入射効率

- 大きい入射角 (pitch angle)
- 大きいn-value (強い弱収束)
- 短時間に強いキック

typ	Weak factor	T(nsec)	C(nF)	I[A]	V	eff(%)
G	0.75	82.5	0.197	1800	239.8	85%
E	0.7	147.5	0.63	600	44.7	65%
Z	0.55	112.5	0.367	400	39.1	80%
H	0.48	195.0	1.1	225	12.7	63%
A	0.58	175.5	0.893	180	11.3	33%

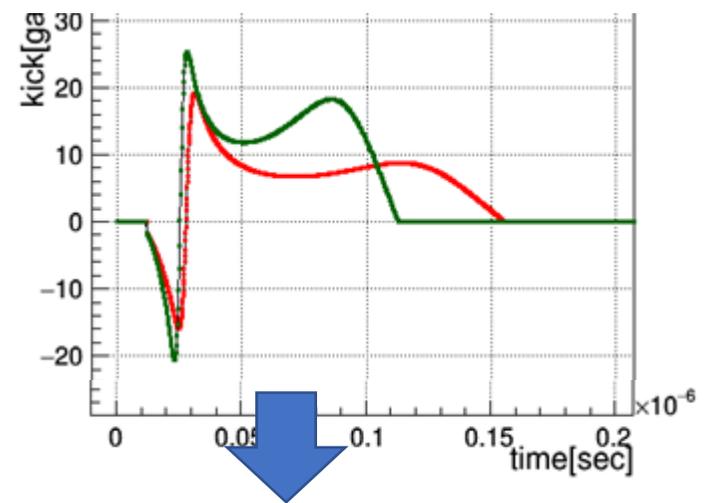
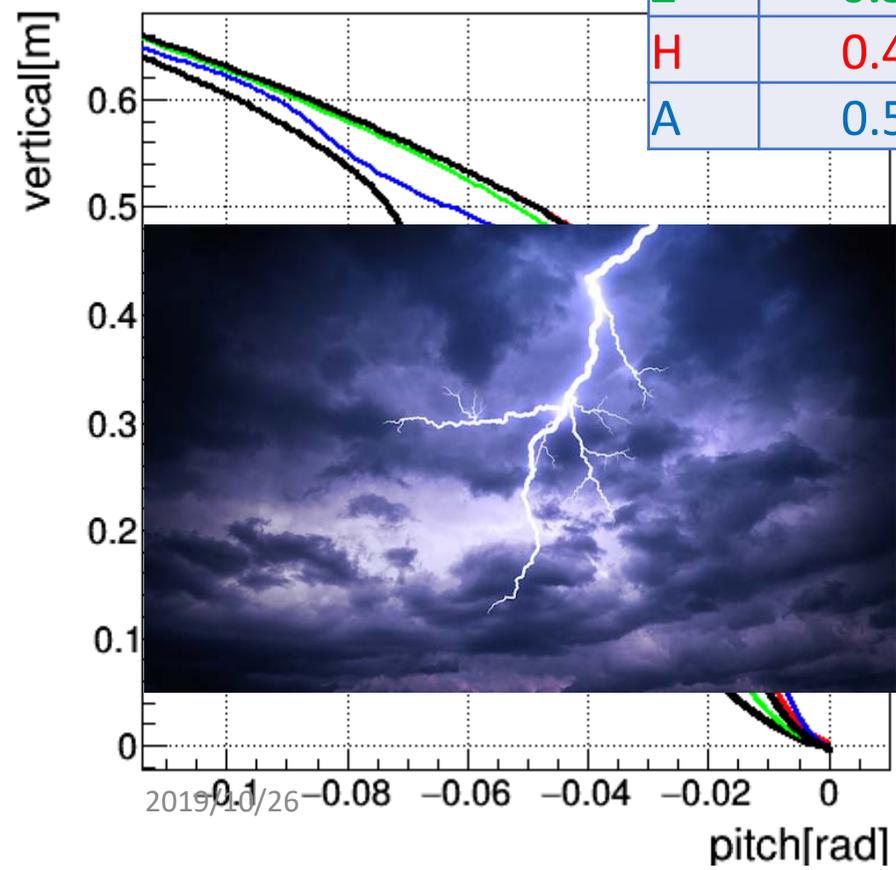


入射効率が高くても、現実的なパラメータでないとダメ

弱収束磁場 + キック磁場 → 入射効率

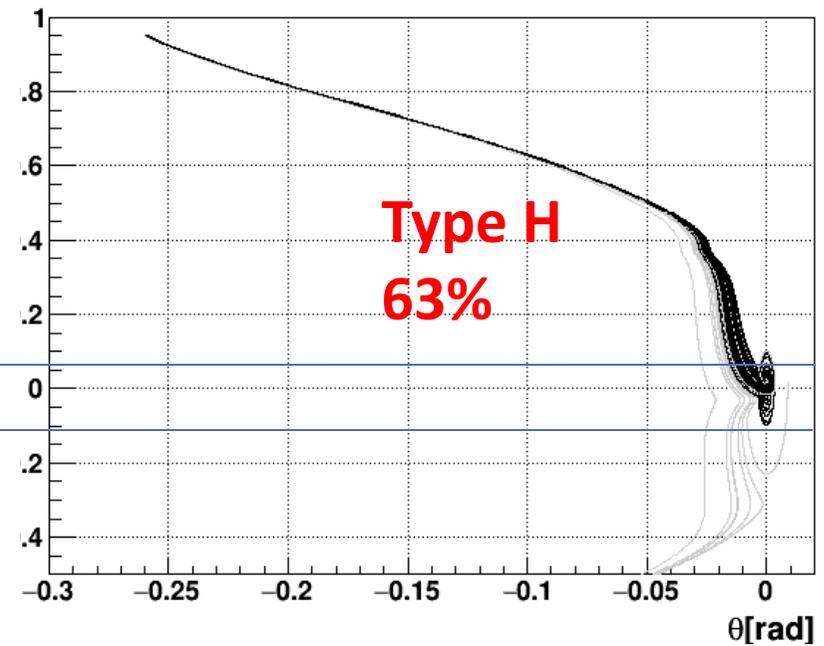
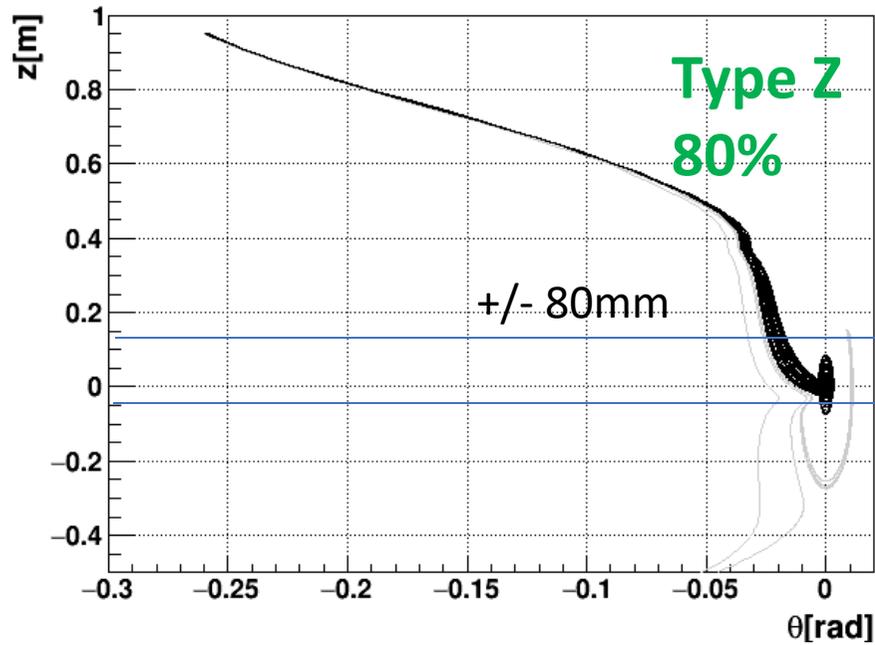
- 大きい入射角 (pitch angle)
- 大きいn-value (強い弱収束)
- 短時間に強いキック

typ	Weak factor	T(nsec)	C(nF)	I[A]	V	eff(%)
G	0.75	82.5	0.197	1800	239.8	85%
E	0.7	147.5	0.63	600	44.7	65%
Z	0.55	112.5	0.367	400	39.1	80%
H	0.48	195.0	1.1	225	12.7	63%
A	0.58	175.5	0.893	180	11.3	33%

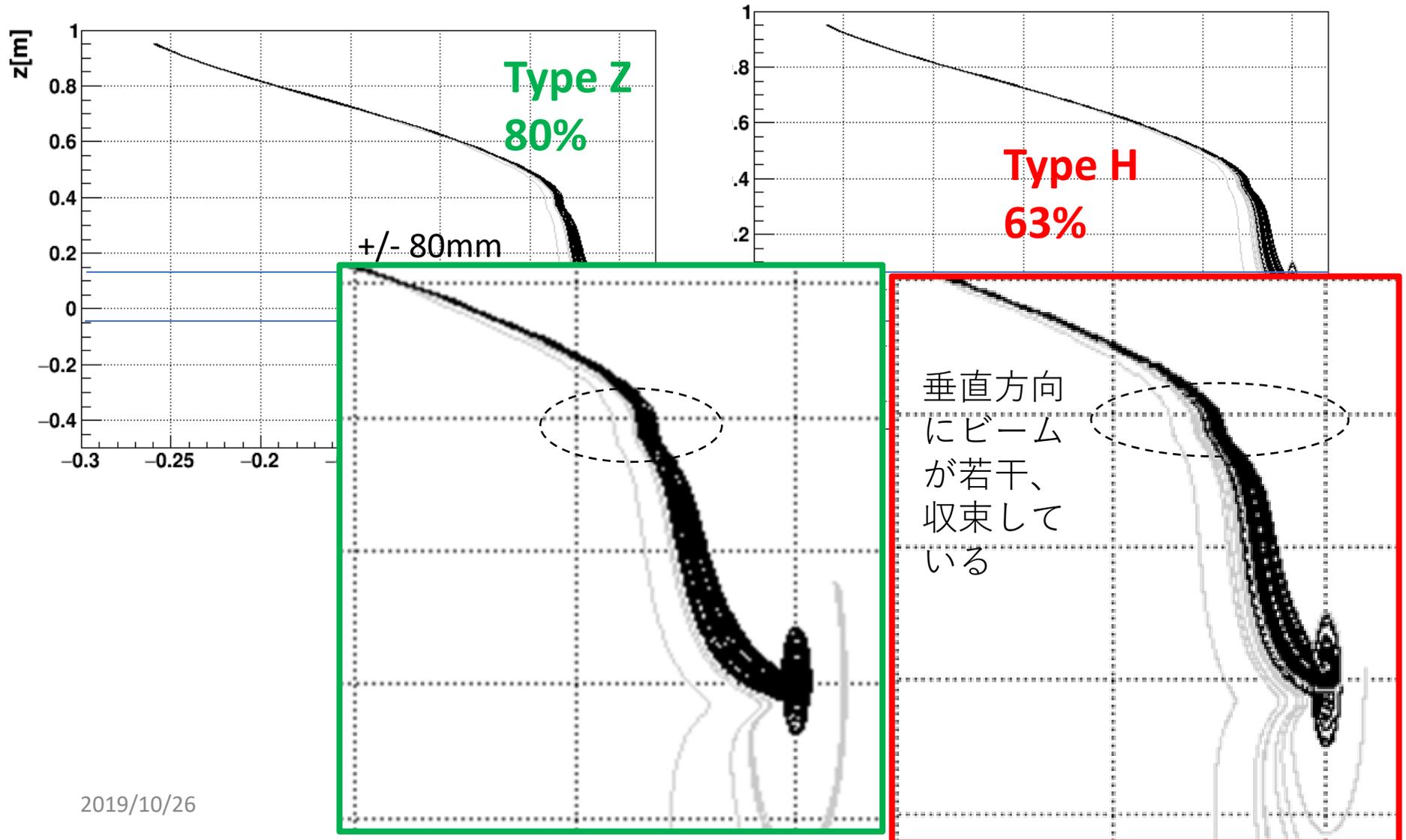


入射効率が高くても、現実的なパラメータでないとダメ

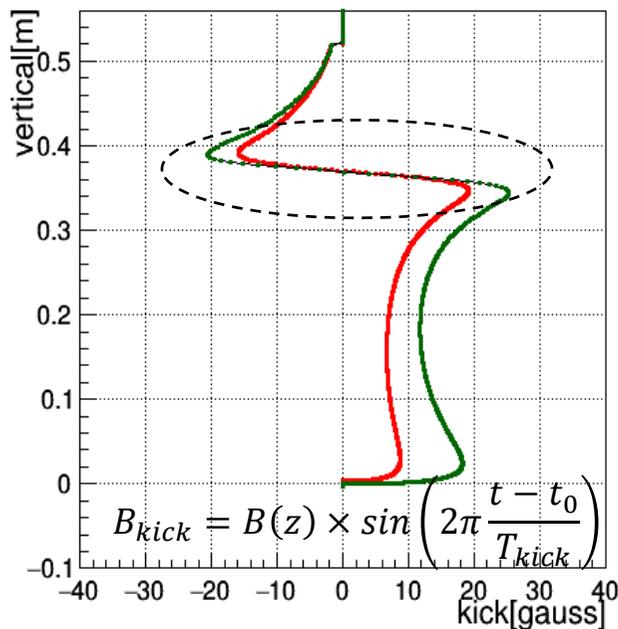
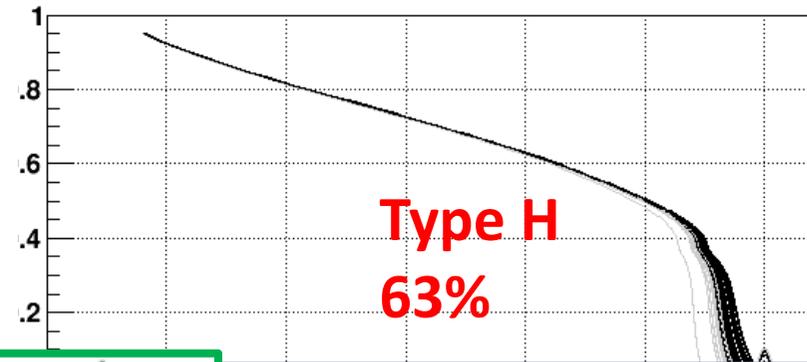
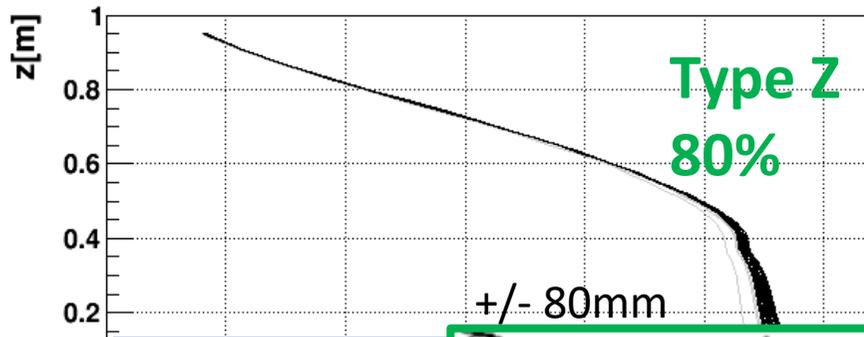
キッカー機能 → 収束 + キック
キッカー構造を工夫して、機能分離する？



キッカー機能 → 収束 + キック
キッカー構造を工夫して、機能分離する？



キッカー機能 → 収束 + キック キッカー構造を工夫して、機能分離する？



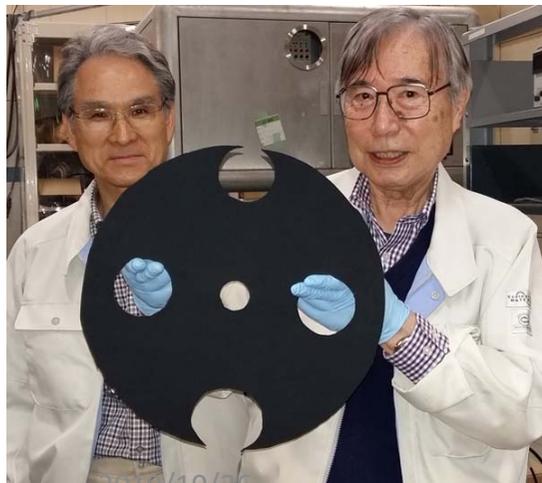
垂直方向
にビーム
が若干、
収束して
いる

入射効率63%より向上
→キッカーコイル形状・磁場の分布を更に検討していく。

3次元螺旋軌道入射実証試験 Spiral Injection Test Experiment (SITE)



items	<i>g</i> -2/EDM (J-PARC)	Electron analog test experiment
Storage magnetic field	3.00 T	80 ~ 100 Gauss
Beam particle	μ^+ (pulse)	electron (DC or pulse)
Momentum	300[MeV/c]	300 ~ 330[keV/c]
cyclotron period	7.4[ns]	~ 5[ns]
Storage orbit radius	0.33[m]	0.12[m]



2019/10/26

中山
先生



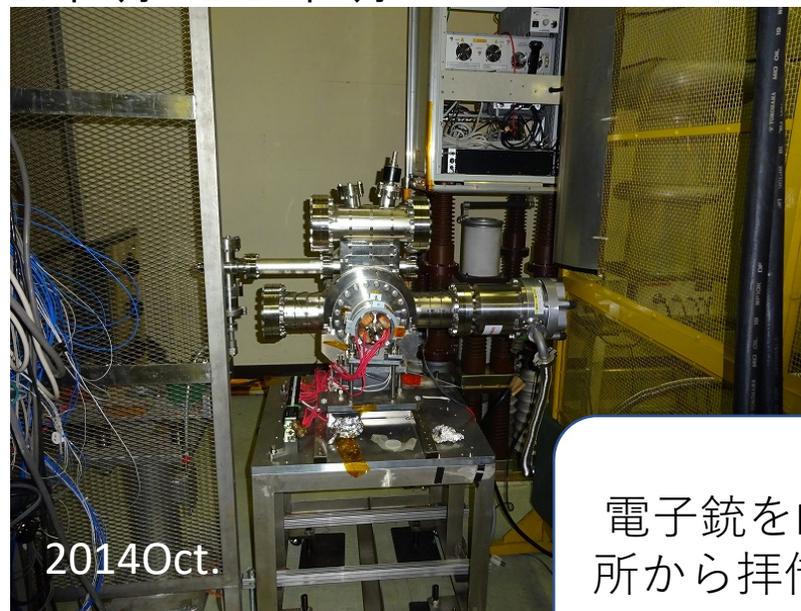
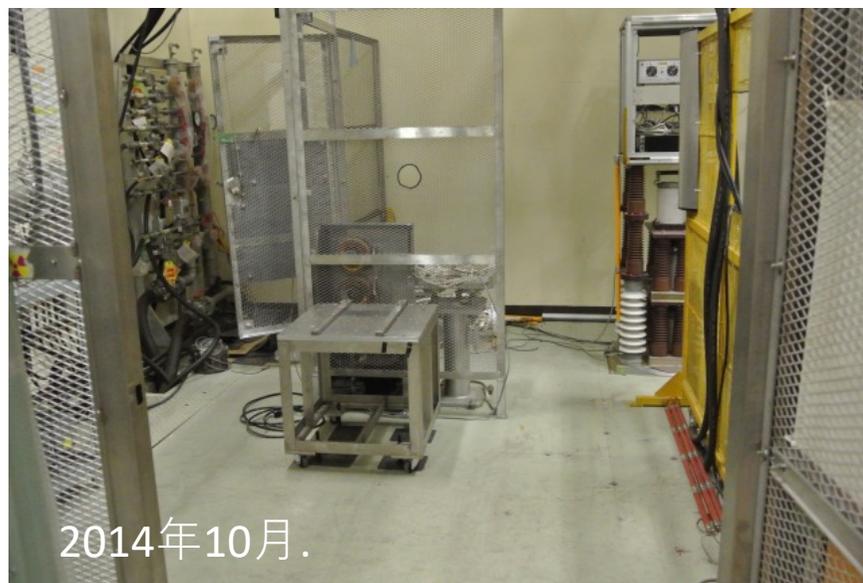
大澤先生

70+ α

60+ α

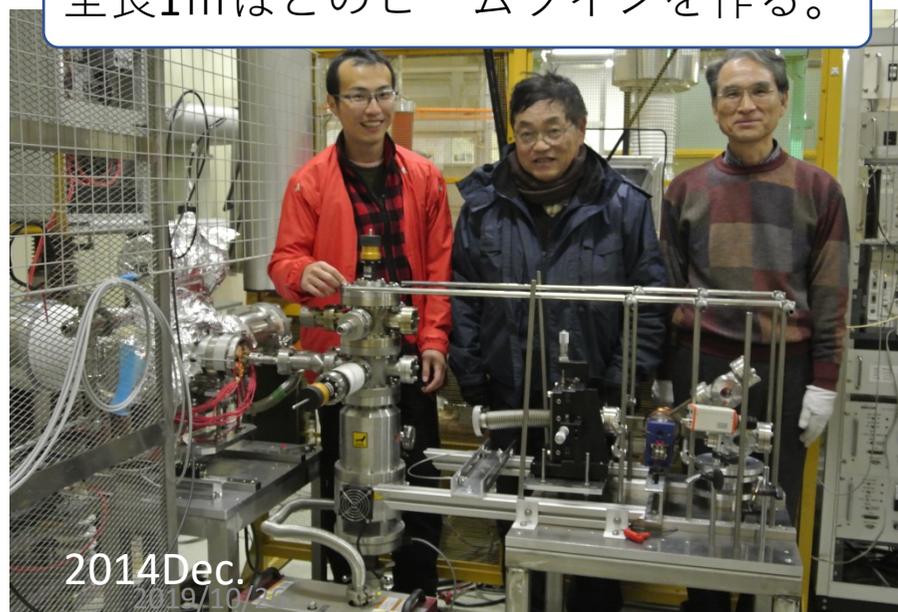
歴史紹介

ソレノイド型蓄積磁石への3次元らせん軌道によるビーム入射の実証試験
科研費基盤B:2014年4月～2018年3月

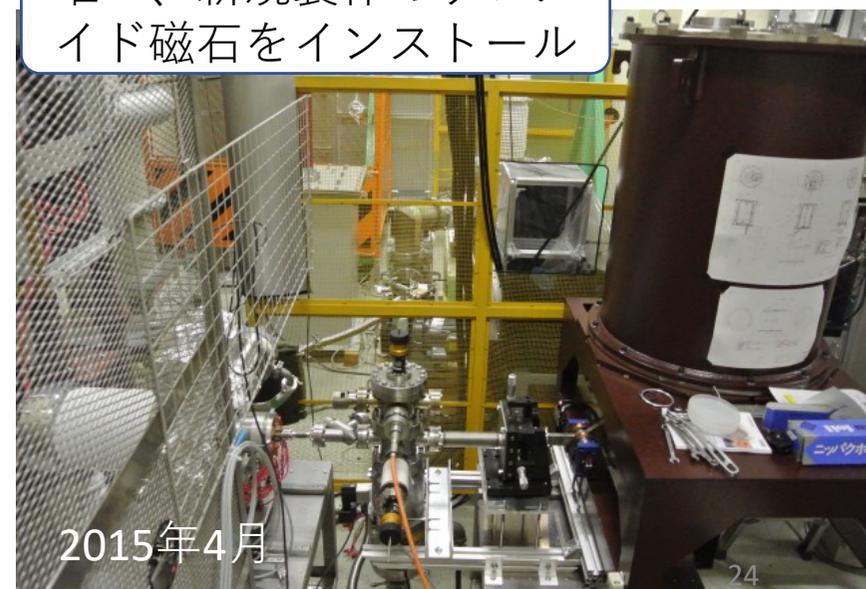


電子銃をKEKの某所から拝借する。

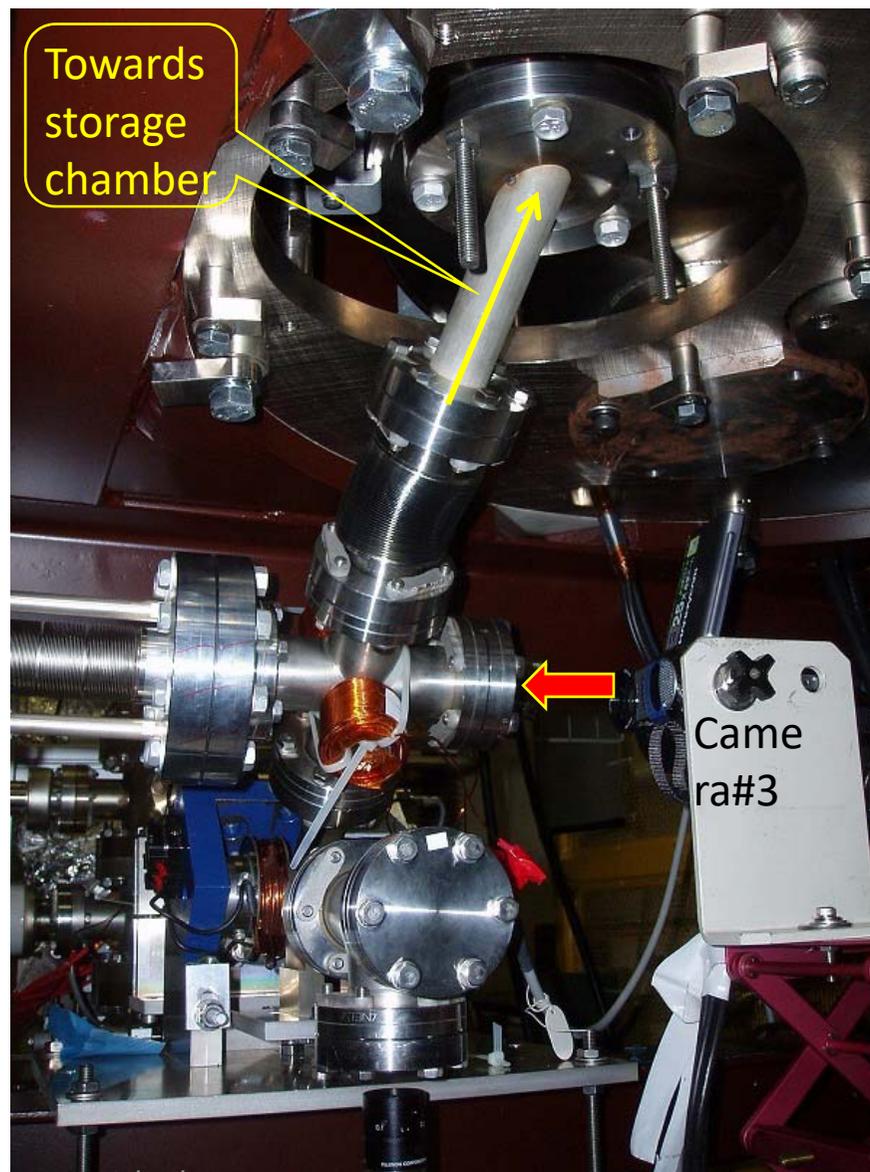
全長1mほどのビームラインを作る。



唯一、新規製作のソレノイド磁石をインストール



苦労話：1m弱のビームラインなのにステアリングだらけ！



2019/10/26

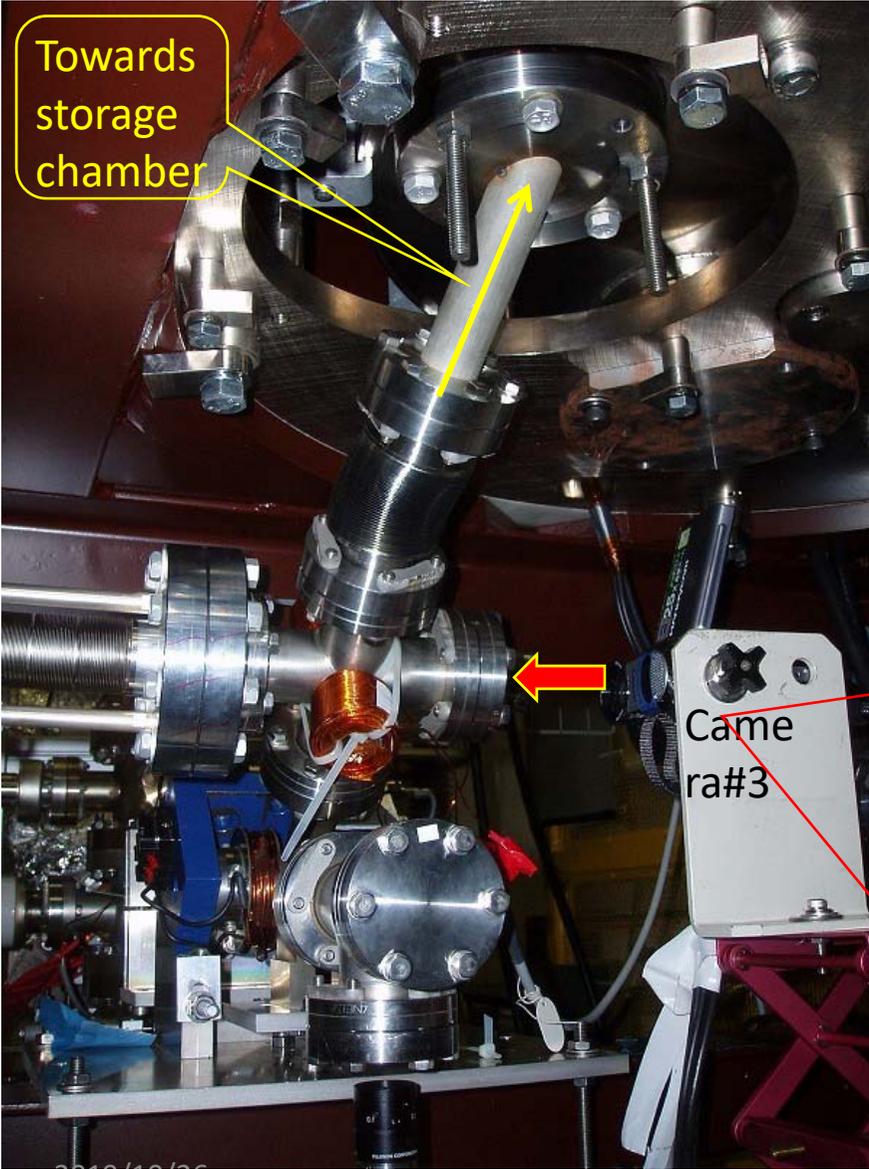


@飯沼製作所

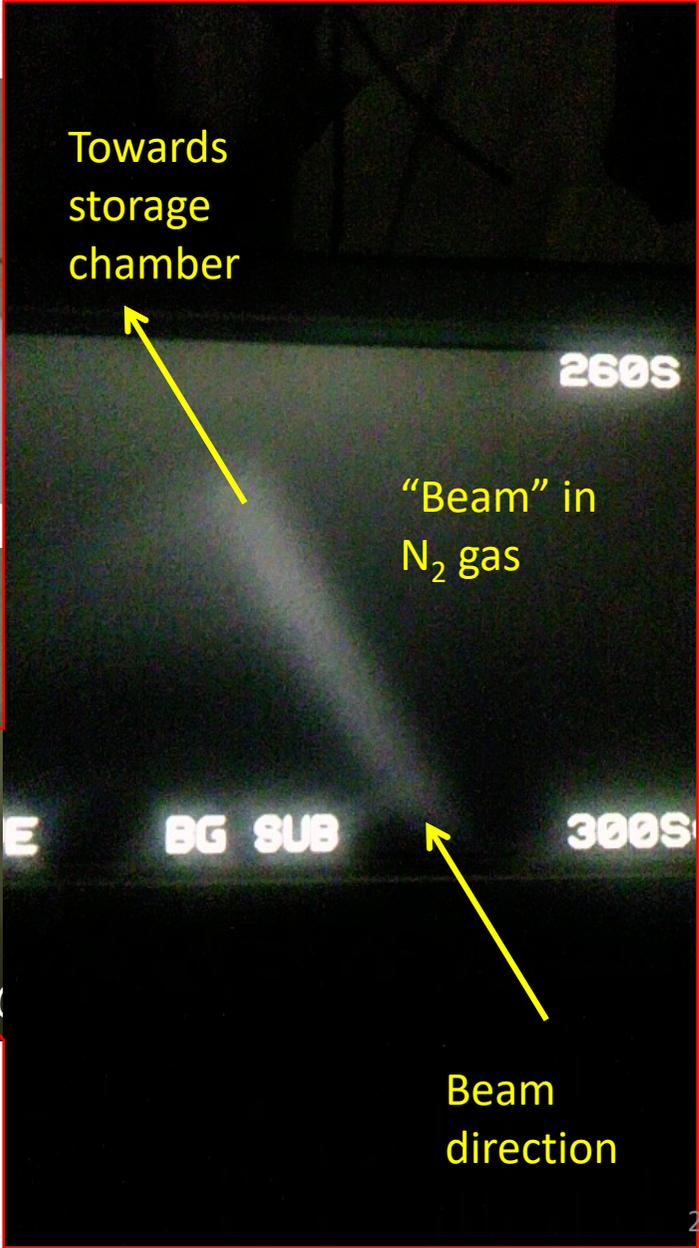


@飯沼製作所

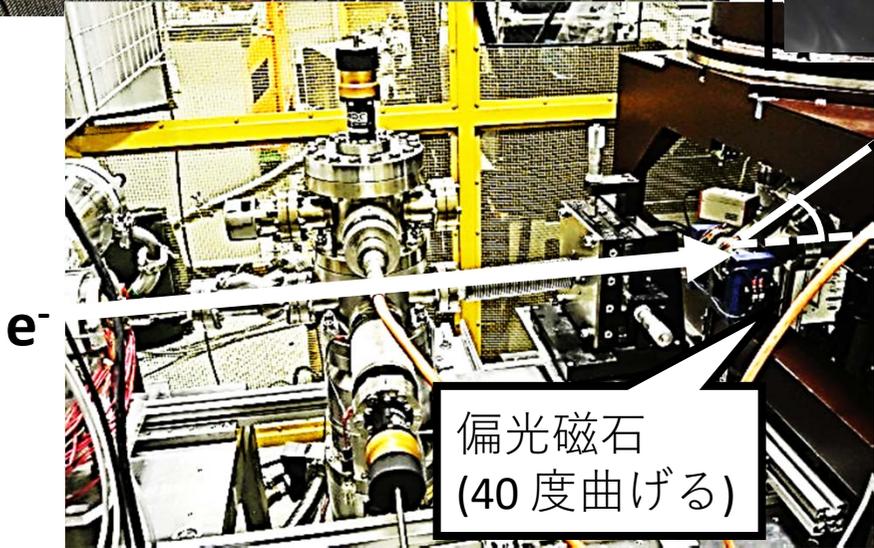
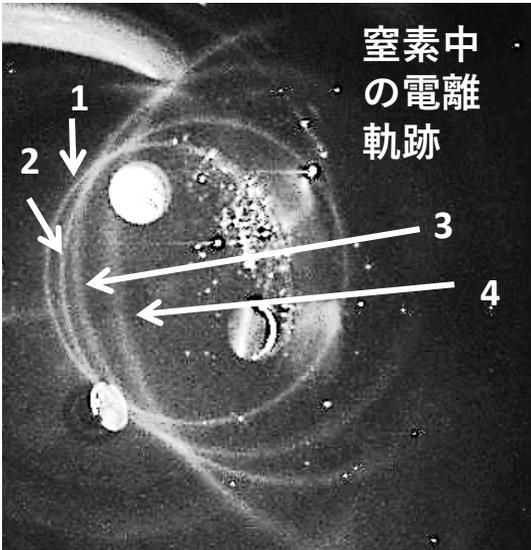
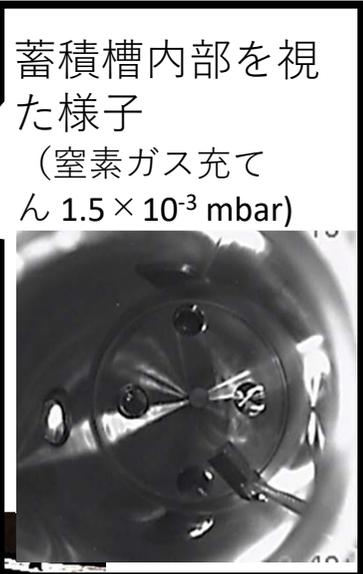
苦労話：1m弱のビームラインなのにステアリングだらけ！



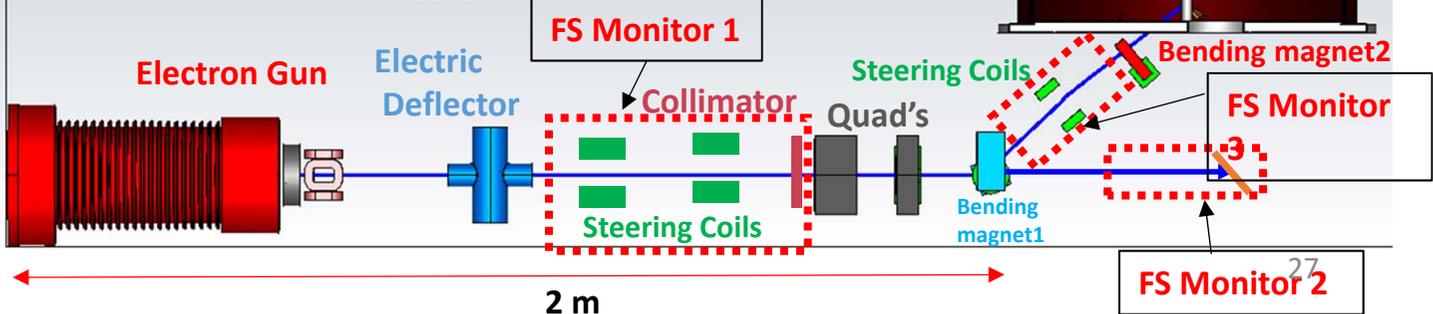
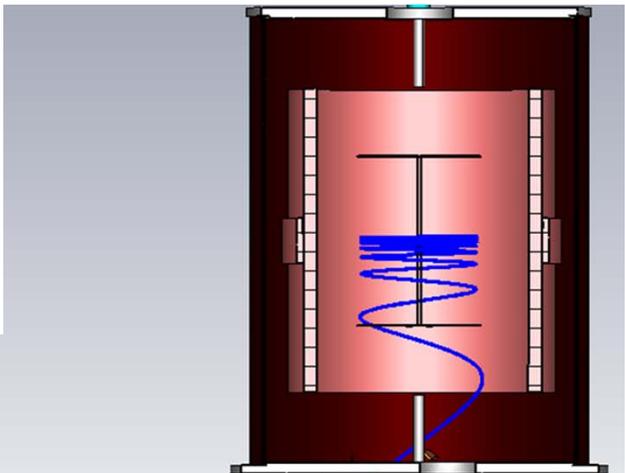
2019/10/26



26

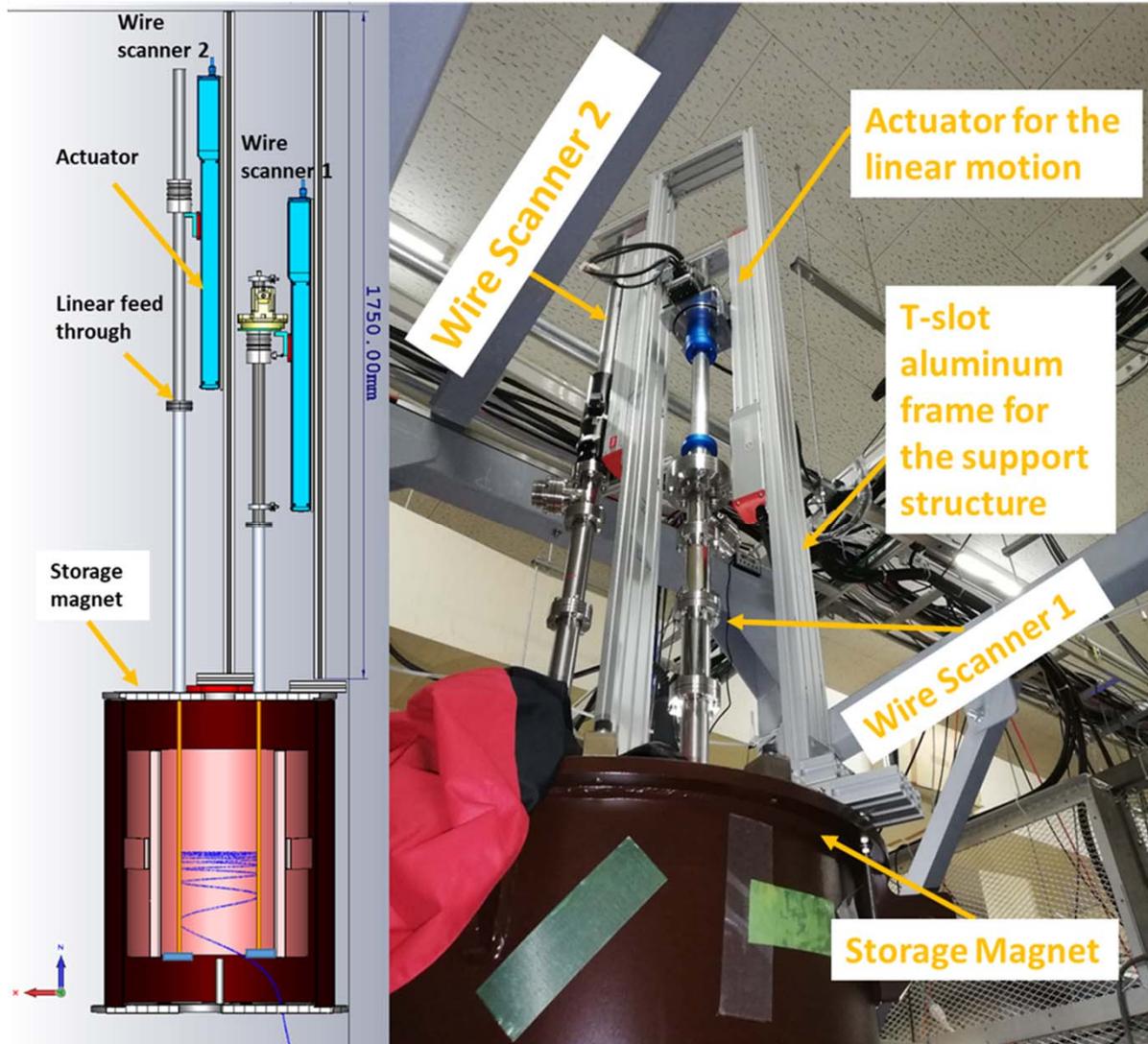


蓄積槽へ
蛍光板などの
ビームモニ
ター



ワイヤースキャンで垂直方向ビームサイズを計測

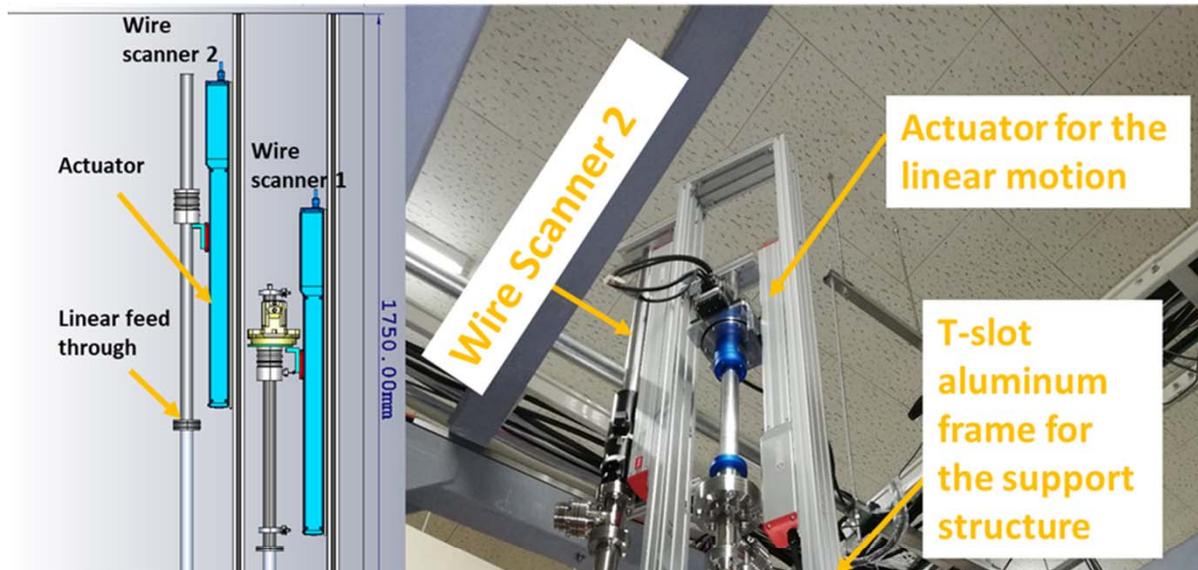
Driving and support system of wire scanner



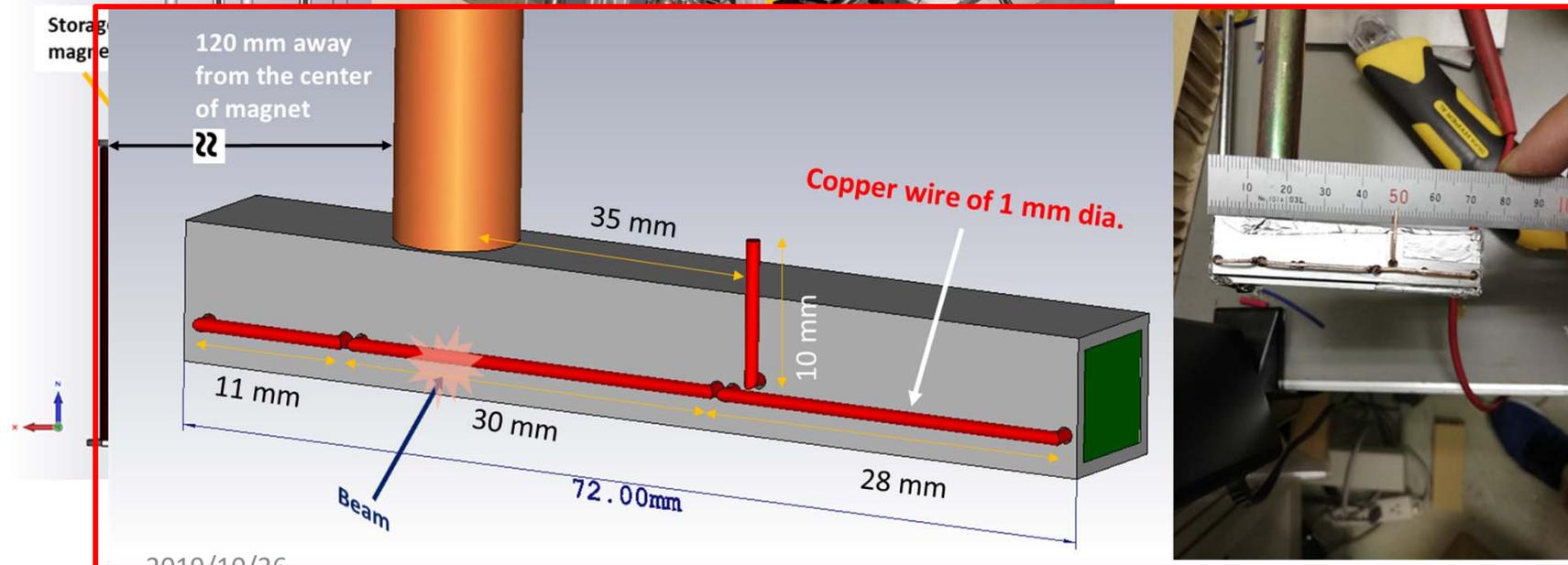
- The driving system is composed of a linear feedthrough, linear/rotary actuators and t-slot aluminum frames supports.
- In the wire scanner, the copper wires of 1 mm \varnothing were placed horizontally in order to measure the vertical beam profile.

ワイヤースキャンで垂直方向ビームサイズを計測

Driving and support system of wire scanner



- The driving system is composed of a linear feedthrough, linear/rotary actuators and t-slot aluminum frames supports.
- In the wire scanner, the copper wires of 1 mm \varnothing were placed horizontally in order to measure the vertical beam profile.



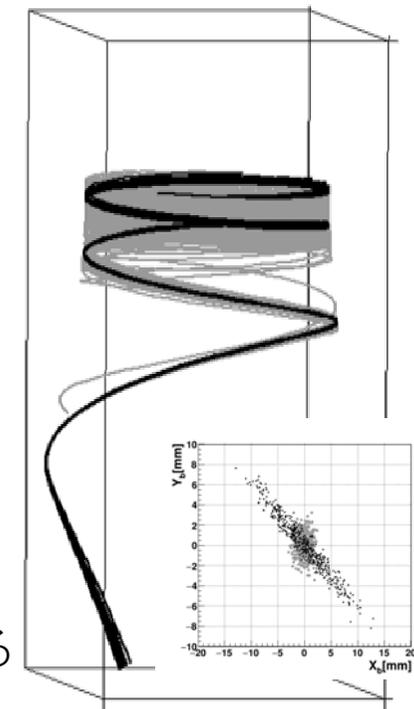
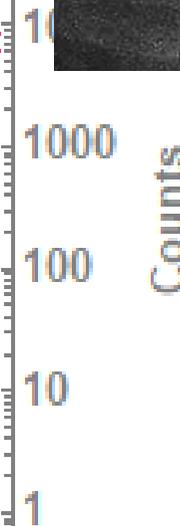
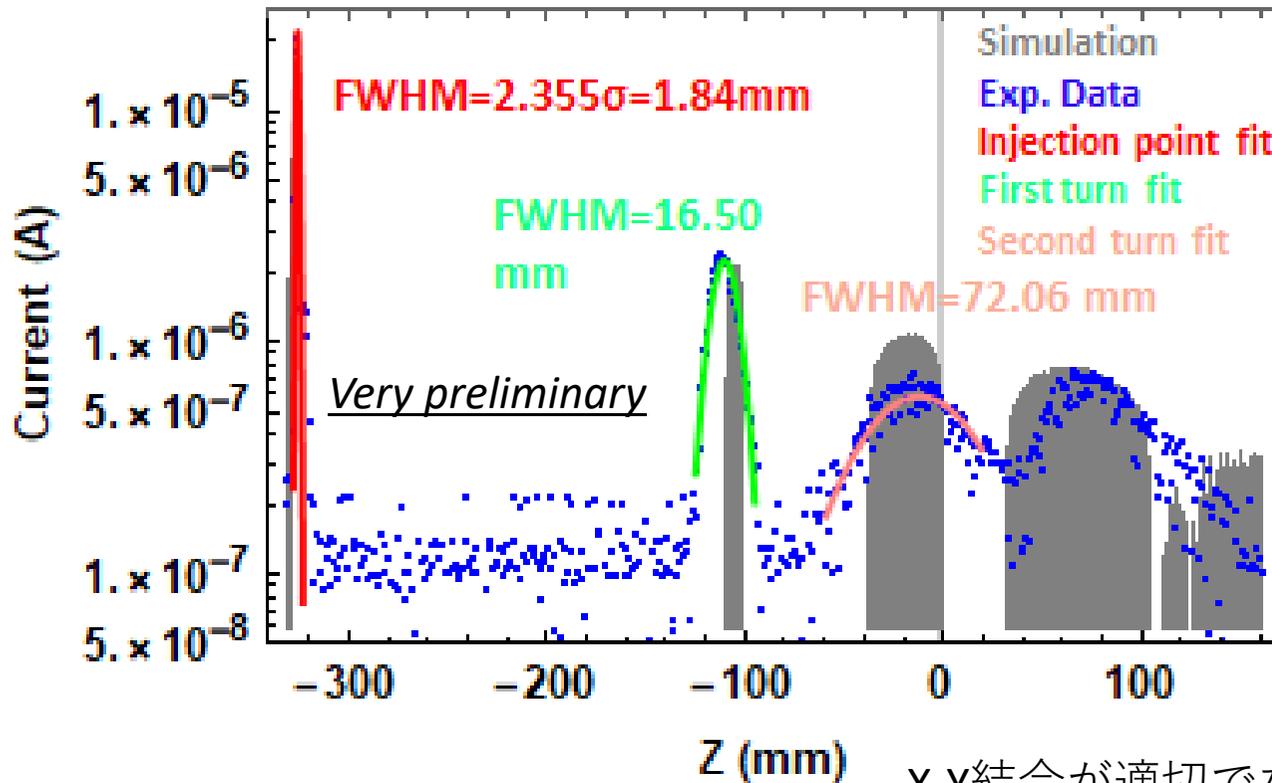
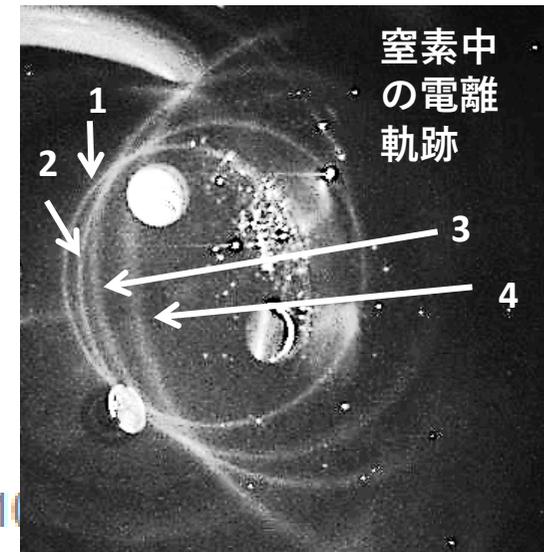
2019/10/26

Results of Vertical Beam Profile Measurement

- The beam diverge as it moves upward in the storage magnet due to mismatch
- The rotating quadrupole magnet are in preparation to reduce beam divergence
- In order to detect pulse beam copper wires will be replace with plastic scintillator (Future Plan)

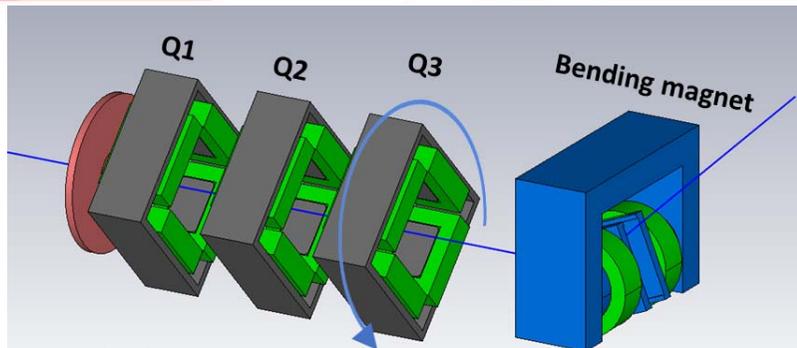
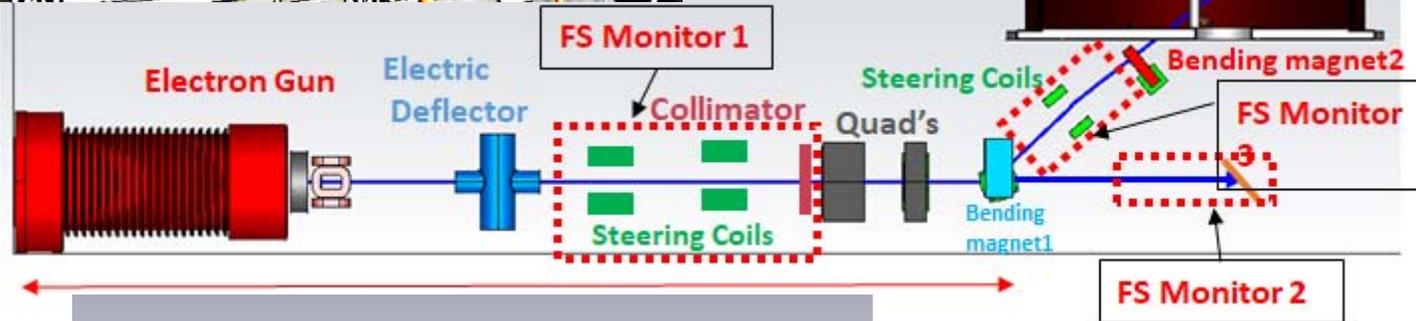
M. A. Rehman,
SOKENDAI

Wire scanner 1 data



X-Y結合が適切でないと、ソレノイド軸方向に広がる

次の課題：回転4極を3つ導入してX-Y結合ビーム制御を開始。



2019/10/26

直流ビームで
XY結合の調整

直流→パルス
ビーム切り替え
チョッパー電極
の導入
(動作確認済)

キックにより
ビームの突き抜
の有無を確認
より定量評価へ

ミュオンg-2・EDMの同時測定に向けた、
3次元螺旋ビーム入射の精密制御の確立
基盤研究A 課題番号19H00673 (2019-2022)

まとめ

1. MRI技術に応用し高精度に磁場調整された蓄積磁石内へのビーム入射と蓄積ビームの軌道制御の概要
2. 垂直キッカーの設計(ビーム入射効率アップの鍵)
 - 入射効率を高くするには、強いキック磁場が必要だが、現実的ではない。
 - キッカーコイル形状を工夫して、収束成分を与える空芯コイルを追加する。
3. 3次元螺旋入射の実証実験
 - 今年の夏に回転4極磁石を導入、X-Y結合を適切に調整、ソレノイド軸方向のビーム広がりを抑える(DCビームで行う)
 - キッカー磁石を導入

[WEPH 032](#) [J-PARC ミューオンg-2/EDM 実験のための垂直ビームキッカー装置の概念設計とテストベンチ作業準備](#)

○平山 穂香

[THPH 033](#) [磁場強度に対する温度影響の検討と超均一磁場調整手法の開発](#)

○杉田 萌,

[WEPI 001](#) [ミューオン線形加速器APF方式IH-DTLプロトタイプ用入力RFカップラーの開発](#)

○中沢 雄河

2019/10/26