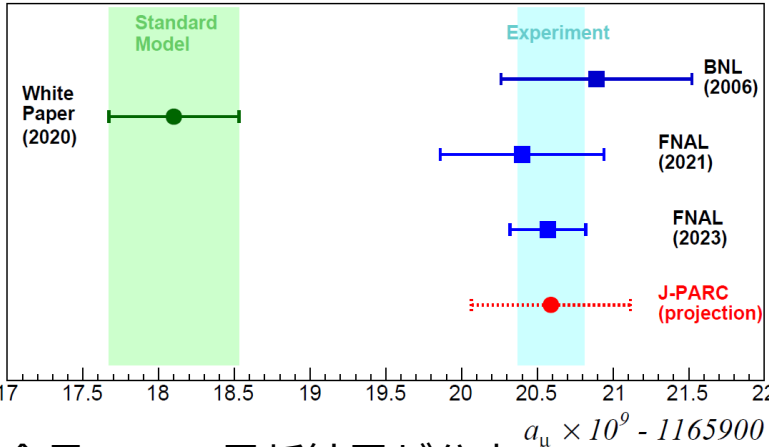
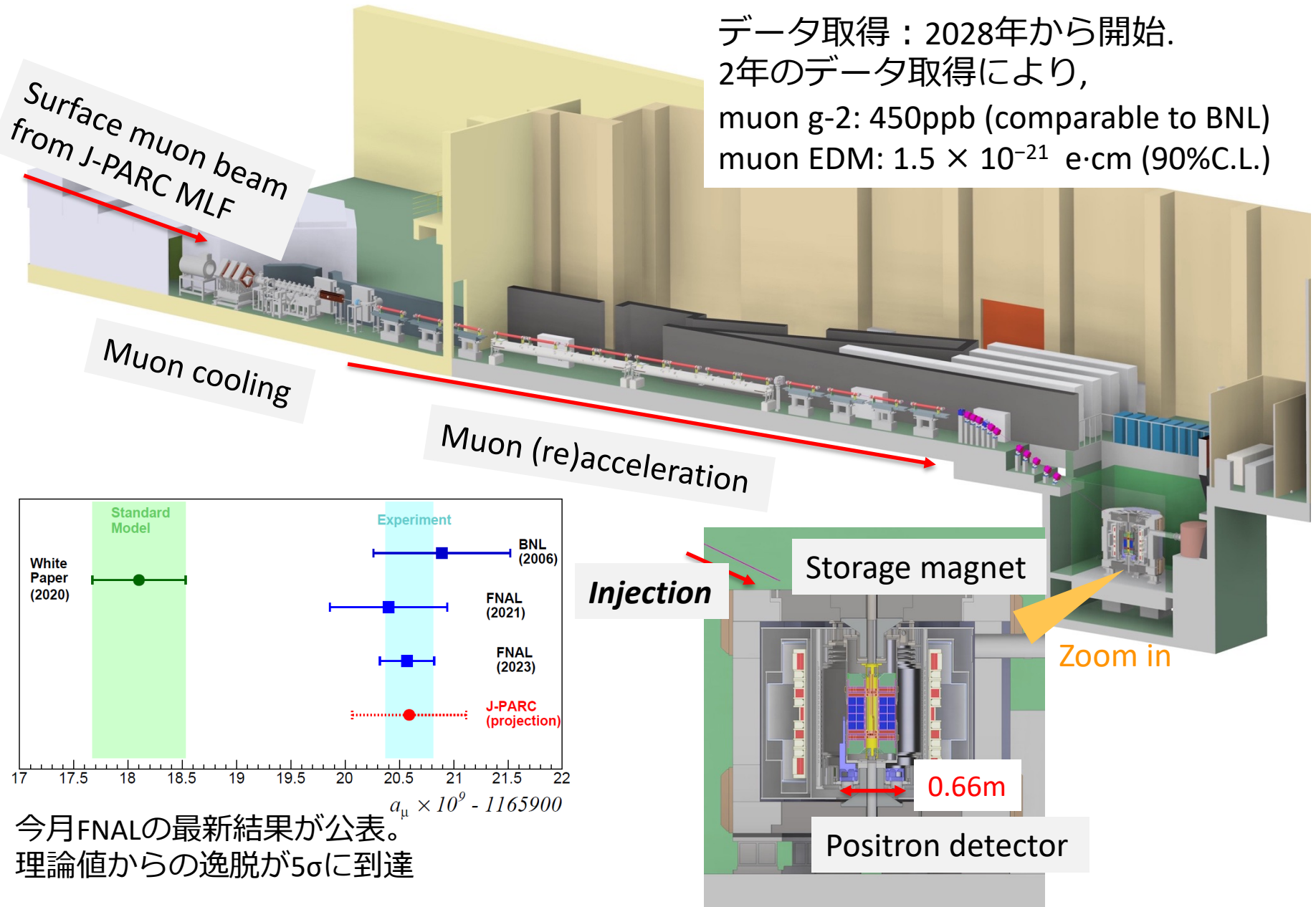


J-PARC muon g-2/EDM 実験における 精密な三次元ビーム入射のための 蓄積ビームモニター

小川真治^A, 阿部充志^B, 飯沼裕美^C, 大谷 将士^B, 佐々木憲一^B,
佐藤優太郎^D, 中山久義^B, 松下凌大^E, 三部勉^{BE}, 山中隆志^A,
他 J-PARC muon g-2/EDM コラボレーション

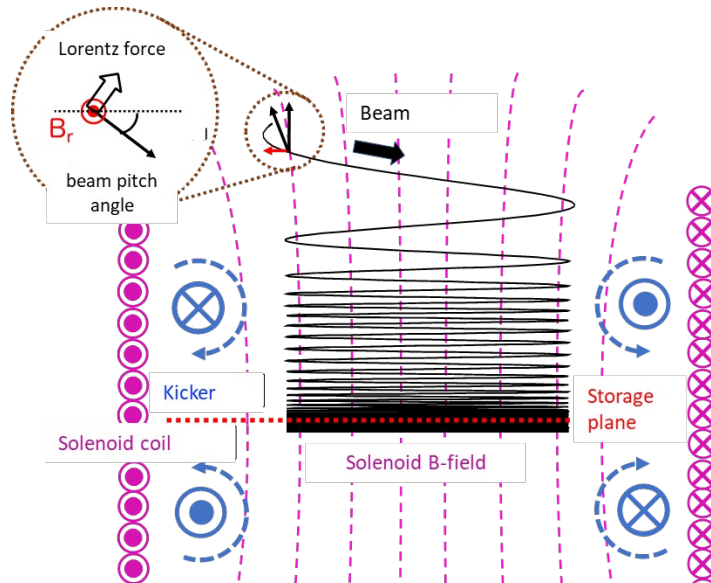
九大^A, KEK^B, 茨大^C, 新大^D, 東大^E

1. 3次元らせんビーム入射
2. 蓄積ビームモニター的设计
3. モニター試作機の製作



今月FNALの最新結果が公表。
理論値からの逸脱が5 σ に到達

- E34実験では**低エミッタンスμ粒子ビーム**を(300MeV/c, ~1mm*mrad)
 $B_z=3.0T$, $R=33cm$ と**コンパクトな蓄積軌道**にビームを入射し、電場をかけずにビームを蓄積する。
- **3次元らせん入射**を行う。
 - ソレノイド磁石の上方からエミッタンスが小さいビームを斜め下に入射。
 - 適切な大きさの動径方向磁場
 (フリンジ磁場+キッカーコイルパルス磁場)を与え、蓄積平面へと導く。
 - 感じるフリンジ磁場は軌道に依存。入射ビームにはXY結合をかけておく。
 - 蓄積平面付近に弱収束磁場 $B_r = -n \frac{B_{0z}}{R} z$ をかけることでビームを蓄積する。



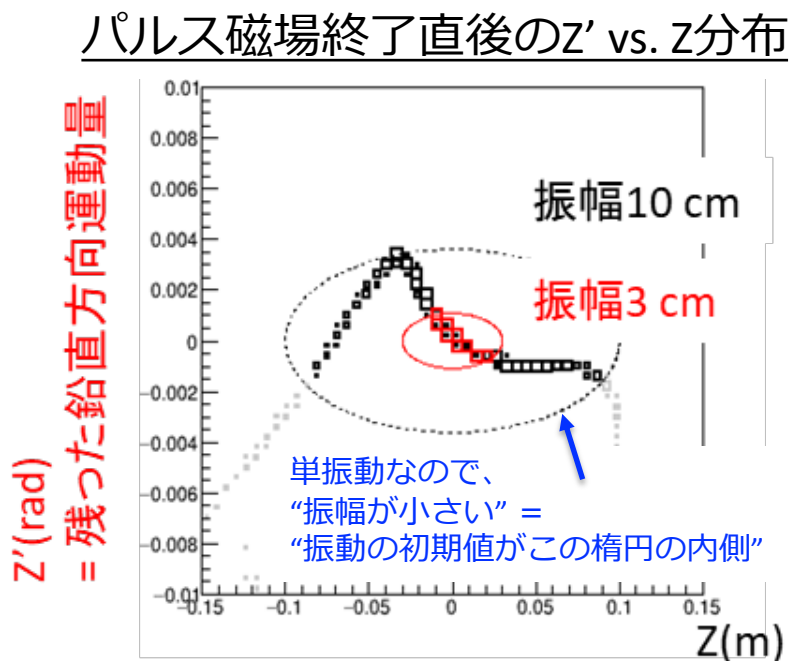
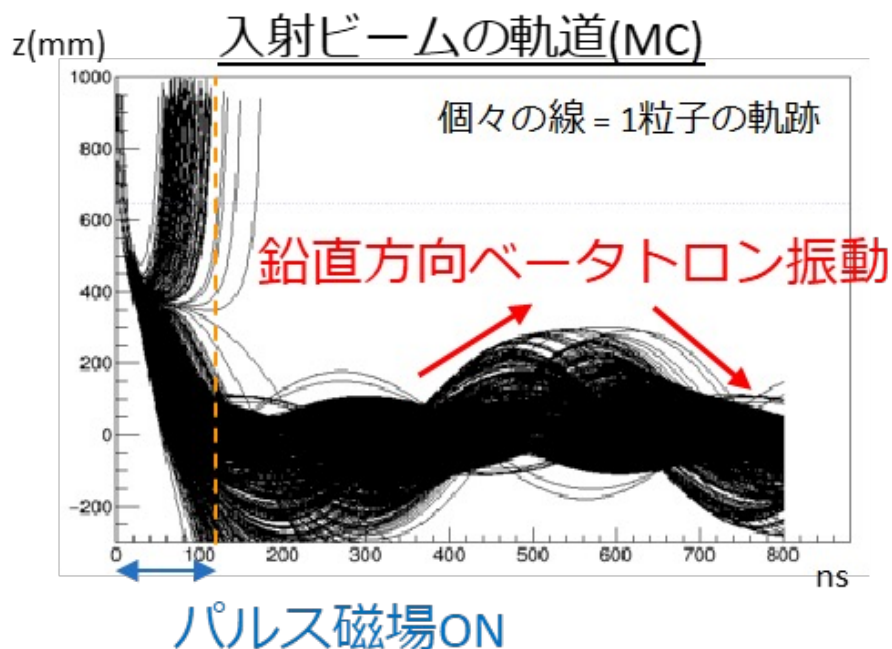
- ① injection region :
Fringe B-field of solenoid
 - Reduces beam pitch angle by B_r
- ② Kick region :
Pulsed B-field by kicker coil.
 - Vertical kick of beam by B_r
- ③ Storage region :
Weak-focusing B-field
 - Beam storage with betatron oscillation

$$B_r = -n \frac{B_{0z}}{R} z$$

$$B_z = B_{0z} - n \frac{B_{0z}}{R} (r - R) + n \frac{B_{0z}}{2R^2} z^2$$

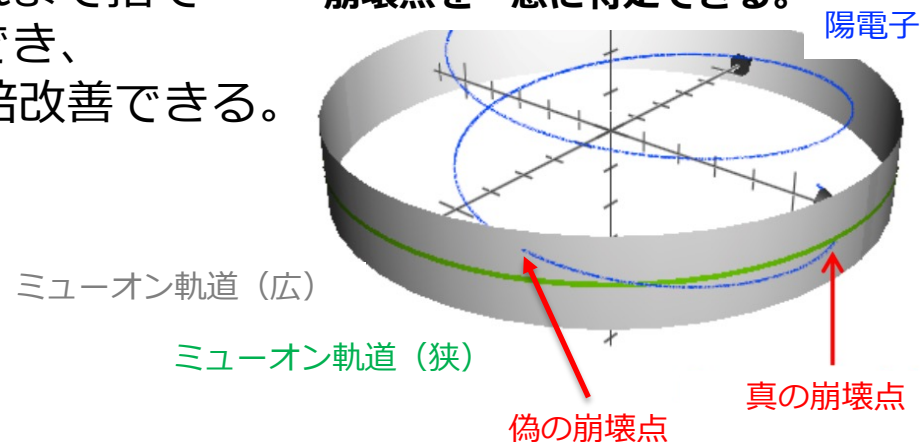
$$n = 1.5 \times 10^{-4}$$

- 蓄積後のビームは以下の運動をする。
 - 運動量：300MeV/c, 強度： 10^4 muon/pulse
 - 1-3バンチで入射し、円軌道をサイクロトロン周期7nsで周回。
 - 鉛直(z)方向にベータトロン振動（周期約600ns）を行う。
 - 弱収束磁場($B_r \propto -z$)に従った単振動。
 - 振幅・位相はパルス磁場終了時点でのz-z'に依存
 - 水平(R)方向の振動は鉛直(z)に比べて小さい。



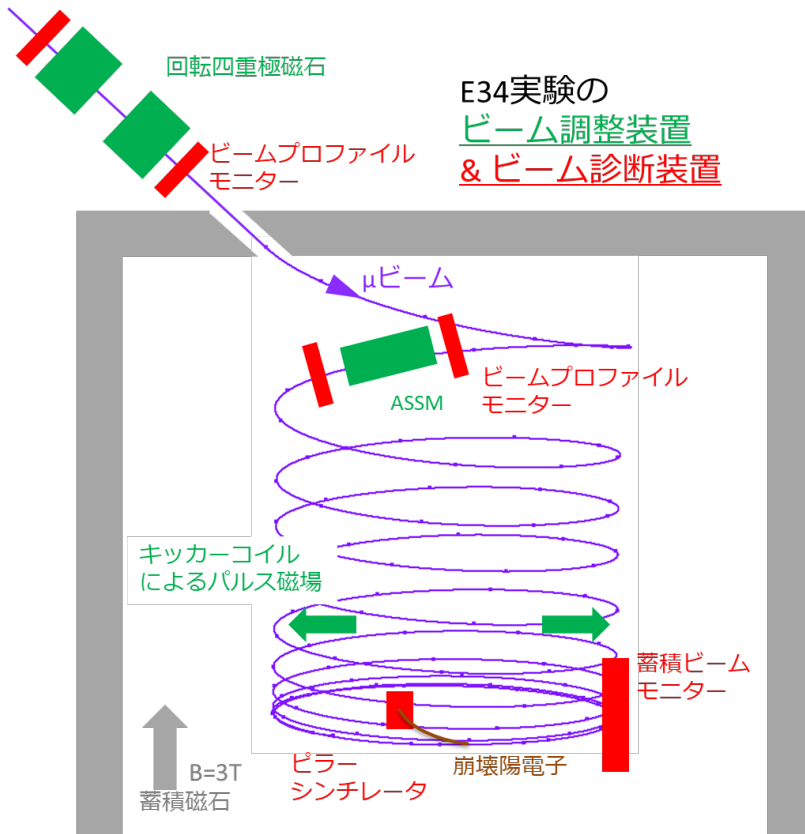
- 鉛直方向ベータトロン振幅を抑えることが物理感度の改善に直結する。
 - 理想的な一様磁場(3T) + 弱収束磁場は蓄積平面上下5cmで保証される設計。できるだけ多数の μ 粒子をこの範囲に入射したい。
 - 更に狭い領域(蓄積平面上下3cm程度)に入射できれば、 $g-2/EDM$ の統計誤差が大幅改善できる可能性も議論中^[1]
 - μ 粒子崩壊点の候補は陽電子飛跡と μ 粒子ビーム蓄積領域の交点から再構成。
 - 狭い領域に入射することで、崩壊点・陽電子放出方向を一意に再構成できる。
 - 放出角度を用いることで、これまで捨てていた低運動量陽電子も活用でき、muon $g-2$ の統計誤差を最大1.7倍改善できる。

μ 粒子ビームが振動している領域を狭く(灰色→緑色)すると、崩壊点を一意に特定できる。



[1]: 日本物理学会2023年春季大会

- ベータatron振幅を小さくするためには、
振幅を測定しビーム調整にフィードバックをかけることが必要。
 - さらに入射直後のz-z'の形状がわかれば、ビーム調整への指針となる。
(参照：本日ポスター発表 THP04)
- そのための蓄積軌道の上に設置できる蓄積ビームモニターを考案した。
→ 本talkのテーマ



ビーム調整

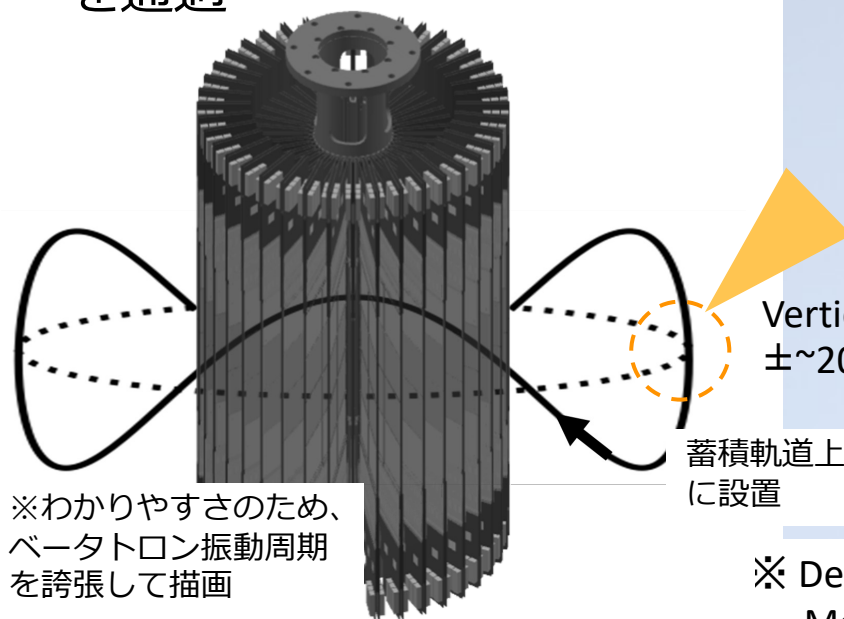
- 回転四重極電磁石
：位相空間(XY結合)調整
- Active Shield Steering Magnet (ASSM)
：ピッチ角調整
- キッカーコイル
：動径方向パルス磁場の調整

ビーム診断

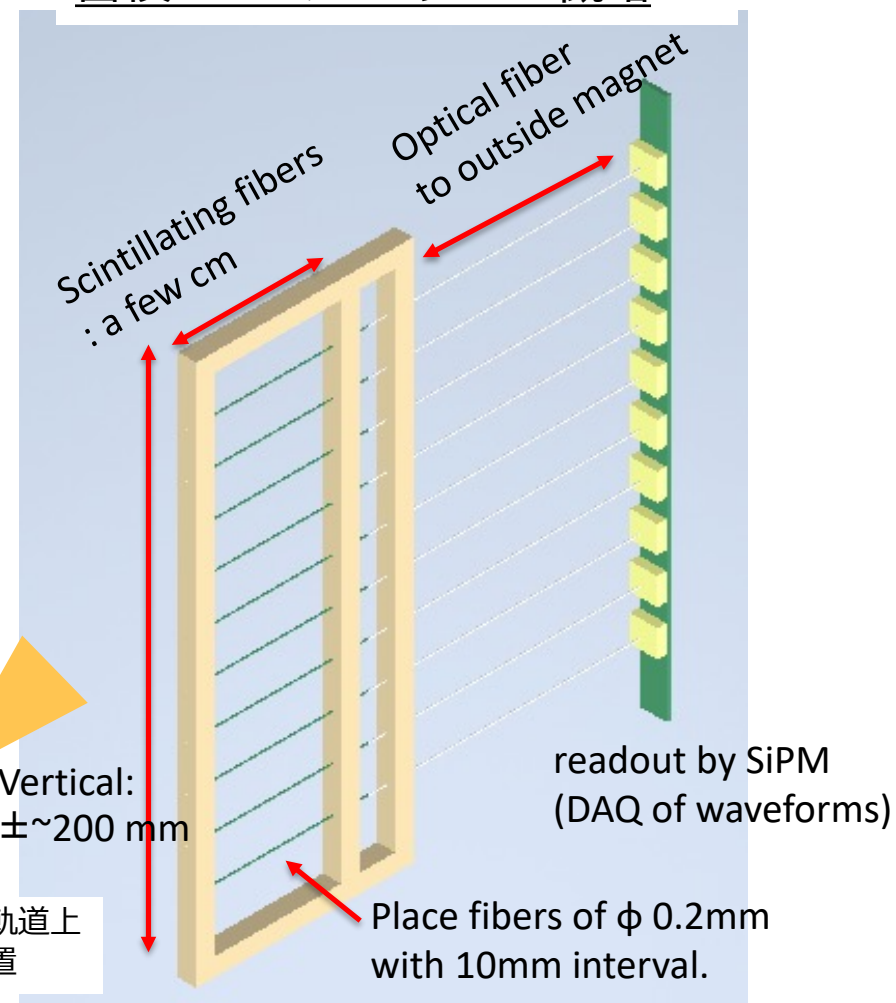
- プロファイルモニター
：入射前ビームの測定
- 蓄積ビームモニター
：蓄積されたビームの測定
- ピラーシンチレーター
：サイクロトロン周期(=運動量絶対値)の測定

1. 3次元らせんビーム入射
2. 蓄積ビームモニター的设计
3. モニター試作機の製作

- シンチレーションファイバーにより鉛直方向のビーム運動を測定。
 - 単粒子を検出可能な技術でありE34実験の低強度ビームに対応できる。
- 蓄積されたビームは周期約600nsで鉛直方向に振動しながら、サイクロトロン周期7nsおきにモニターを通過



蓄積ビームモニターの概略

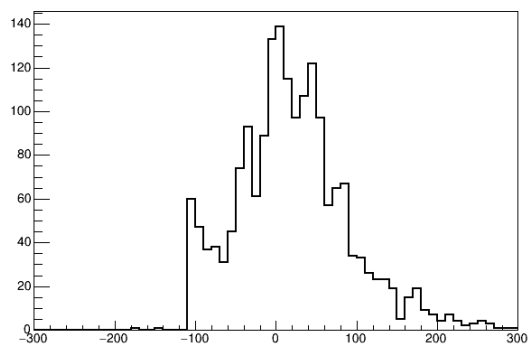


- ※ Destructive measurement.
Move to parking position during physics DAQ.

- **細線シンチレーションファイバー(直径0.2mm)を幾何学的占有率2%とまばらにおくことで実効的な物質量を低減。**
 - モニターを何度も通過するビームに対して散乱の影響を抑えるため。
- モニターが有る場合と無い場合を比較してシミュレーションによりビーム分布への影響を評価。
 - 散乱により分布が多少なまるものの影響は限定的。

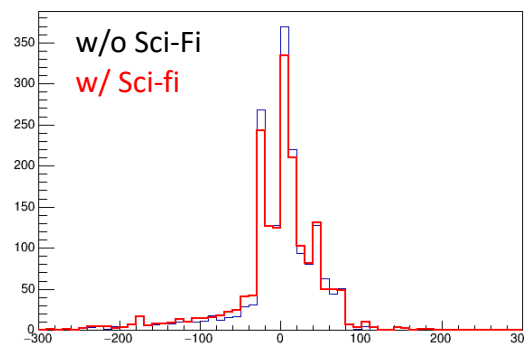
蓄積ビームの高さ分布 (シミュレーション)

#of muon just after injection



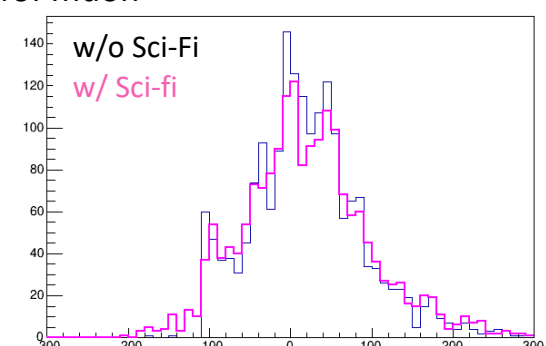
Vertical position(mm)

#of muon 150ns after injection



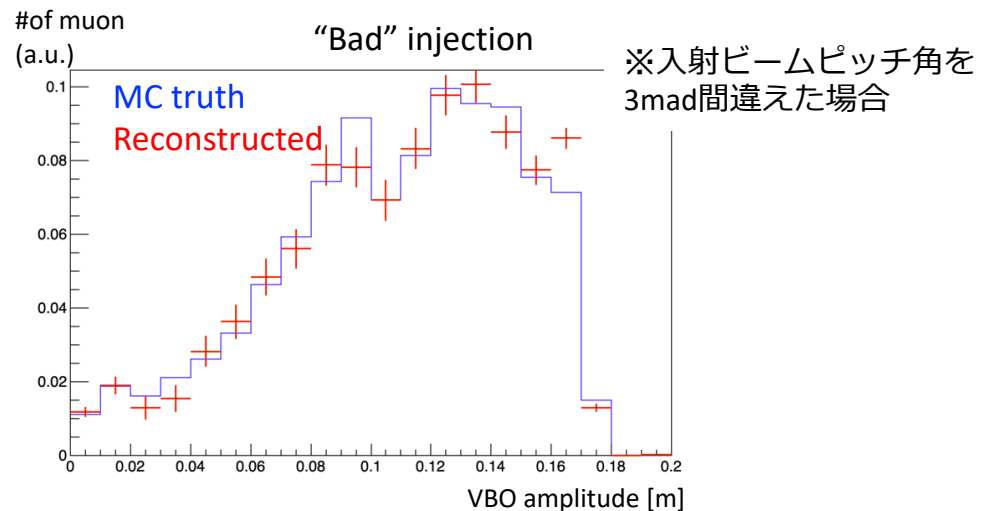
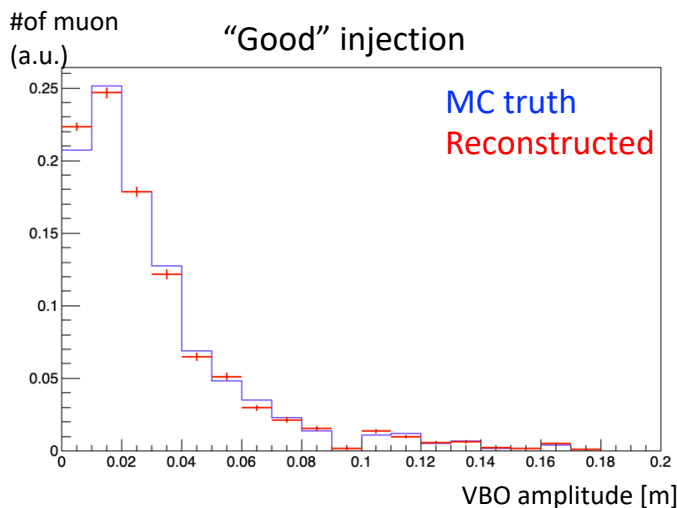
Vertical position(mm)

#of muon 600ns after injection



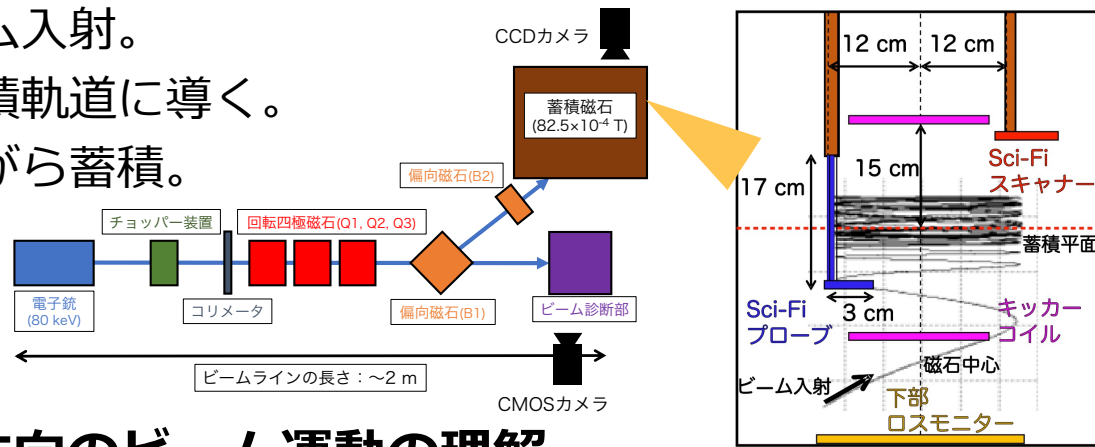
Vertical position(mm)

- 測定されるのは鉛直方向ビーム位置分布の時間変動。
 - 様々な振幅と位相を持った多数の μ 粒子の単振動の重ね合わせ
- まず知りたいのは、ベータトロン振幅の分布。** 周期の一様性（弱収束磁場 n 値の鉛直方向一様性により担保）を活用したアルゴリズムを開発。
 - $A(z) = f(|z|) - \int_z^\infty dz' A(z) / \sqrt{1 - (z/z')^2}$
($A(z)$:振幅分布、 $f(z)$:一周期分のビーム位置平均)
 - 蓄積平面から遠い側のファイバーから近い側に帰納的に再構成できる。
- 振幅分布の形状を概ね再構成できており、本モニターの情報に基いたビーム調整が可能となる。**
- 次の目標：時間変動にも着目して、 z - z' 分布を再構成する。**



1. 3次元らせんビーム入射
2. 蓄積ビームモニター的设计
3. モニター試作機の製作

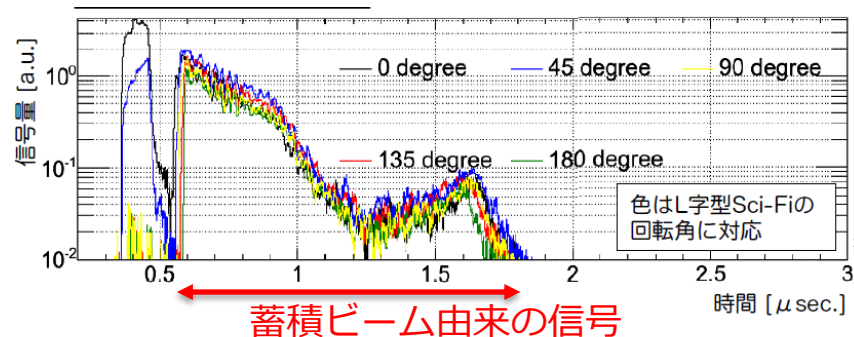
- KEKにある入射試験装置に導入する目的で蓄積モニター試作機を製作
 - 電子銃から来る80 keVの電子ビームを蓄積磁場 82×10^{-4} Tに入射。
 - **本番と同じ手法でビームを蓄積→ 3次元らせん入射の実証を目指す**
 - 鉛直方向斜めにビーム入射。
 - パルス磁場により蓄積軌道に導く。
 - 鉛直方向に振動しながら蓄積。



試作機導入の目的：水平方向のビーム運動の理解

- ビームの蓄積自体には成功^[1]
 - 蓄積時間が $2 \mu\text{s}$ 程度と短い（本番： $>40 \mu\text{s}$ ）
 - 蓄積信号波形が理解しがたい。
- 蓄積後にビームが水平方向に偏心していると推測^[2]

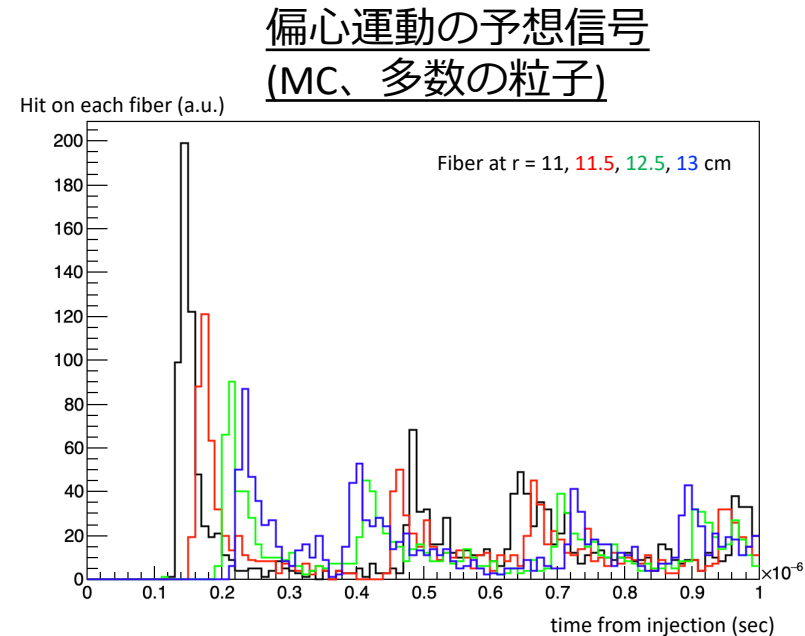
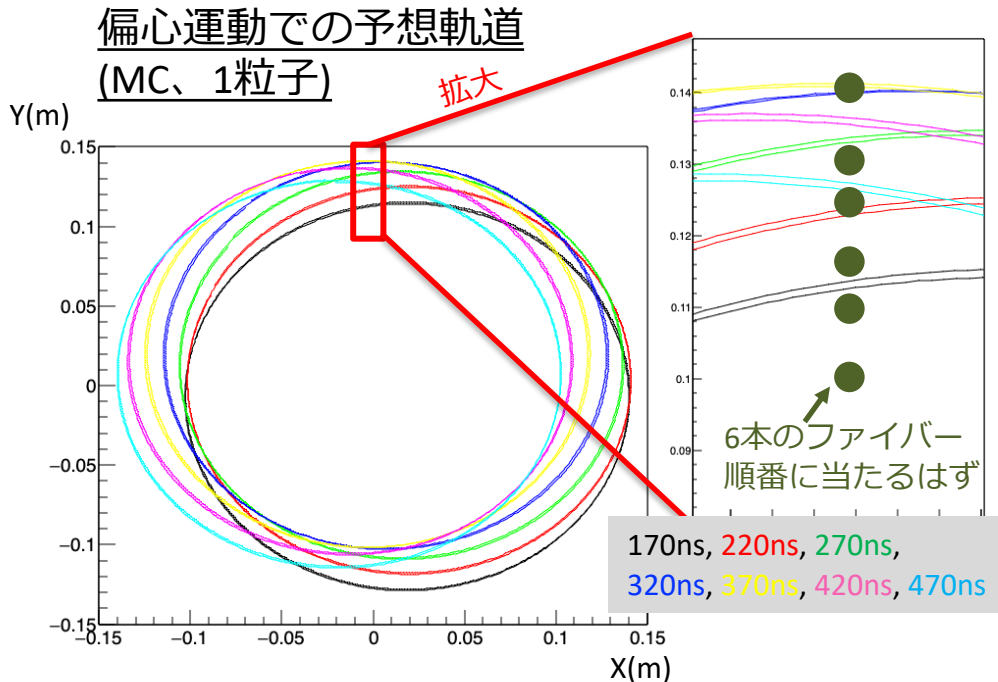
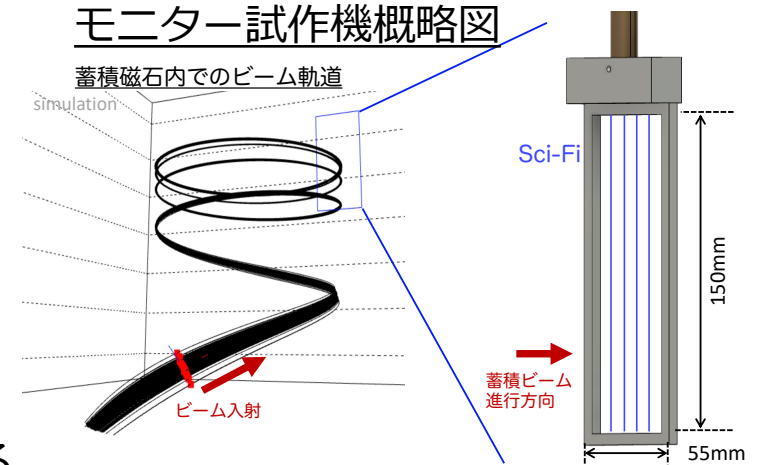
測定されたシンチファイバー信号^[1]



[1]: 第19回日本加速器学会年会

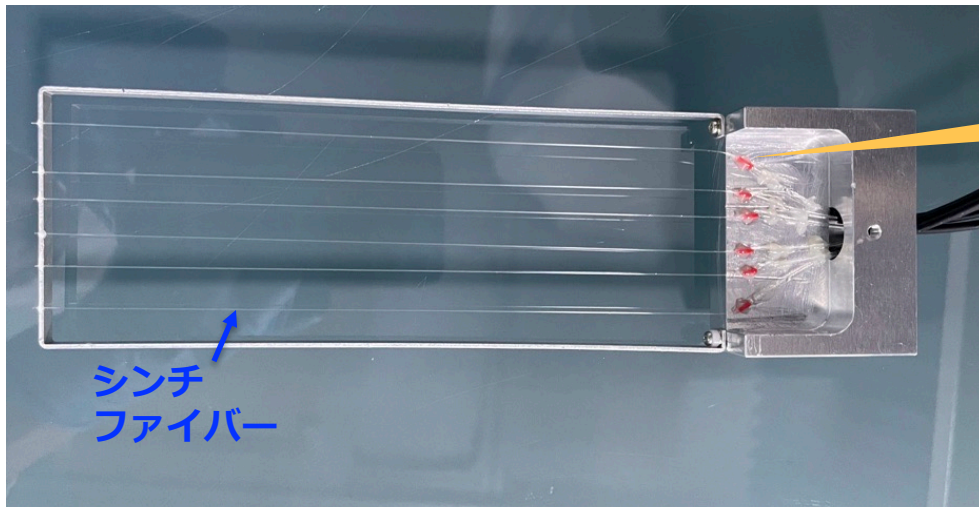
[2]: 日本物理学会2023年春季大会

- 水平方向のビーム運動を測定するため、**ファイバーを鉛直に張ったモニター試作機を導入する。**
 - 鉛直方向は弱収束磁場領域よりも長い15 cmの測定領域を確保し、蓄積後のビームを確実に捉える。
 - 蓄積軌道 $r \pm 2\text{cm}$ に6本のファイバーを並べ、この領域での偏心運動を捉えられる。

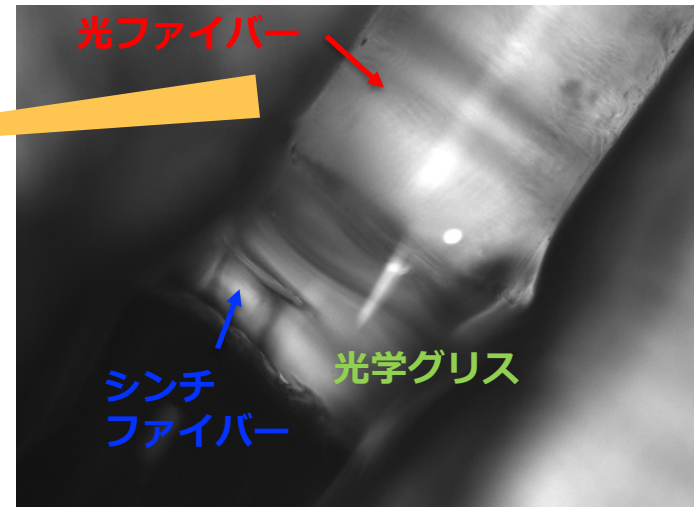


- **蓄積ビームモニターの試作機を製作**
- アルミ製フレーム上に細線シンチファイバーを紫外硬化接着剤で固定。
 - シンチ光は、シンチファイバー端面に固定された光ファイバーにより真空容器の外にある光センサーまで伝搬。
- シンチファイバーと光ファイバーの接合部については改善が必要
 - ガイドで軸合わせしたファイバー同士を固定。間は光学グリスを塗布。
 - 固定が緩く、軸ずれが起こり、シンチ光の一部が漏れている。
 - 実験本番では、ファイバー融着機の活用を検討。

製作したモニター試作機



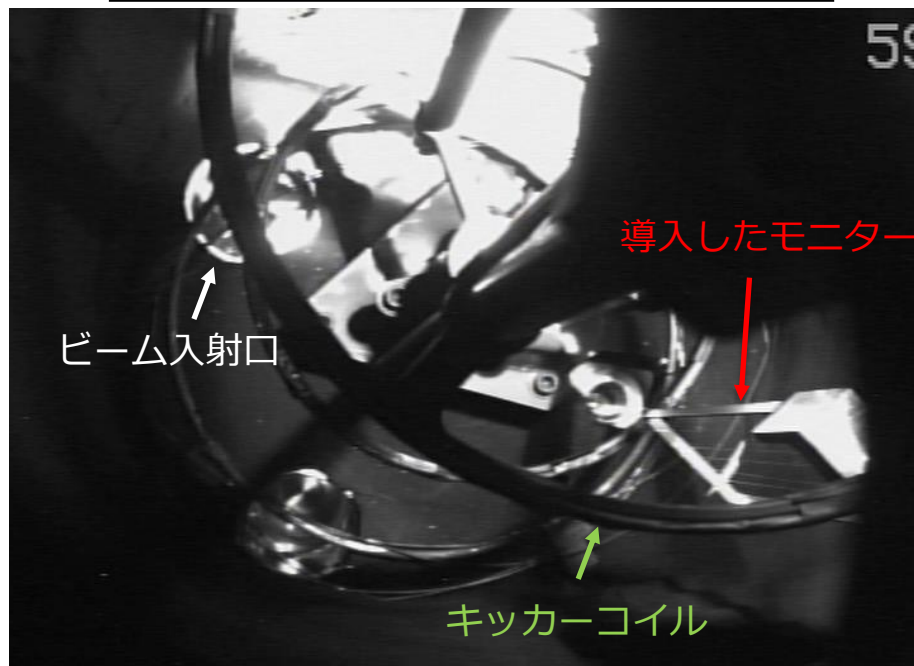
ファイバー接合部 (顕微鏡写真)



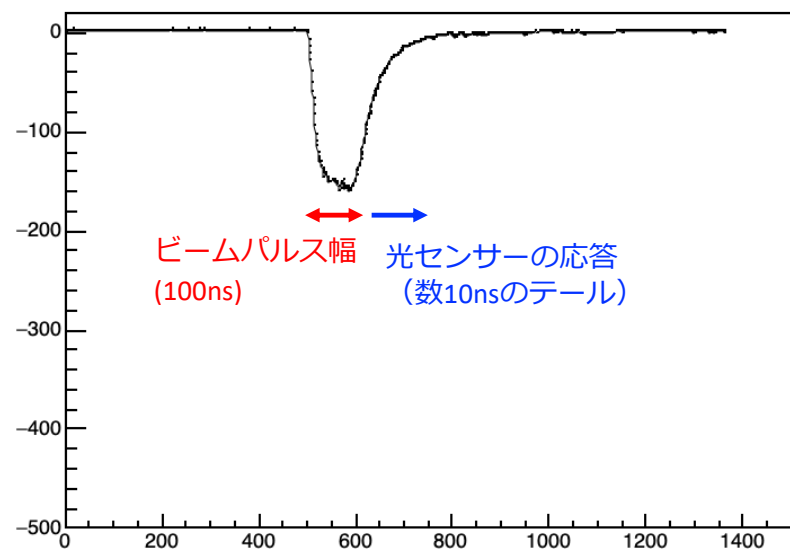
今後：試作機での蓄積ビーム観測に向けて 16

- 作成したモニター試作機を入射試験装置に導入。
 - ひとまずパルス磁場なしの場合で蓄積領域を通過するビーム由来の信号を確認。
 - 全てのファイバーから正常な信号を確認。
 - モニターを回転させ、ビーム分布の同じ点を複数ファイバーで測定し、ファイバー間の光量を較正
- 今後ビーム運動を理解し、十分な時間 ($>40\mu\text{s}$) のビーム蓄積を実現する

試験装置、蓄積磁石内（上から撮影）

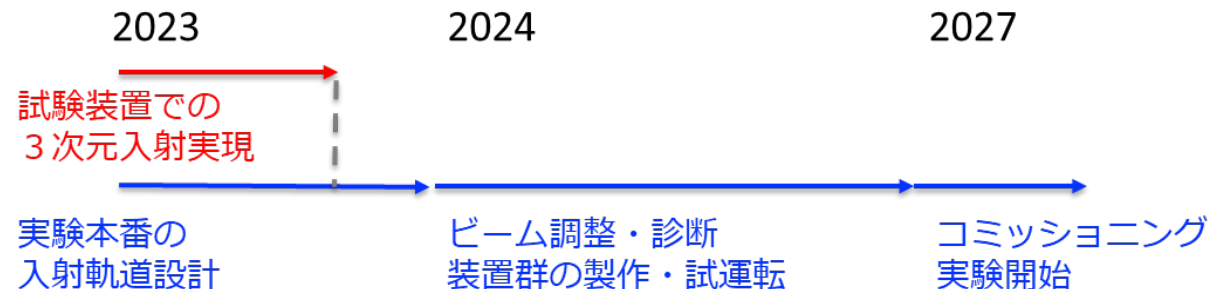


voltage(mV)



- J-PARC muon g-2/EDM実験では、3次元らせん入射法によりビームを入射する。
ビーム蓄積後の鉛直方向ベータトロン振幅を小さく抑えることが実験感度の改善に直結する。
- ベータトロン振幅を測定する蓄積ビームモニターを考案した。
 - ビームとの散乱を抑えるため、細線シンチレーションファイバー技術を活用する。
 - 測定量であるビーム位置分布から振幅分布が適切に再構成できることを確認した。
- 試作機を製作し入射試験装置に導入した。
 - 蓄積後のビーム運動を理解し、3次元らせん入射の実証につなげる。

今後の予定



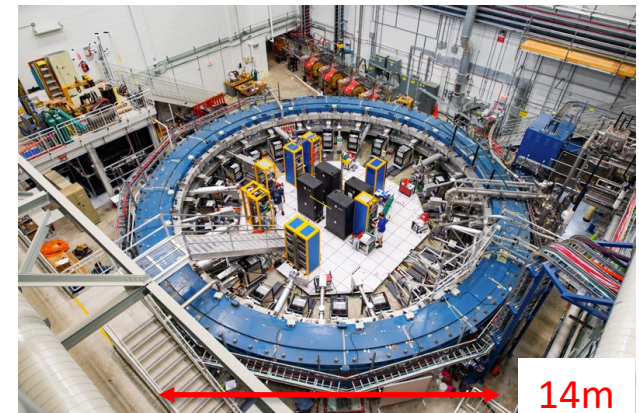
- Muon g-2/EDM can be measured from spin precession of muon in a uniform B-field.
 - time dependent spin information reconstructed from decay positron energy/momentum.

$$\vec{\omega}_a + \vec{\omega}_\eta = -\frac{e}{m_\mu} \left[\underbrace{a_\mu \vec{B}}_{\text{g-2}} - \left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} + \frac{\eta}{2} \left(\underbrace{\vec{\beta} \times \vec{B}}_{\text{EDM}} + \frac{\vec{E}}{c} \right) \right]$$

BNL/ FNAL experiment

$$\vec{\omega}_a + \vec{\omega}_\eta = -\frac{e}{m_\mu} \left[a_\mu \vec{B} - \underbrace{\left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right)}_{=0} \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} + \frac{\eta}{2} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{E}}{c} \right) \right]$$

- Magic gamma approach to cancel out 2nd term.
 - $p = 3.1 \text{ GeV}/c$
 - muon orbit: $\phi = 14 \text{ m}$ at $B = 1.45 \text{ T}$.
- Weak electric field focusing.



J-PARC experiment

- Measurement at $\vec{E} = 0$.
 - Storage by weak focusing B-field
 - Utilize low emittance muon beam.

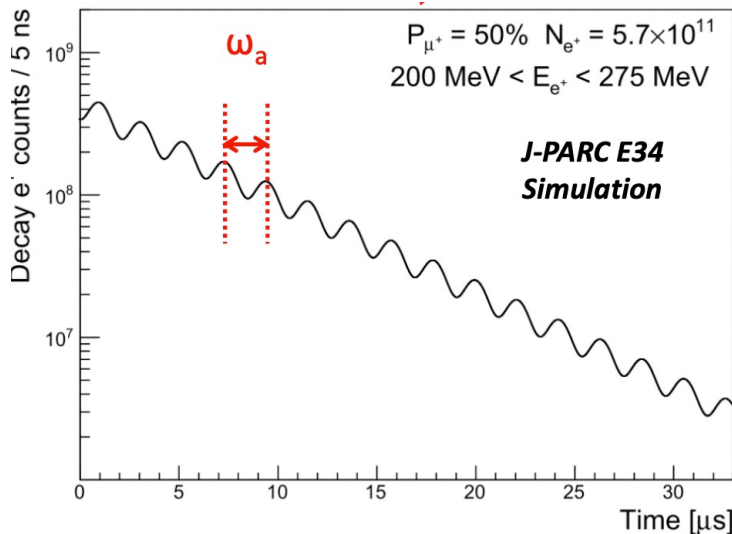
$$A_{UD} = \frac{N_U - N_D}{N_U + N_D} = \frac{PA' \sin(\omega_a t + \phi)}{1 + PA \cos(\omega_a t + \phi)}$$

A, ω_a, ϕ : Parameters of g-2 wobble.
 A' : EDM amplitude

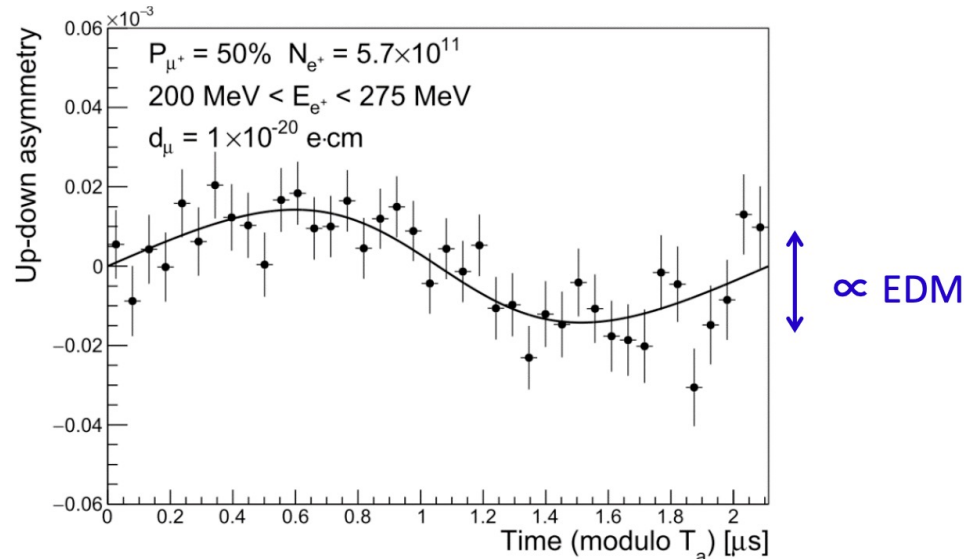
$$\vec{\omega}_a + \vec{\omega}_\eta = -\frac{e}{m_\mu} \left[\underbrace{a_\mu \vec{B}}_{g-2} - \left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \underbrace{\frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c}}_{=0} + \frac{\eta}{2} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} + \underbrace{\frac{\vec{E}}{c}}_{=0} \right) \right]$$

g-2 EDM

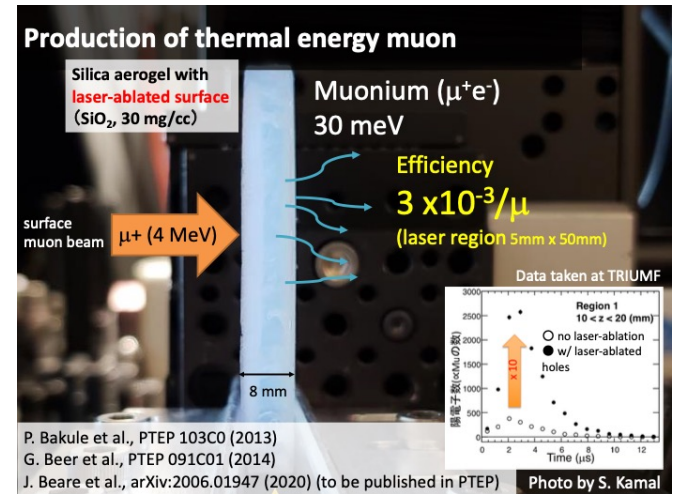
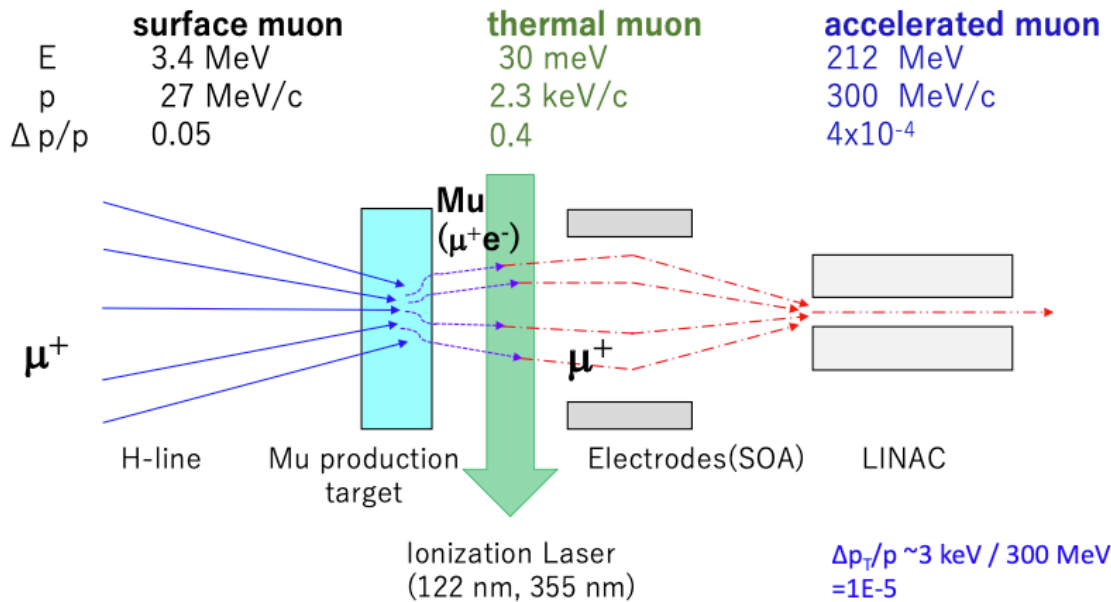
Number of detected positron (p: 200-275 MeV)



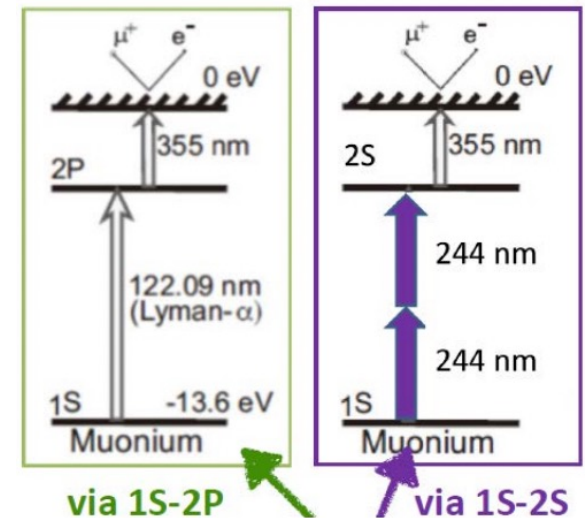
Up-down asymmetry of detected positron



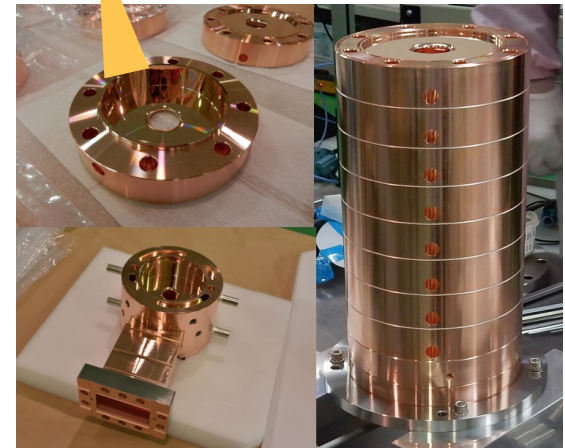
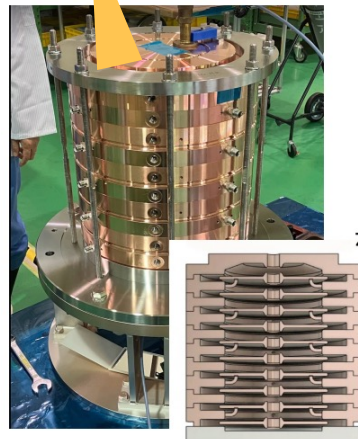
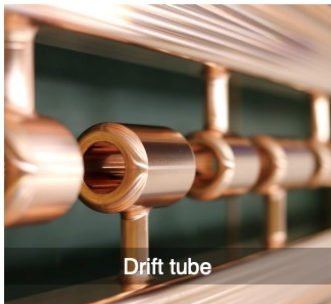
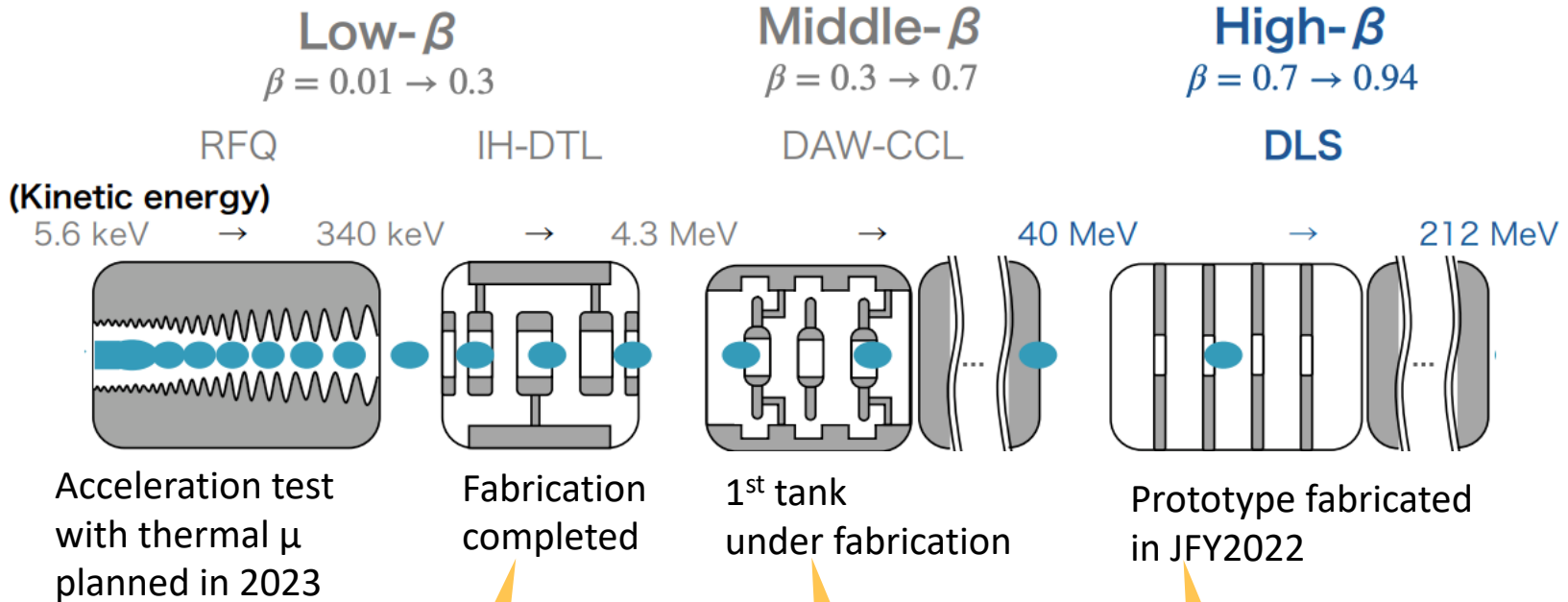
- Low emittance muon beam by reacceleration of thermal muon.
 - Silica aerogel target : Surface muons stopped, and thermal muoniums emitted.
 - Laser ablated aerogel to increase the efficiency.



- Thermal muonium ionization by laser.
 - Two scheme under consideration.
 - 1S-2P excitation by 122nm or 1S-2S excitation by 244nm

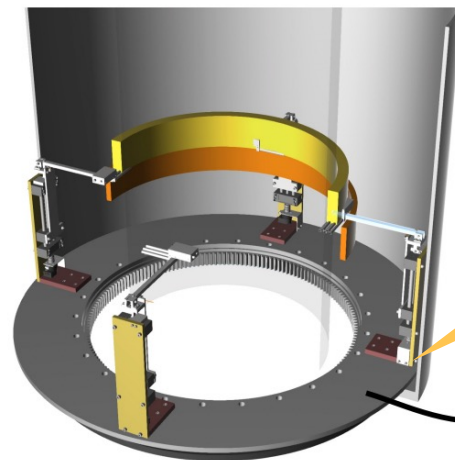


- Muon reacceleration to 300MeV/c by muon LINAC.
 - Series of 4 types of cavities depending on the muon β of each stage.

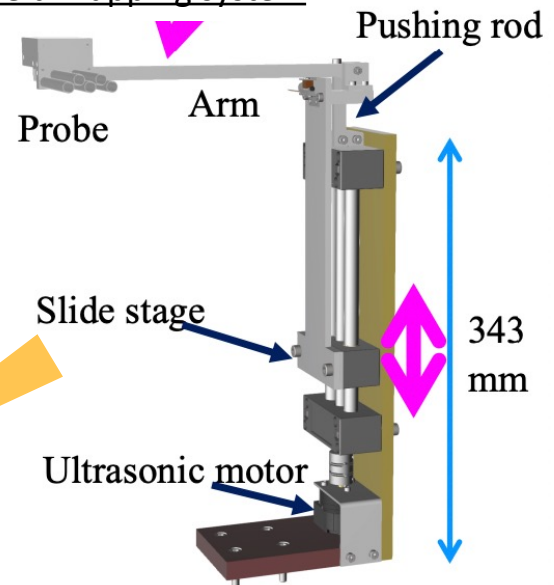


- Highly uniform (0.1ppm) magnetic field will be achieved by shimming.
 - Compact solenoid magnet based on MRI magnet technology.
 - B-field measurement by a high precision NMR probe
- Local uniformity of 1ppm is already demonstrated by the MUSEUM magnet.
- Field mapping system under design.
 - B-field meas. in the muon storage region.
 - Theta motion + z motion.

Superconducting magnet for MUSEUM experiment.



Field mapping system



BACKUP -入射-

We therefore propose a dedicated experiment, which permits the search for the μEDM with a sensitivity of about $6 \times 10^{-23} e \cdot \text{cm}$ per year of data-taking. The baseline concept plans to use muons with a momentum of $p = 125 \text{ MeV}/c$ ($\beta = 0.77$) and an average polarization of 90% from the μE1 beam line at PSI with a particle flux of up to $2 \times 10^8 \mu^+/\text{s}$. Two concepts are currently under evaluation and discussed in this letter of intent. In section III C we discuss a storage ring sketched in Figure 1a, with a magnetic field of $|\vec{B}| = 1.5 \text{ T}$ where muons are injected laterally, similar as described in [9]. The second concept, the helix μEDM in Figure 1b, is based on the idea of a vertical injection into a 3 T B-field similar as proposed by the J-PARC ($g - 2$) group [10] and is discussed in section III D.

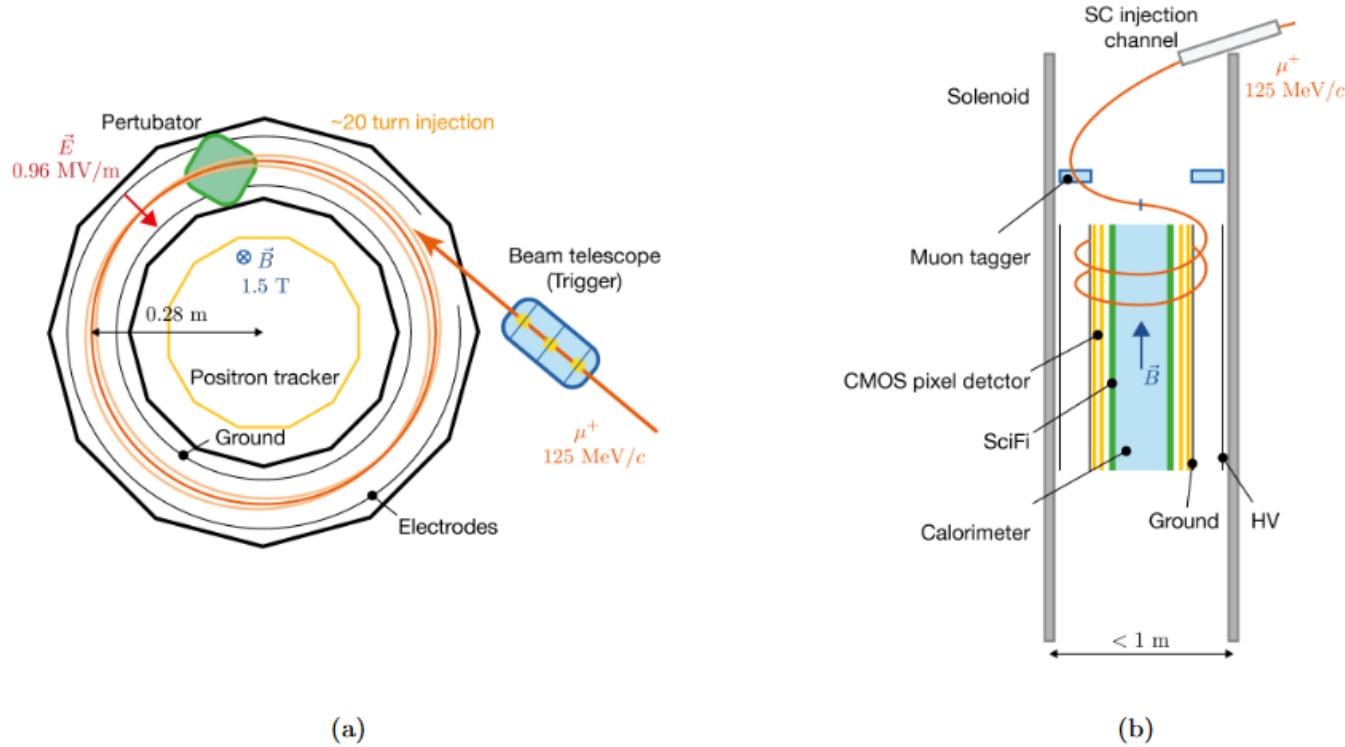
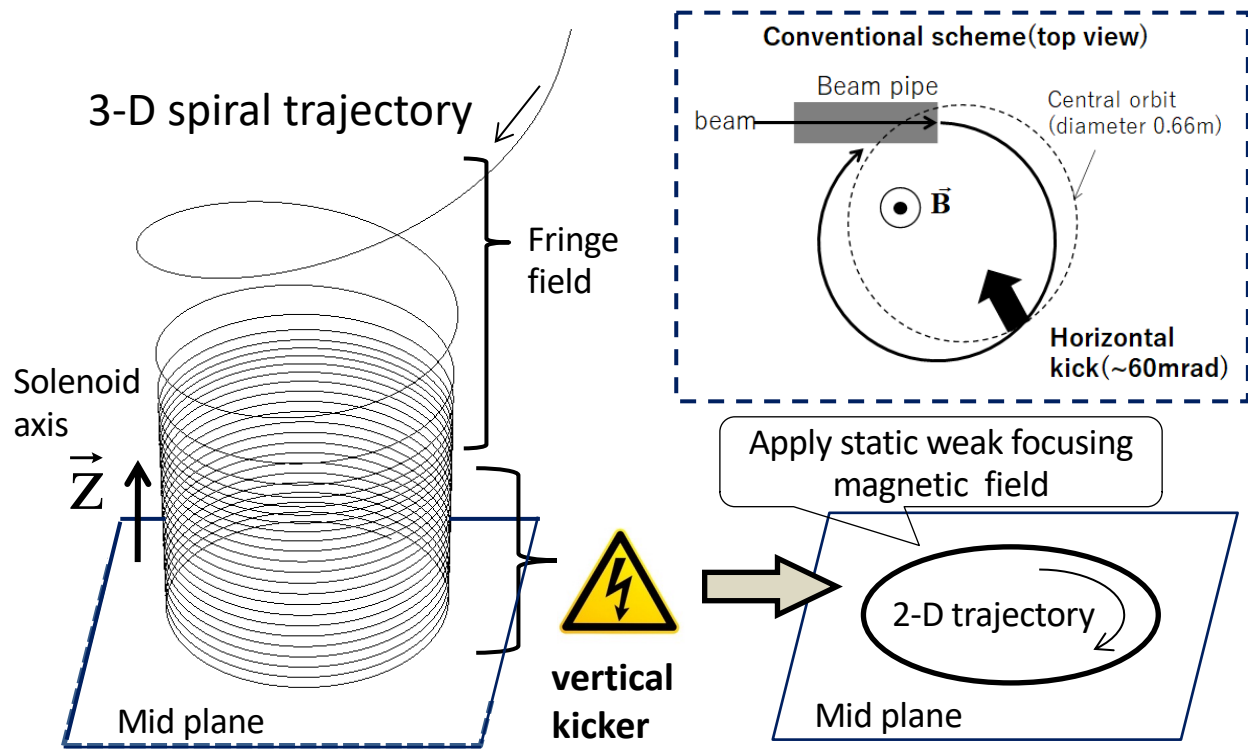
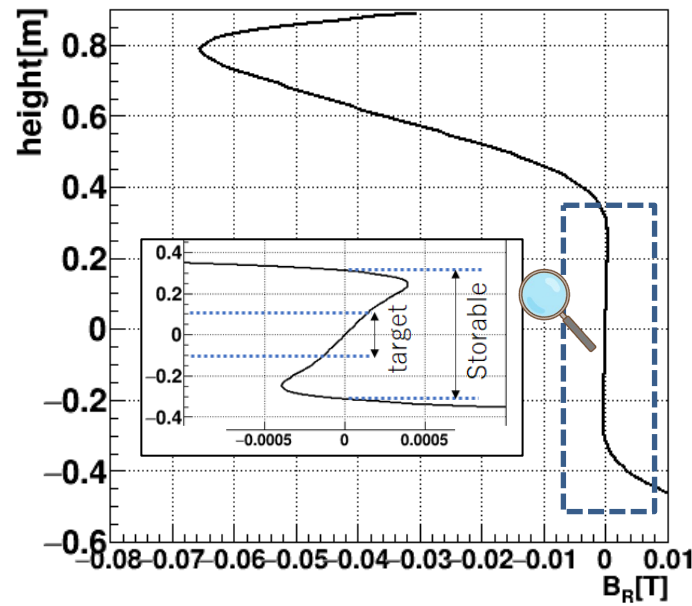
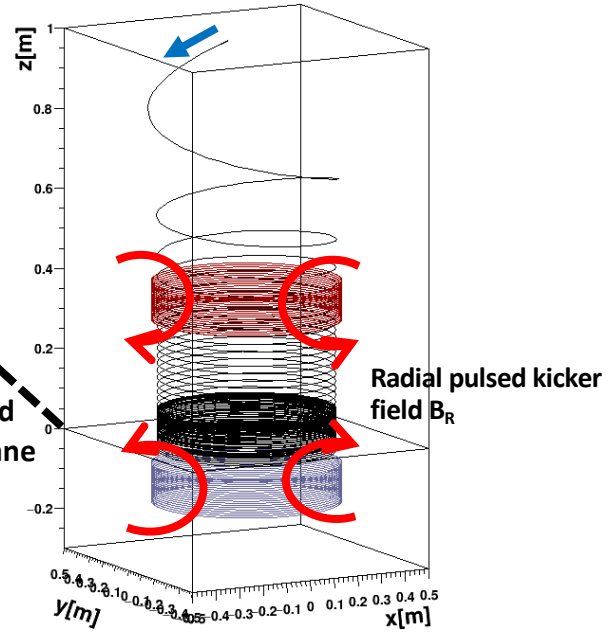
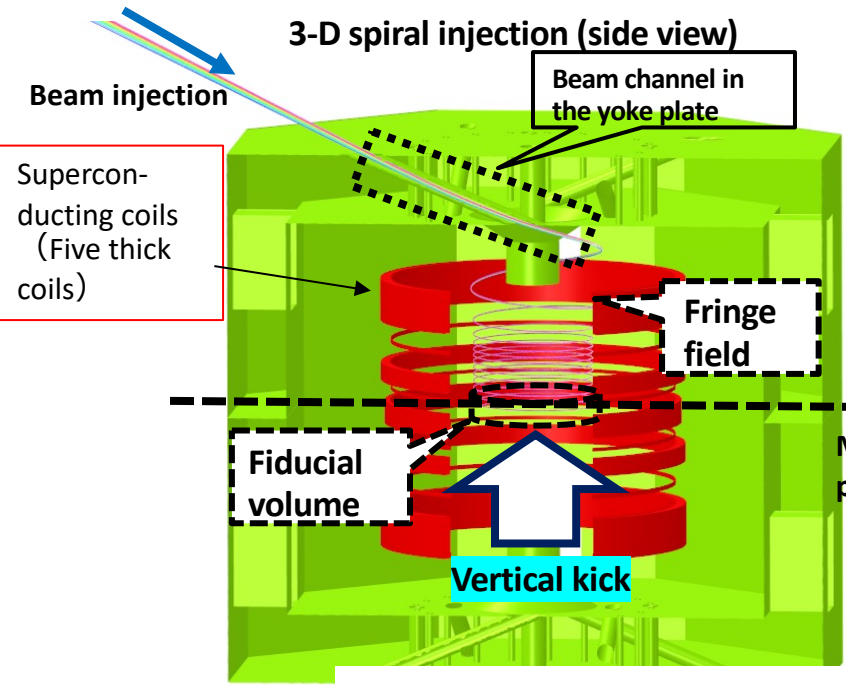


FIG. 1: Sketch of storage ring with lateral injection (a), and the helix μEDM search (b) using a vertical injection into a uniform solenoid field.



3-D spiral injection (side view)

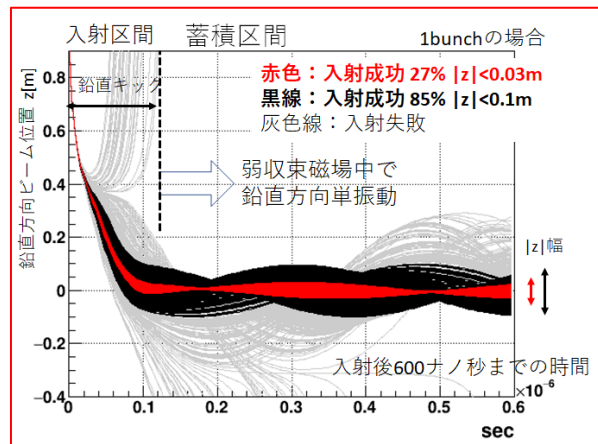
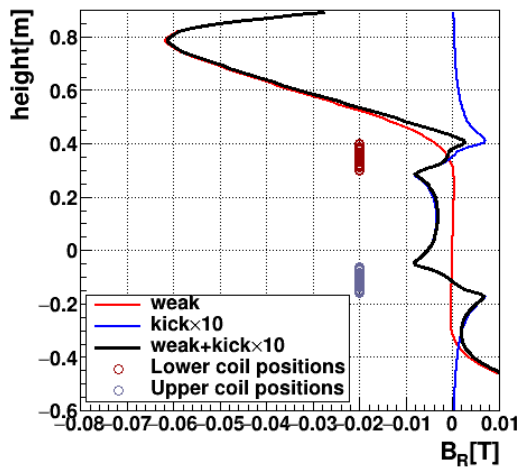


鉛直方向のビーム運動制御は弱収束磁場のみ！

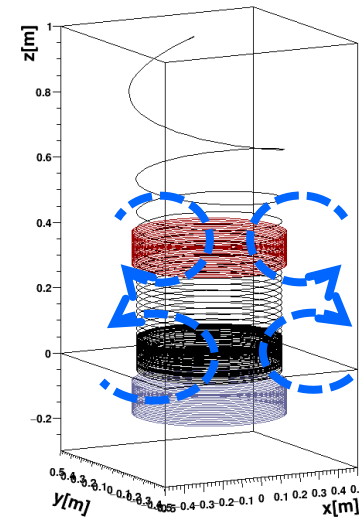
$$B_R = -n \frac{B_{0z}}{R_0} z,$$

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

Field index : $n=1.5E-4$



100本入射



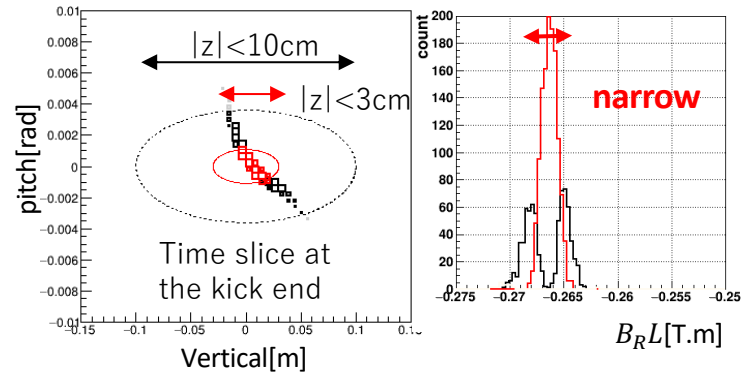
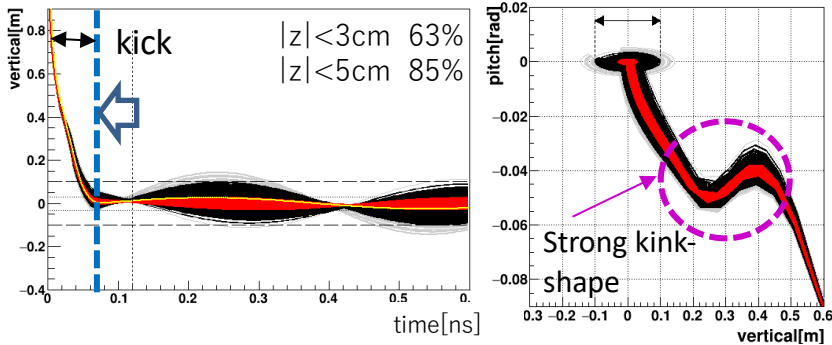
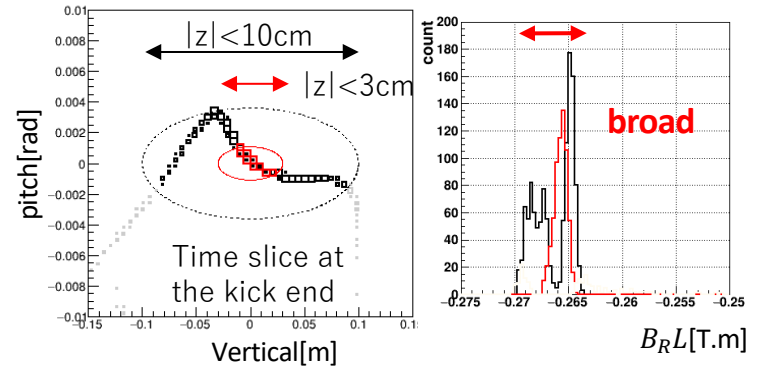
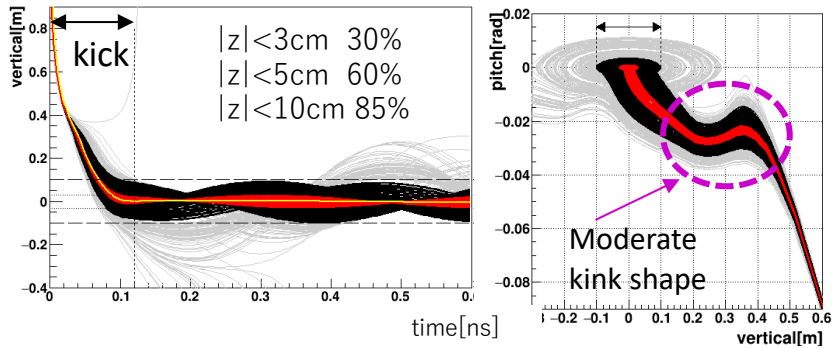
$$\times \text{halfsin} \frac{2\pi}{T_{kick}} (t - t_0)$$

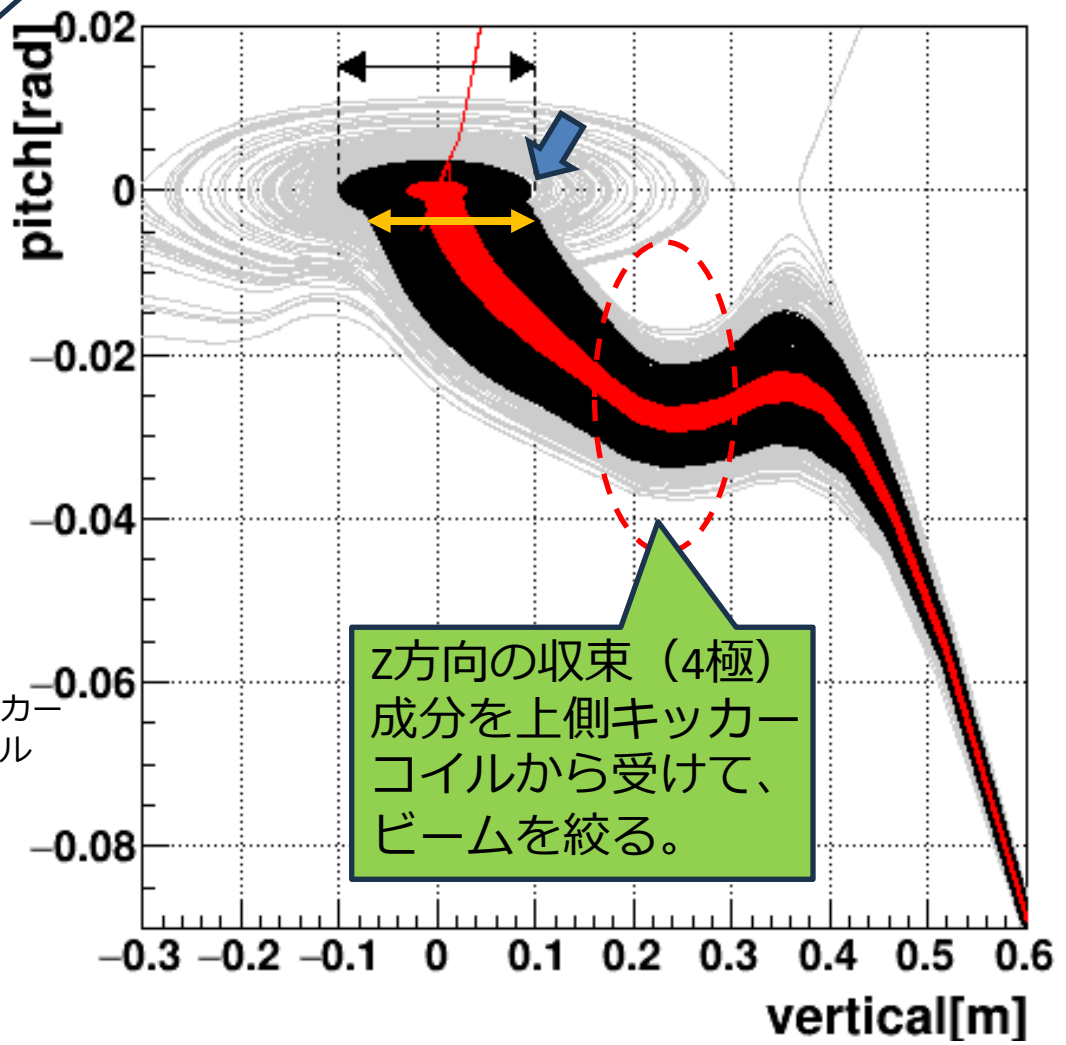
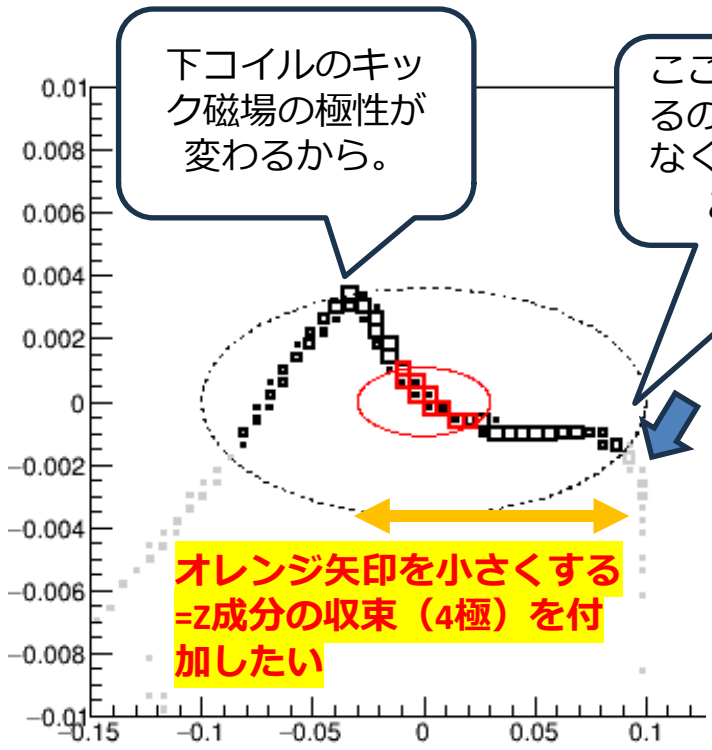
Effective radial kicker field

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

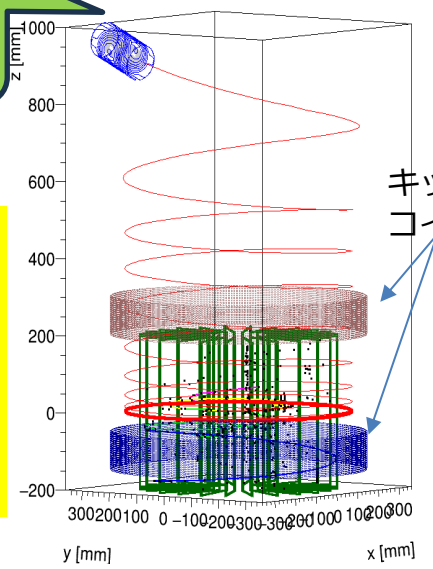
3.入射・蓄積効率UP/蓄積ビーム品質向上に向けた取り組み

$\int B_R dl \rightarrow B_{RL}$ 蓄積の制御
 コイル形状を変えずにキッカーパワーを上げる（ピッチ角大、短期間）
 と
 キック後の鉛直方向位相空間の広がりを小さくできる。 → B_{RL} 制御が良くなる。





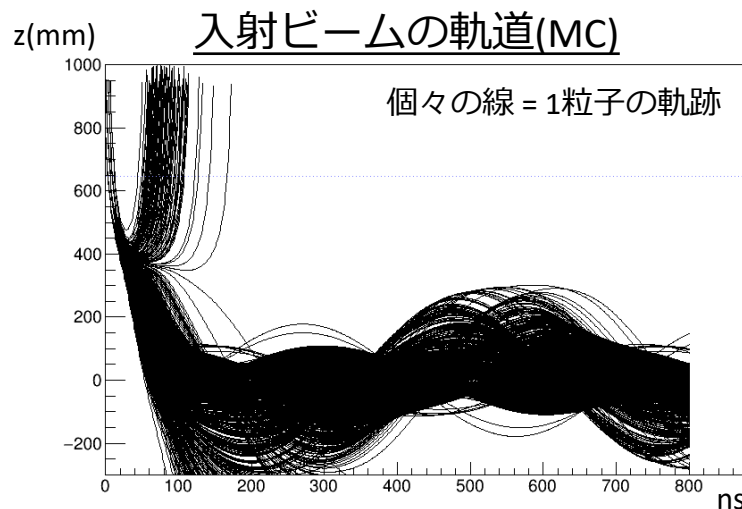
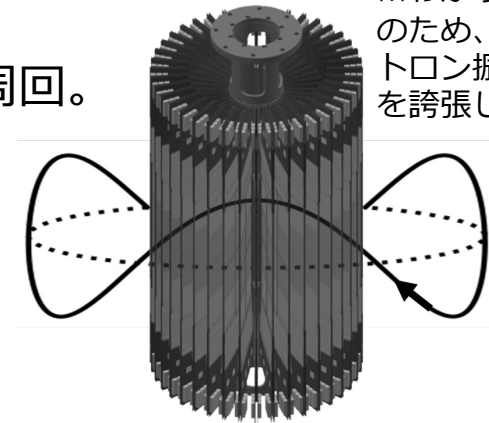
ASSM軌道調整電磁石(磁氣的に透明)



案: ASSMに4極成分を付加し、上キッカーコイルの収束を強化

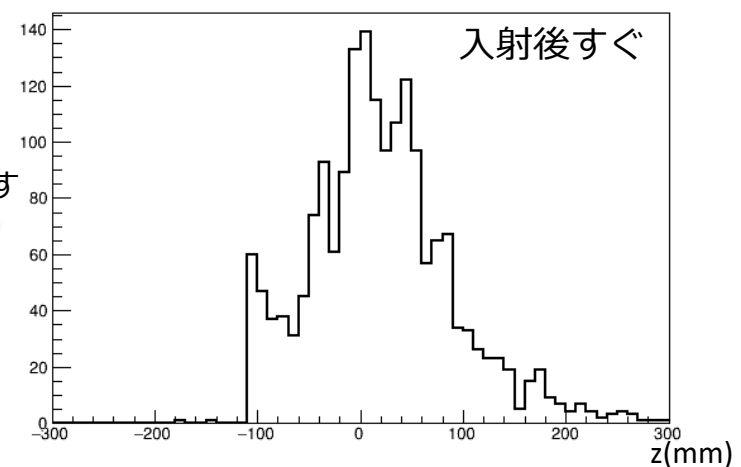
- 蓄積後のビームは以下の運動をする。
 - 1-3バンチで入射し、サイクロトロン周期7nsで周回。
 - 縦(z)方向にベータトロン振動 (周期600ns) を行う。位相はz-z'空間での初期点による。
 - 横(R)方向の分布は十分小さい。
 - 運動量：300MeV/c, 強度： 10^4 muon/pulse
- ベータトロン振動の振幅分布を知りたいので、ビームのz分布をベータトロン振動1周期の間測定できれば良い。
 - 振動1周期分での平均→振幅の情報
 - 振動1周期内での時間変化→初期位相の情報

崩壊陽電子検出器 ※わかりやすさのため、ベータトロン振動周期を誇張して描画



ある時間
を取り出す

蓄積ビームの高さ (z) 分布

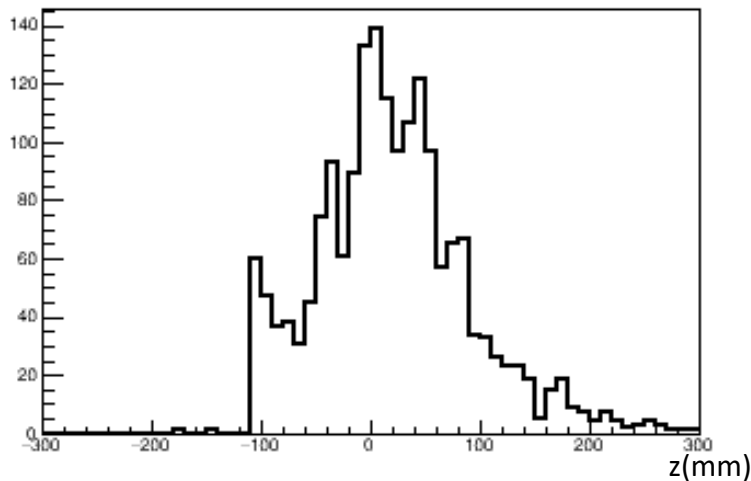


蓄積ビームモニターへの要求：物質質量 31

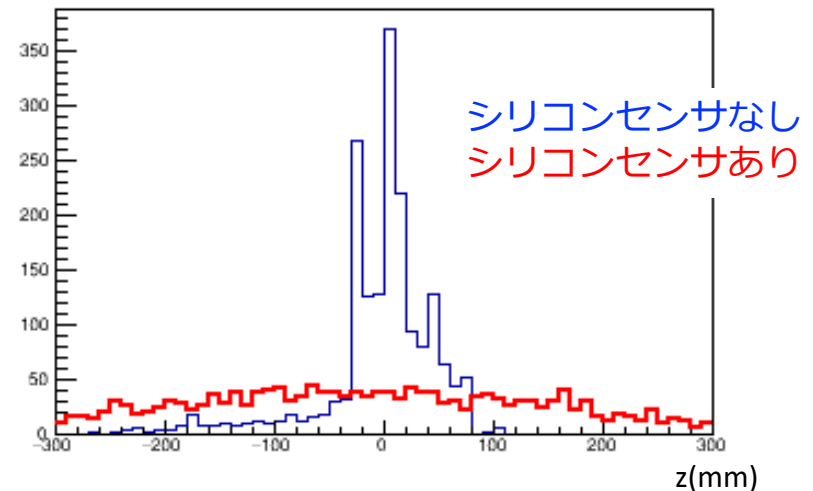
- 蓄積ビームモニターの難しい点：モニターの物質質量に対する要求
- ビームは蓄積領域に設置したモニターをサイクロトロン周期ごとに通過。
 - ベータトロン振動 1 周期までに80回ほど通過。
- そのため、モニターの物質質量が小さくなければ、多重散乱により測定すべきビームの分布が変化してしまう。
 - 例えば、シリコンセンサ(厚み0.3mm)をおくと、測定前に分布がなまってしまう。

蓄積ビームの高さ分布（シリコンセンサ設置案）

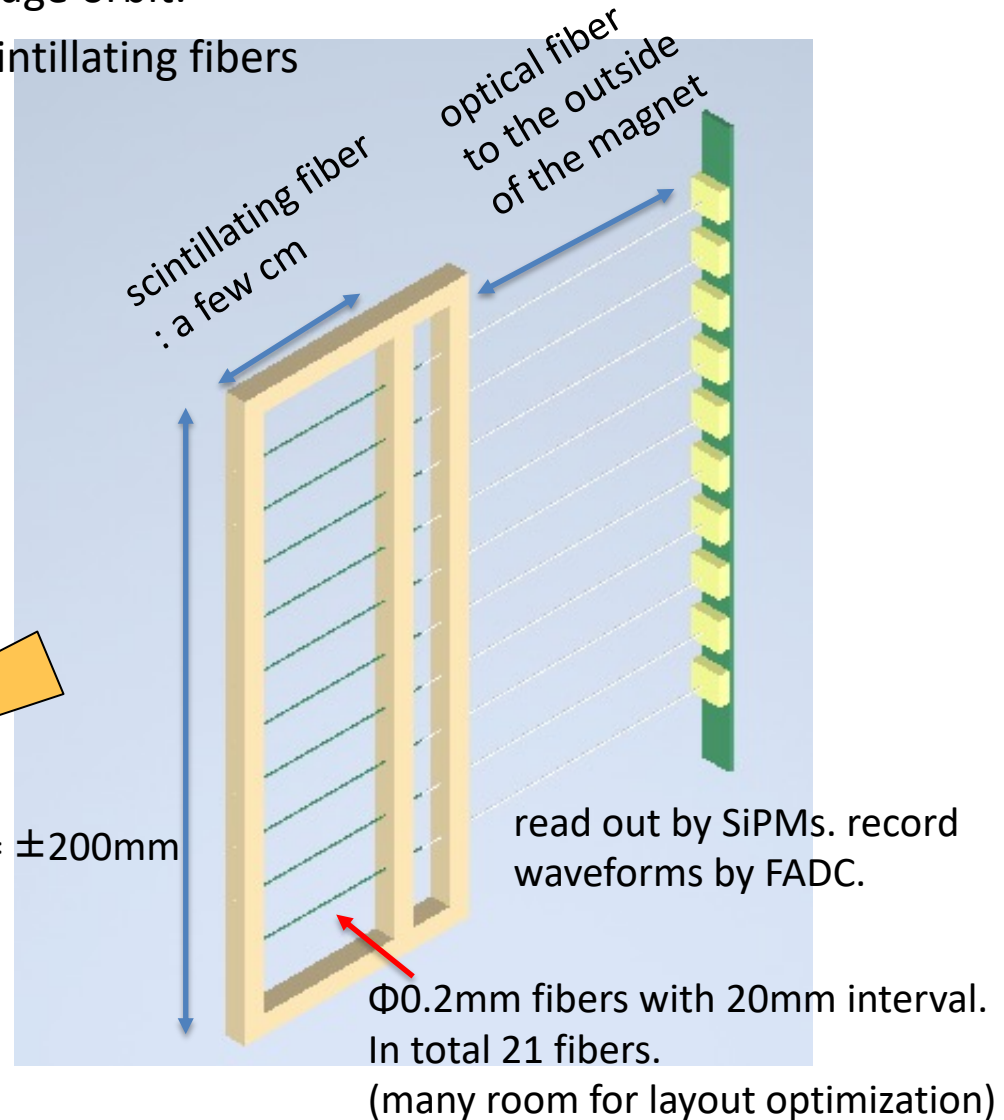
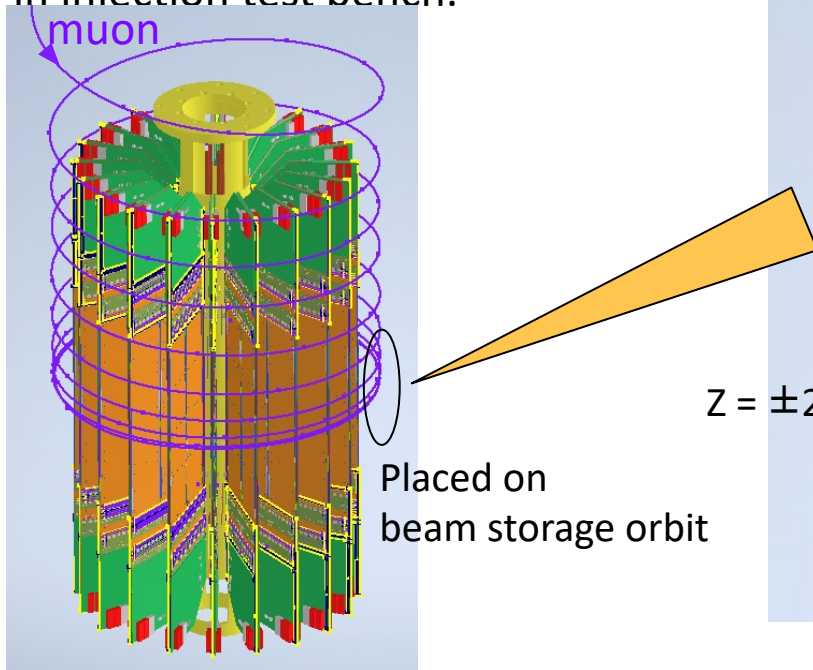
入射後すぐ



入射後150ns



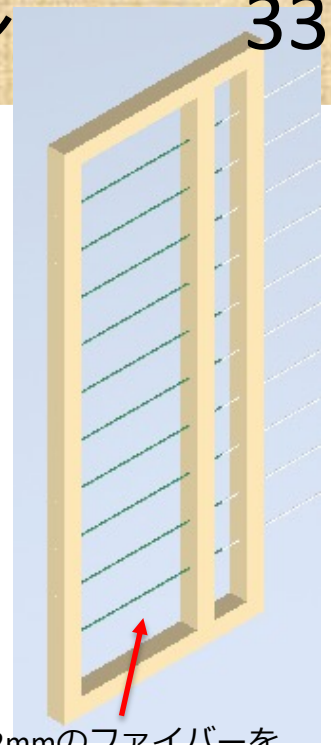
- Beam profile monitor installed on storage orbit.
- Beam profile monitor made by thin scintillating fibers ($\phi=0.2\text{mm}$) read out by SiPMs.
- **Low mass detector with low occupancy (1%).**
 - to prevent multiple scattering
- Prototype is being tested in injection test bench.



蓄積ビームモニターのデザイン

33

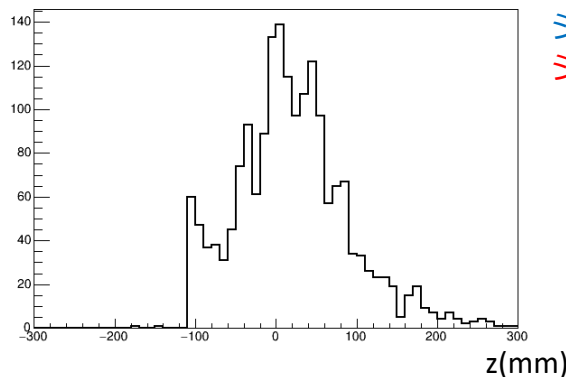
- 低物質質量を実現できる設計になっている。
 - 細線シンチレーションファイバー(直径0.2 or 0.25 mm)を採用。
(サンゴバン社やクラレ社から購入可能)
 - まばらに配置することで、占有率を約1%に抑える。
 - 縦方向振動により、個々の粒子が通過する z の位置は毎周期変化することを活用。
- ベータトロン振動 1 周期後でも、
ビームプロファイルの測定が可能に。



直径0.2mmのファイバーを
20mm間隔で配置。

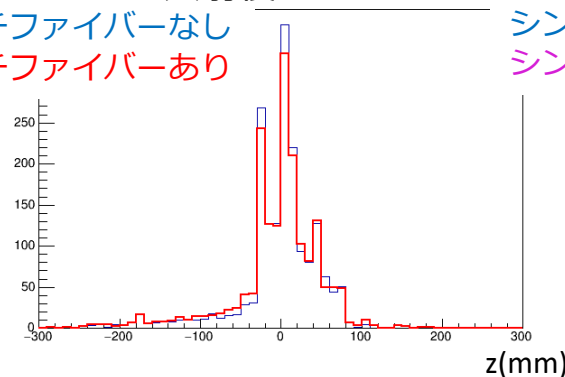
蓄積ビームの高さ分布 (シンチファイバーまばら案)

入射後すぐ



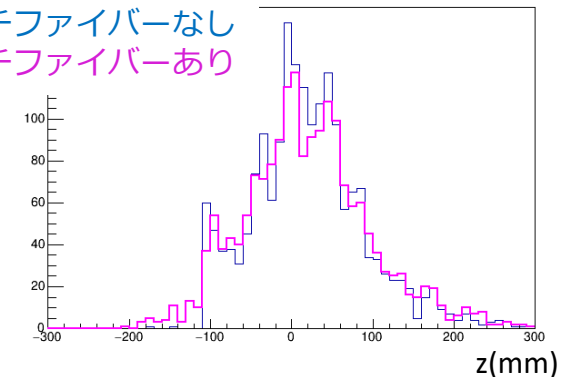
入射後150ns

シンチファイバーなし
シンチファイバーあり



入射後600ns

シンチファイバーなし
シンチファイバーあり



実現に向け研究開発を開始した。以下が検討すべき主な課題である。

1. 細線シンチファイバーの性能確認。(本講演)

2. 試作機を作り、原理実証をする。(次講演)

3. 信号のパイルアップ対策

- サイクロトロン周期ごとに信号がパイルアップする。
- 1GHz程度での波形の取得と波形解析で対処。

4. ファイバーサポート構造の設計

- 上から入射してくるビームを阻害しないような設計にする必要あり。
- 破壊測定になるので、物理データ取得中に避ける機構が必要。

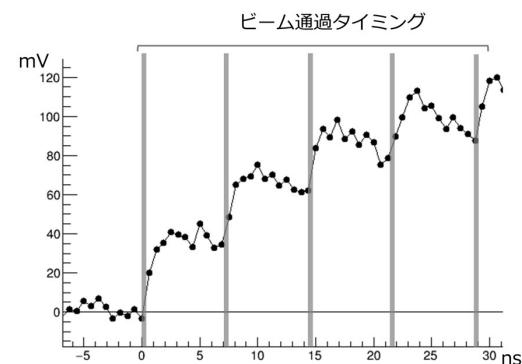
5. パルス磁場用の印加電圧由来のノイズ対策

- 光ファイバーで磁石外に取り出す設計。光伝送効率を確認する必要あり。

6. 測定データからベータトロン振動の振幅・位相を求める手法の開発

7. ファイバー間の光量校正手法の開発

予想される信号の例
(1バンチの場合)



3次元らせん入射実証実験

● 実証実験ビームライン@KEK

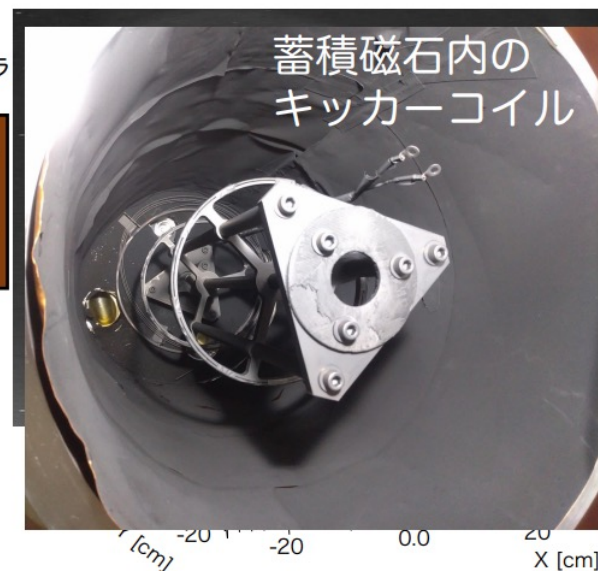
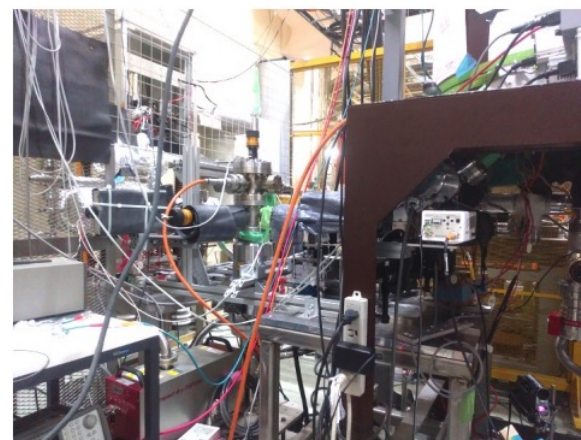
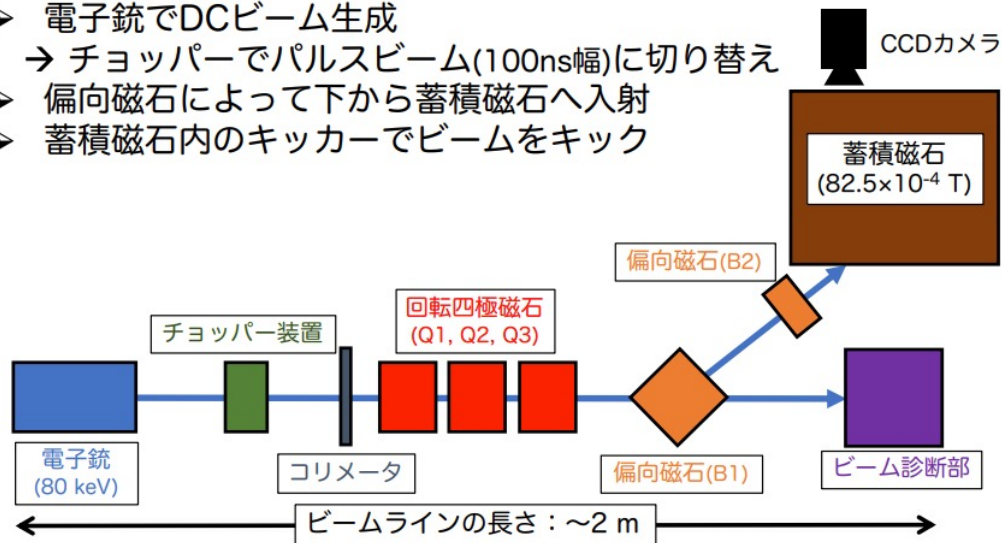
- 生成が容易な電子を使って実験
- ビーム運動量：297 keV/c

● 実証実験の目的

1. **原理実証**：本当にビームの蓄積ができるか？
2. **3次元らせん入射に特化したビーム調整手法の確立**：
ビーム蓄積効率最大化のためのパラメータ最適化手法

● ビームライン概要

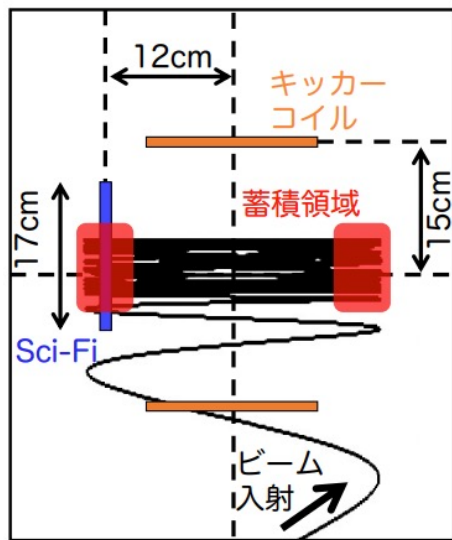
- 電子銃でDCビーム生成
→ チョッパーでパルスビーム(100ns幅)に切り替え
- 偏向磁石によって下から蓄積磁石へ入射
- 蓄積磁石内のキッカーでビームをキック



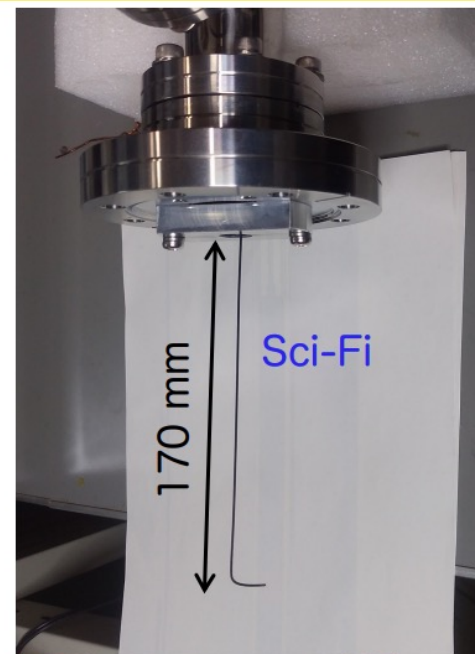
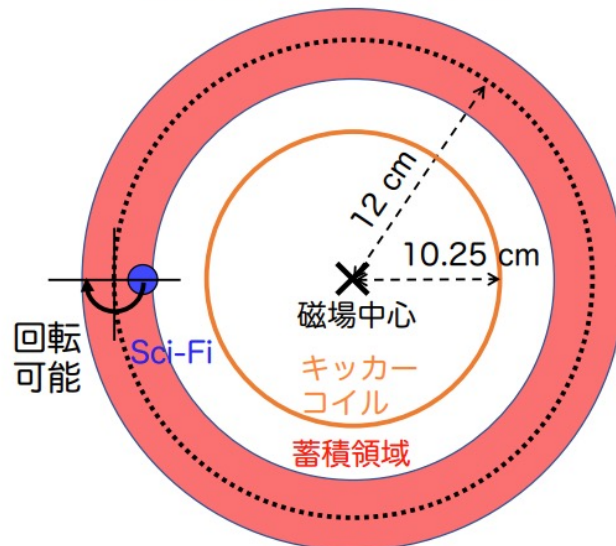
1本Sci-Fiでの蓄積ビーム測定

- 蓄積ビームをSci-Fi($\phi 1\text{mm}$)を用いて測定
 - 動径方向に測定できるようにSci-Fiは回転軸から3mmオフセット
- 100ns幅のパルスビームを入射&キックを与え測定

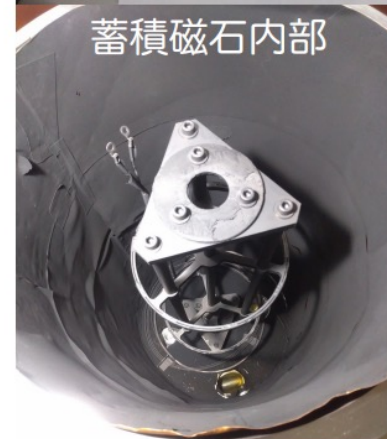
蓄積磁石を横から見た図



蓄積磁石を上から見た図

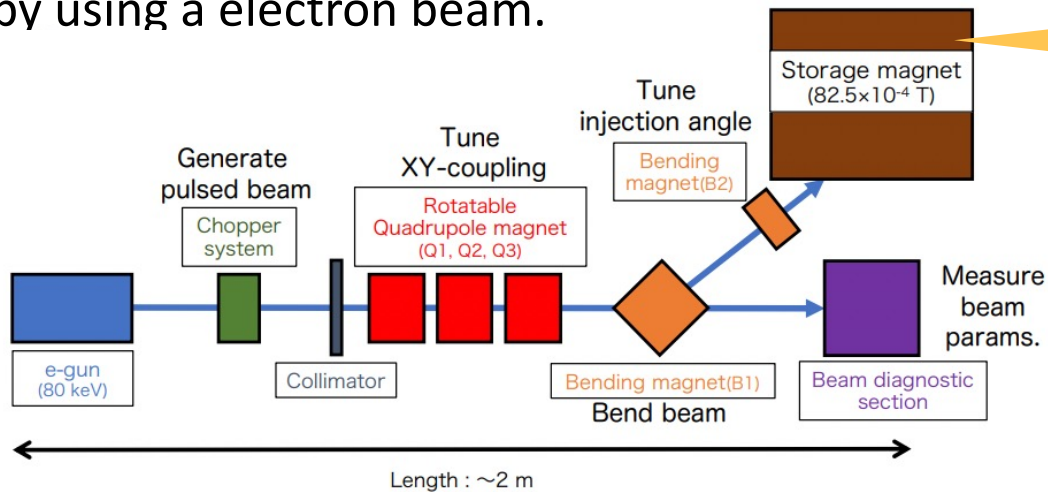


蓄積磁石内部

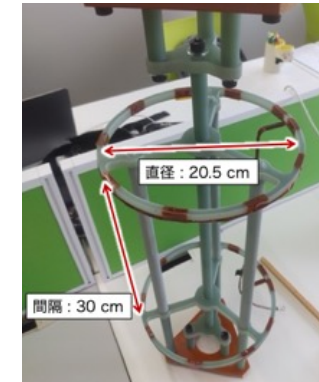


Muon beam injection

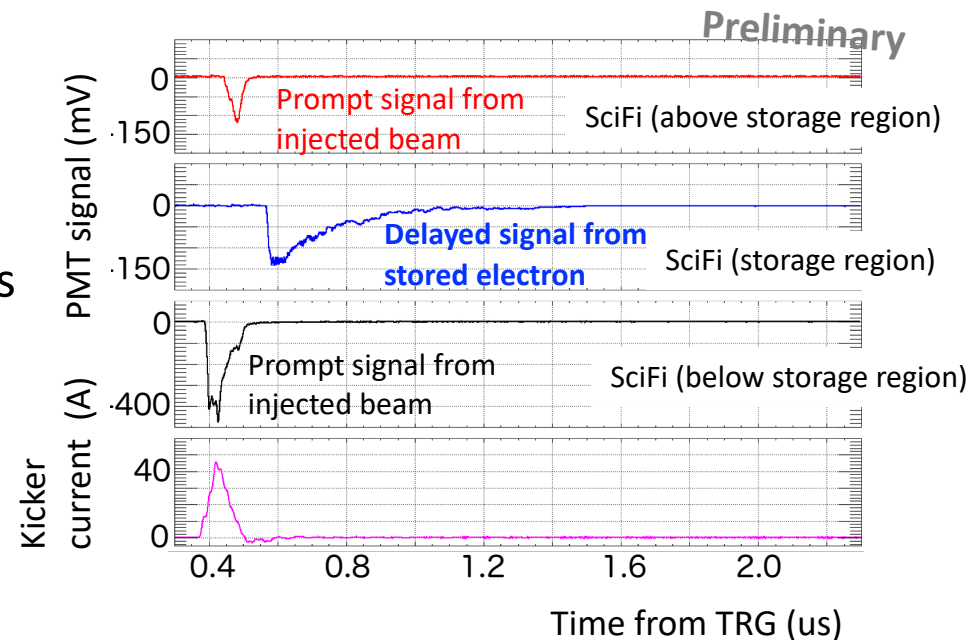
- Demonstration of 3D spiral injection scheme is ongoing in a test setup by using a electron beam.



Kicker coil inside solenoid magnet

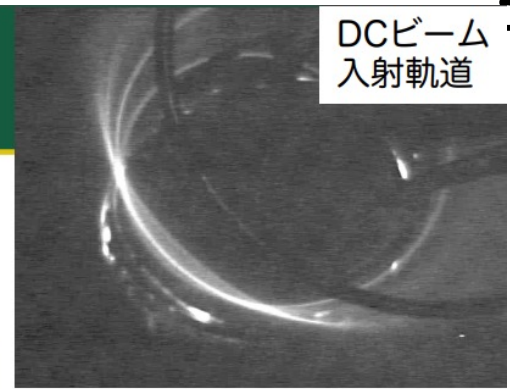


- Signal from stored electron beam is successfully observed.



蓄積ビームモニター

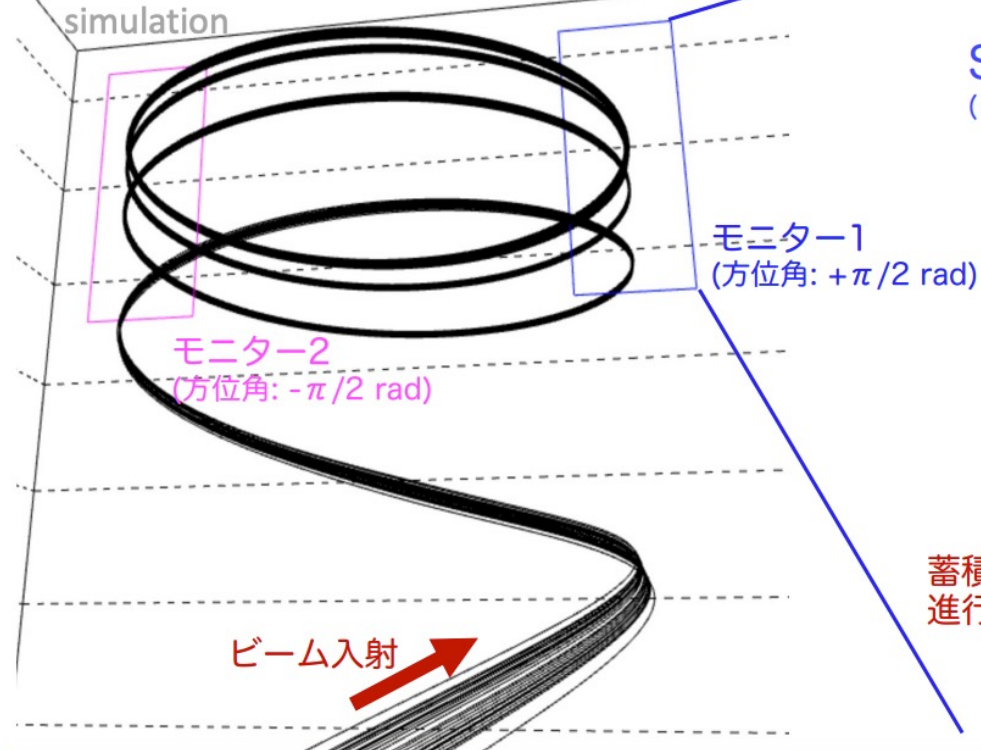
DCビーム
入射軌道



● 動径方向に並べたSci-Fiを用いてビーム検出

- ビームへの影響を抑えるために、Sci-Fi($\phi 200\mu\text{m}$)をまばらに配置
- 方位角方向で 180° 離れた2ヶ所に設置
- DCビームによるビーム調整で、枠の中に入射可能

蓄積磁石内でのビーム軌道



Sci-Fi
($\phi 200\mu\text{m}$)

蓄積ビーム
進行方向

Sci-Fi光信号は
光ファイバーで
蓄積磁石外へ転送

150mm

鉛直方向の振動を
十分カバーできる
長さ

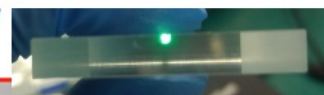
55mm

他の機器との
干渉により制限

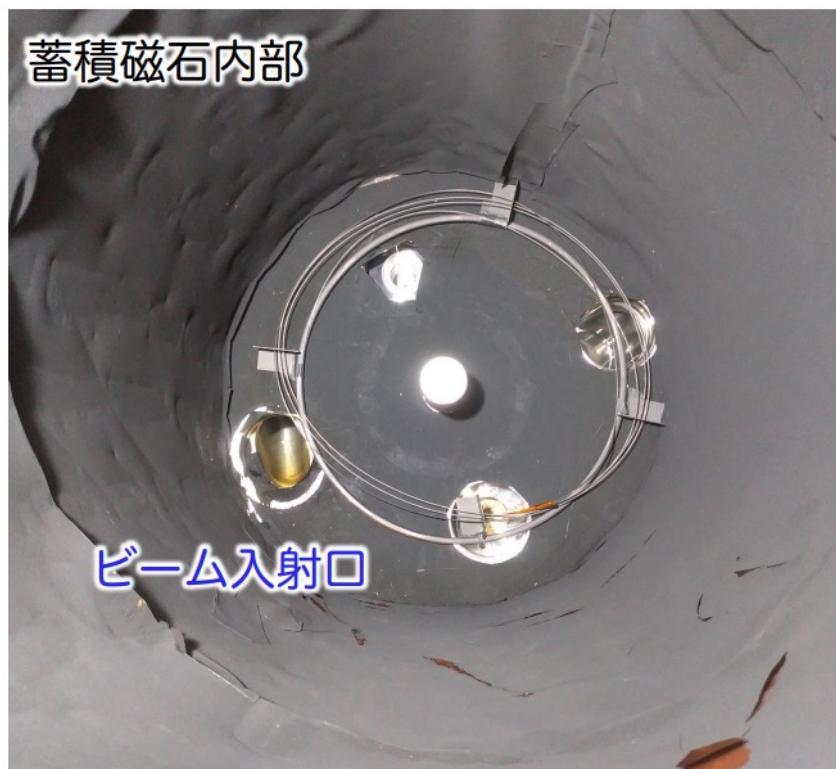
蓄積効率測定に向けて

- 最終的には、蓄積効率を測定しシミュレーションと比較
- 蓄積磁石内部の上下面に設置した検出器でロスしたビーム量を評価
 - 蓄積効率 = $1 - (\text{ロスしたビーム量}) / (\text{入射ビーム量})$
- 現在は、Sci-Fiをバンドルしたものを置いてるだけ
- プラシンを並べたものを用意して測定
 - 設計確定のために線源を使用した試験を進めている

裏面の溝にWLSを埋め込み
光読み出し

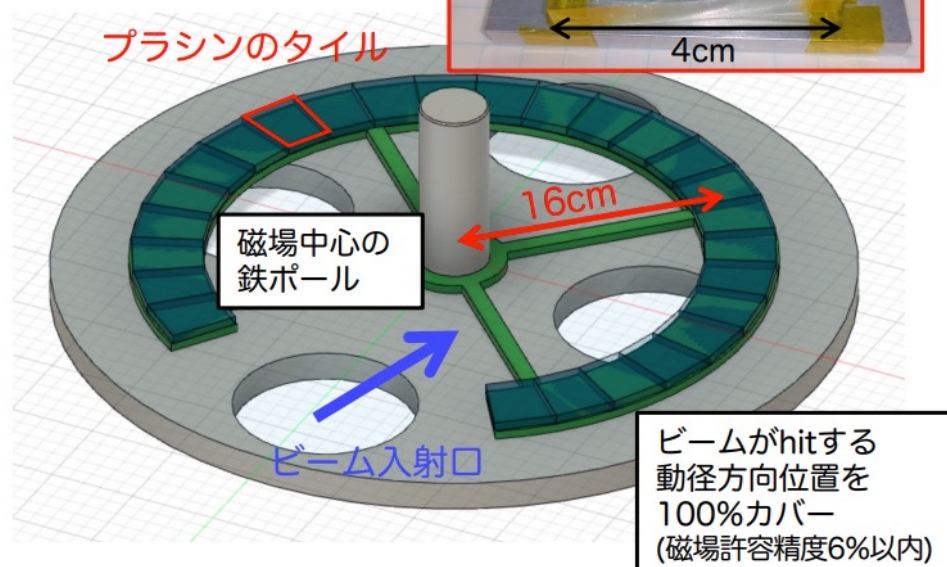


蓄積磁石内部



ビーム入射口

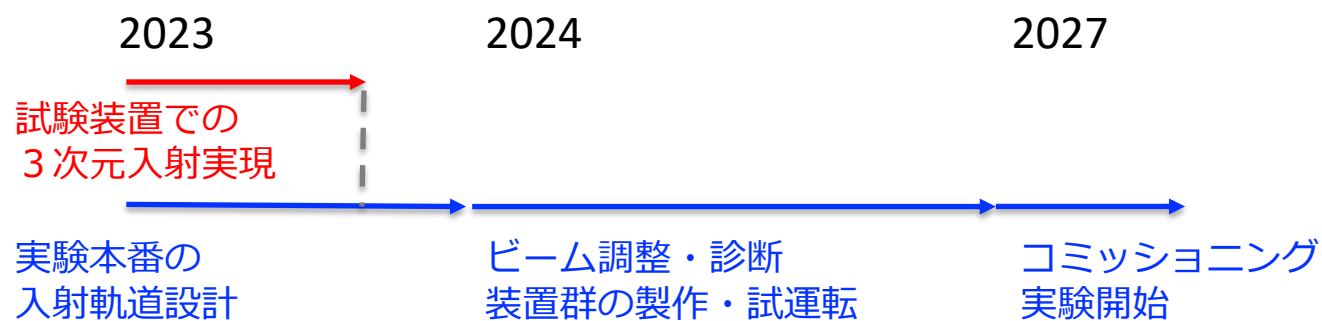
プラシンのタイル



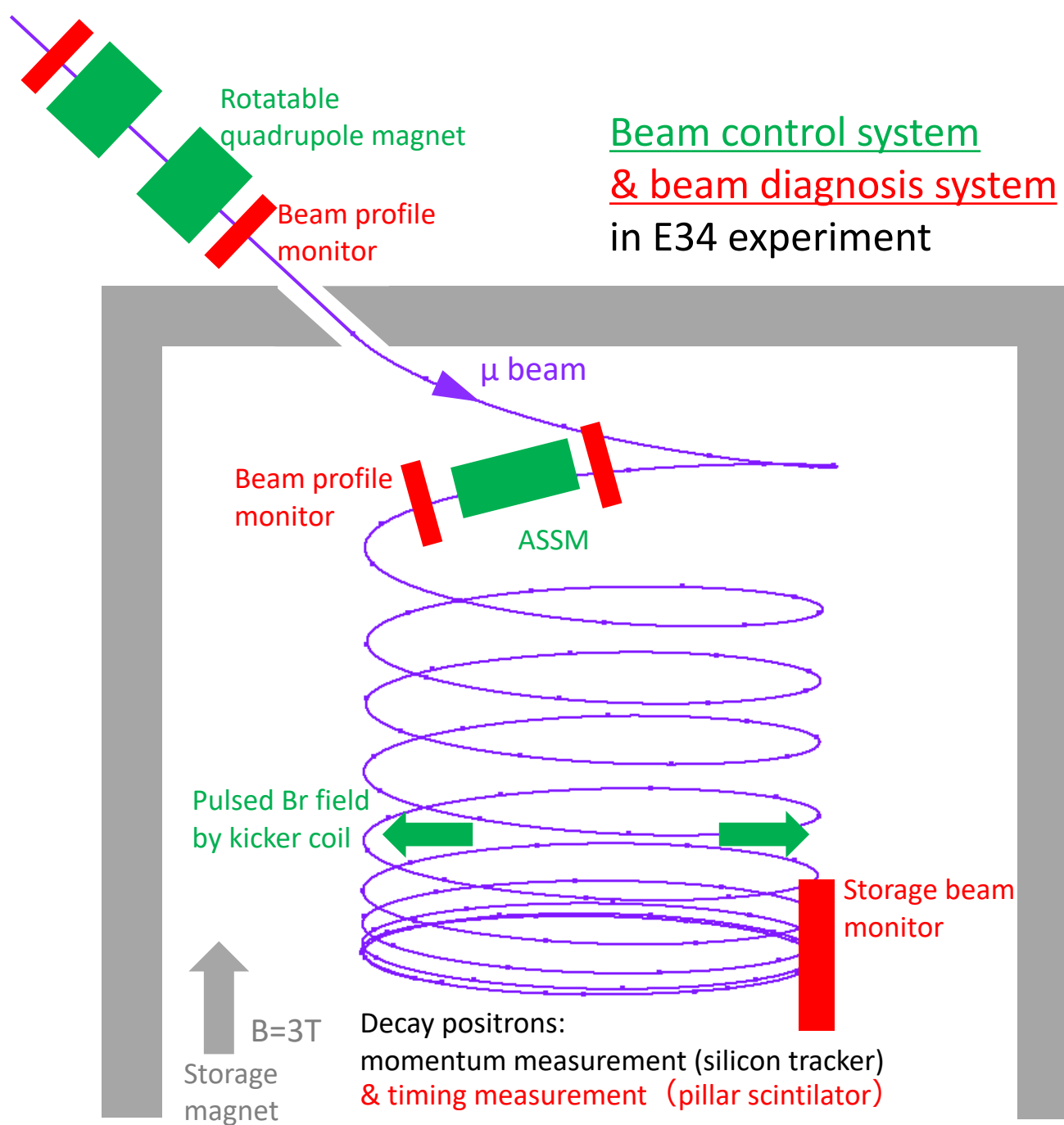
磁場中心の鉄ポール

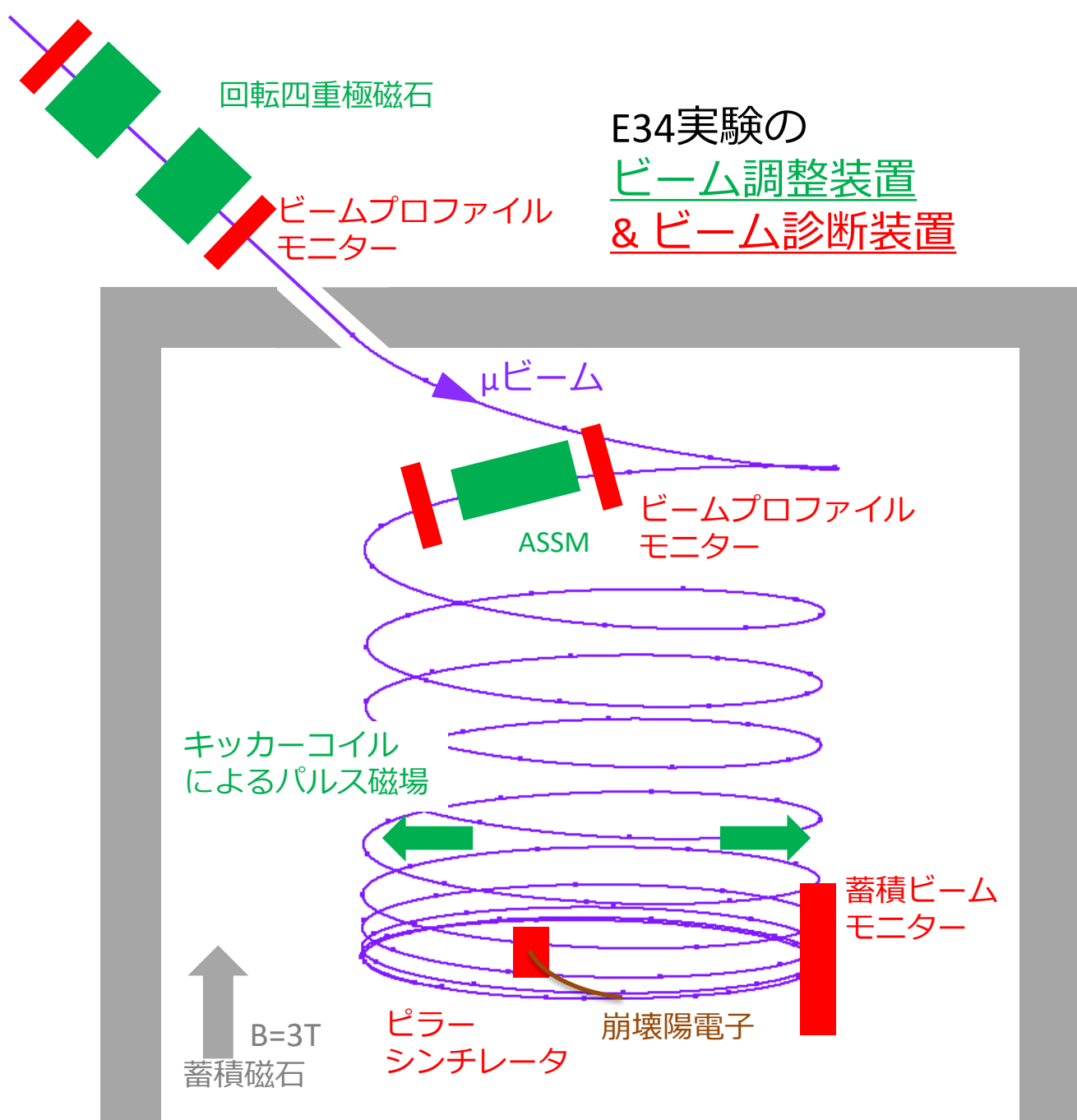
ビーム入射口

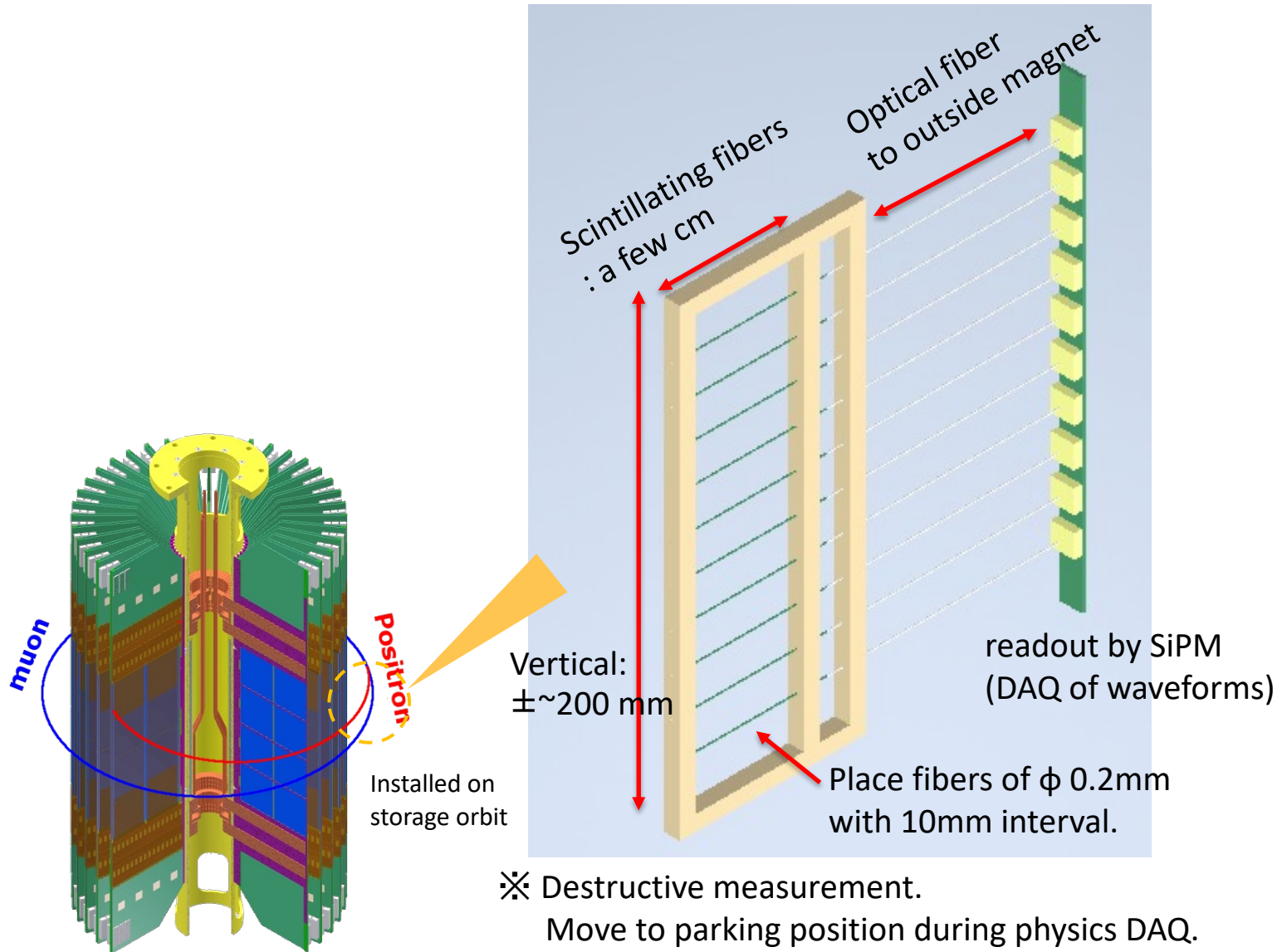
ビームがhitする
動径方向位置を
100%カバー
(磁場許容精度6%以内)

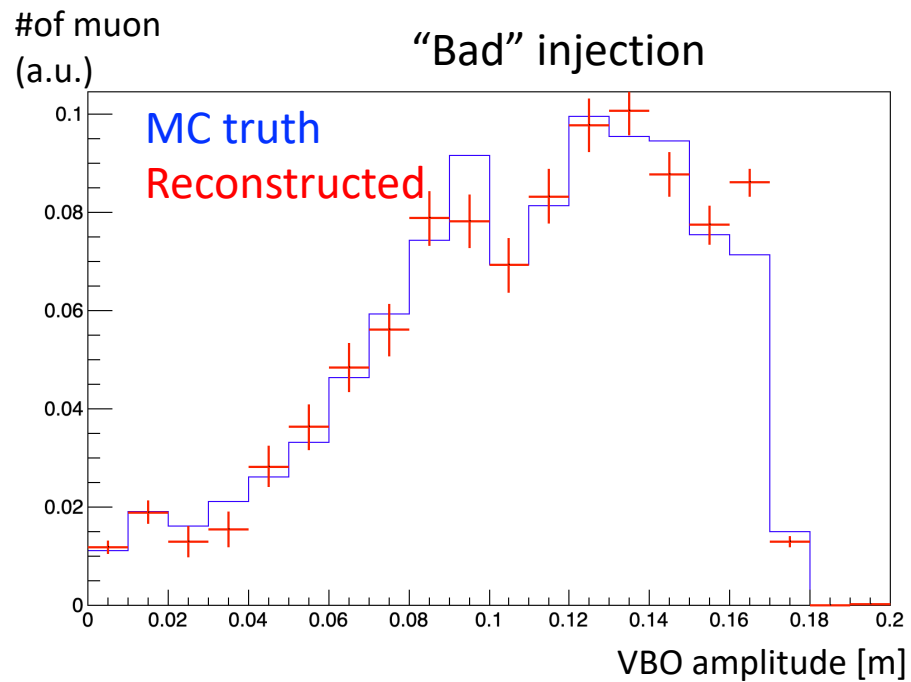
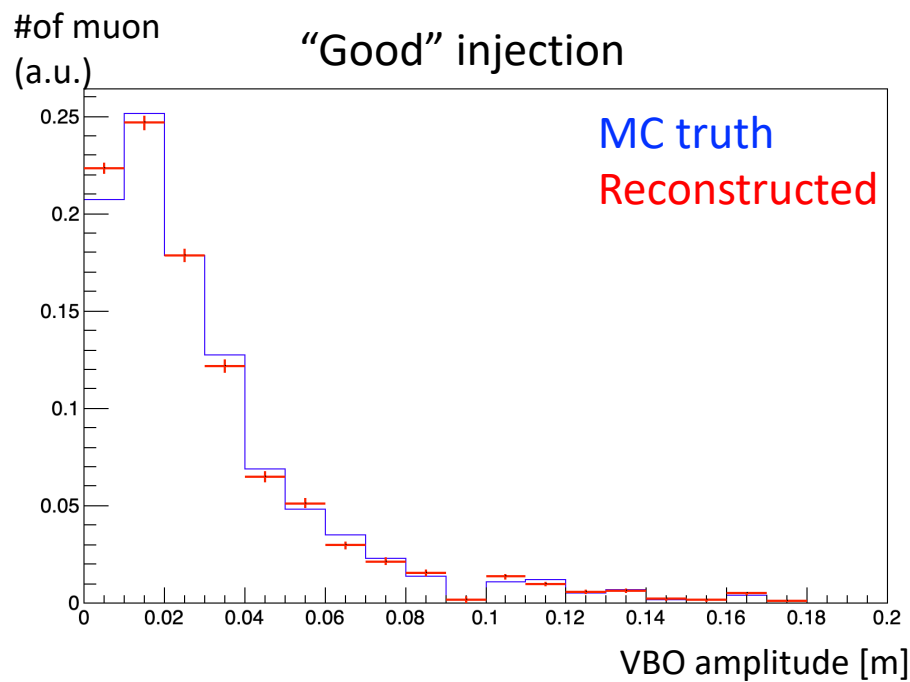


Beam control system
& beam diagnosis system
 in E34 experiment

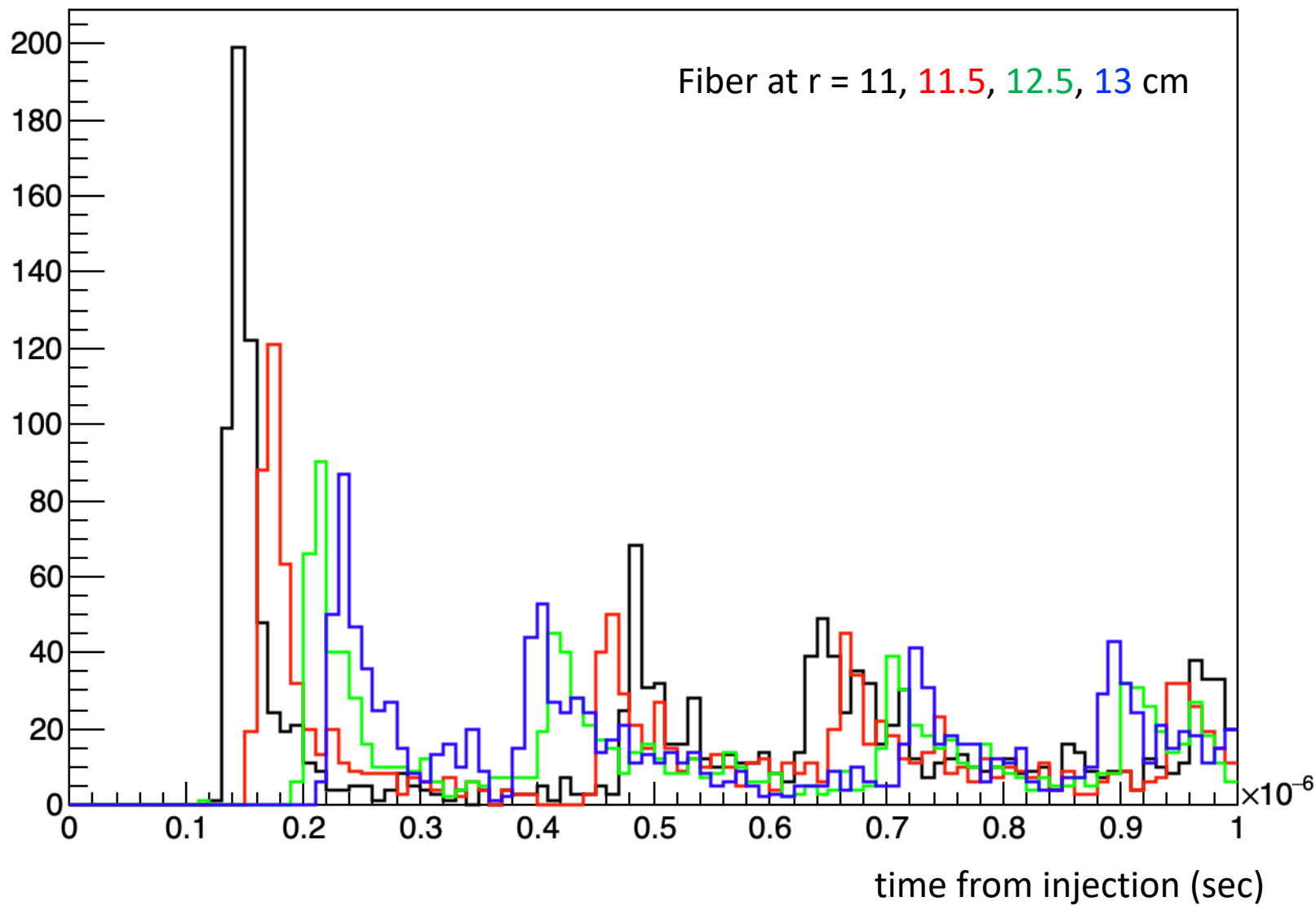






VBO振幅分布

Hit on each fiber (a.u.)



アクセプタンス

