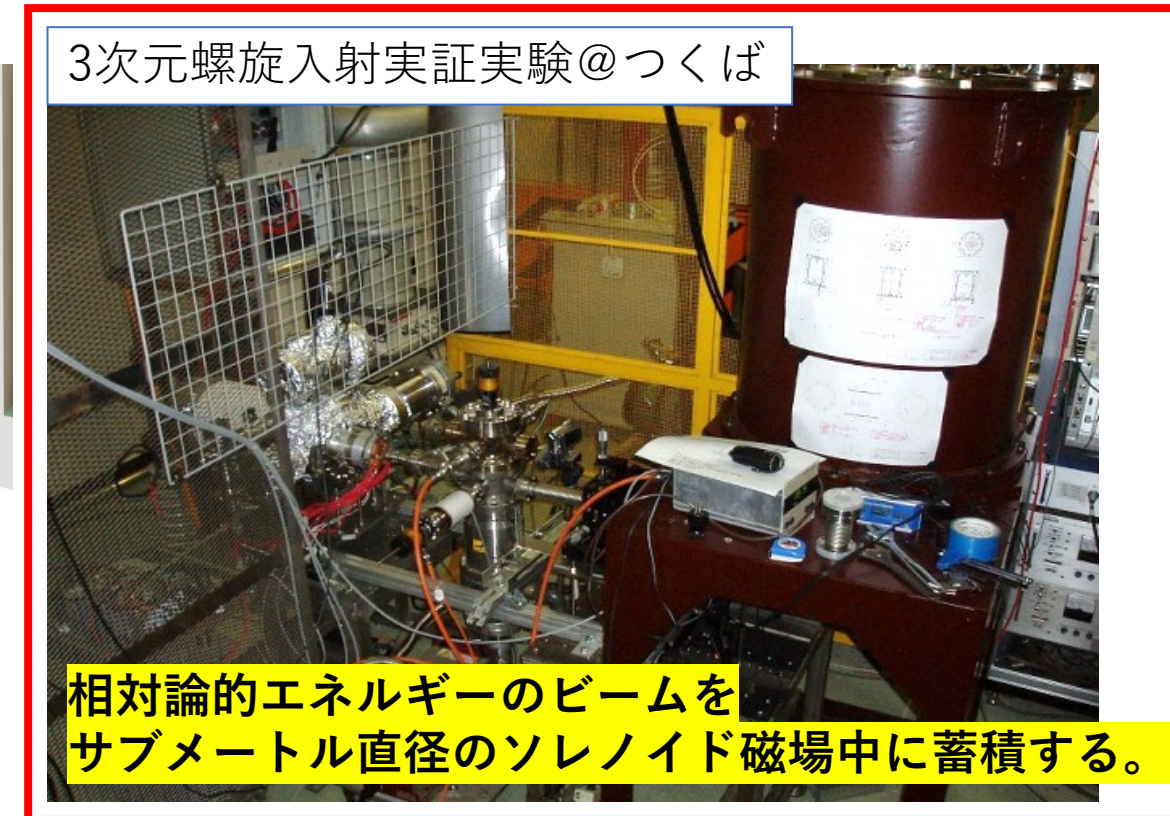


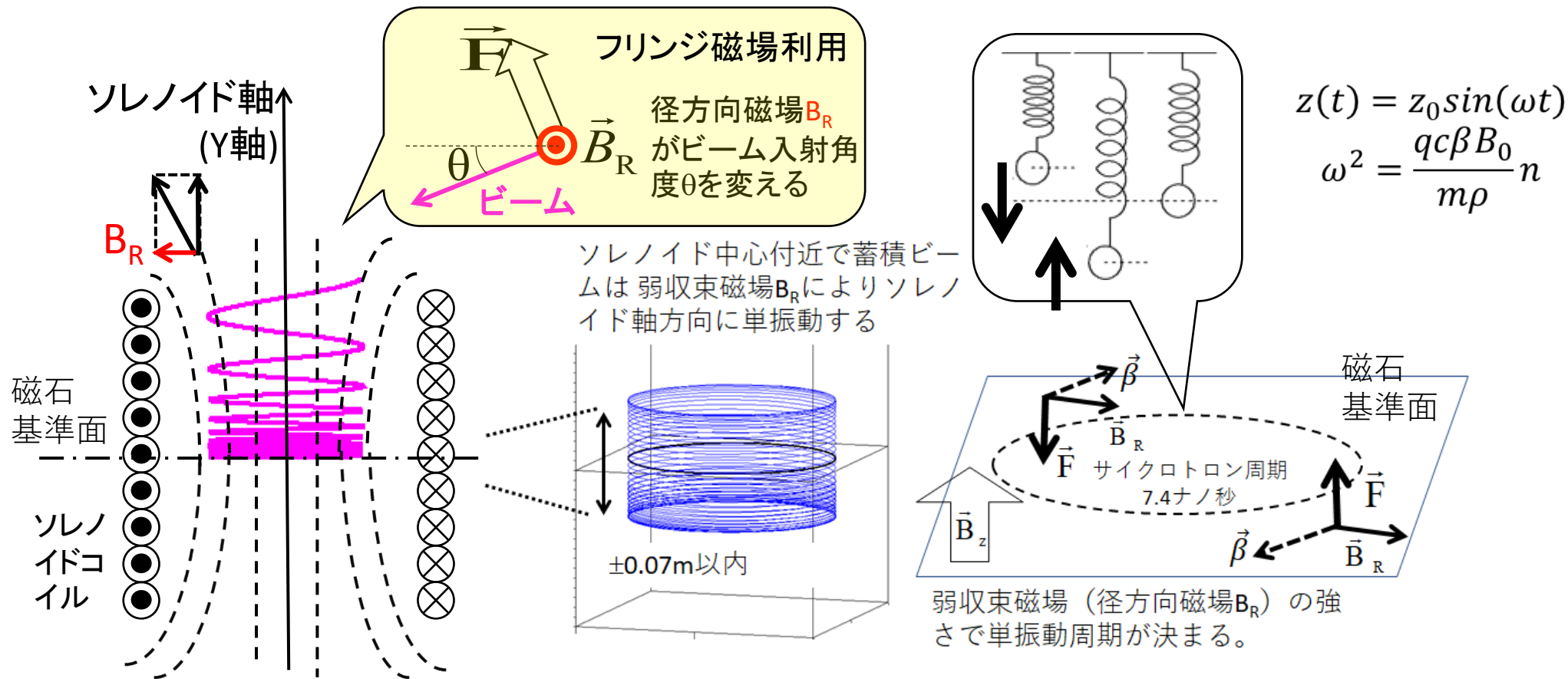
J-PARC muon g-2/EDM実験に向けた3次元らせん入射実証実験

○飯沼 裕美（茨大理工），松下 凌大（東大理），大澤 哲，中山 久義(KEK)、小川 真治（九大）、小田 航大（茨大理工），齊藤 直人，古川 和朗，三部 勉，Muhammad Abdul Rehman(総研大卒業生)

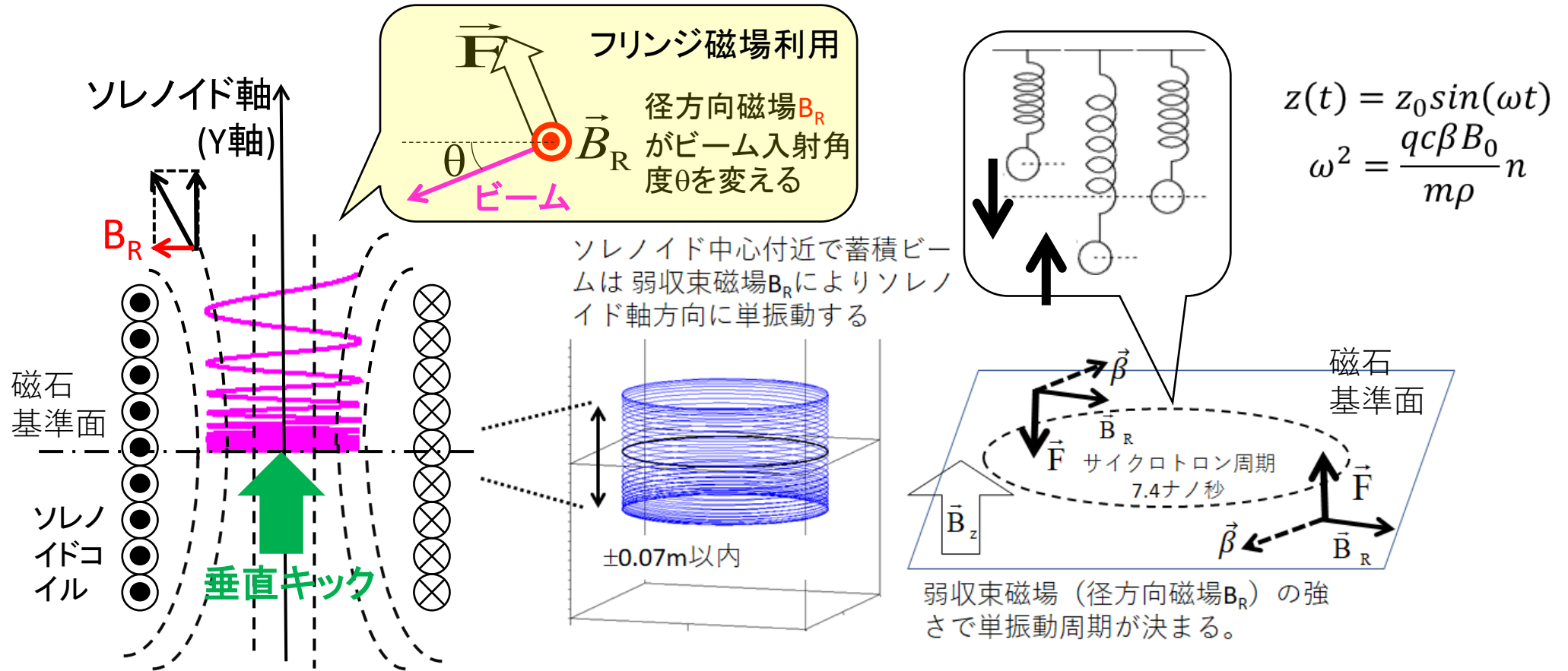
1. イントロ
2. 3次元入射とは
3. 実証実験の目的、今までの成果
4. パルスビーム・キッカー装置の準備
5. 蓄積運転開始
6. 今後の予定



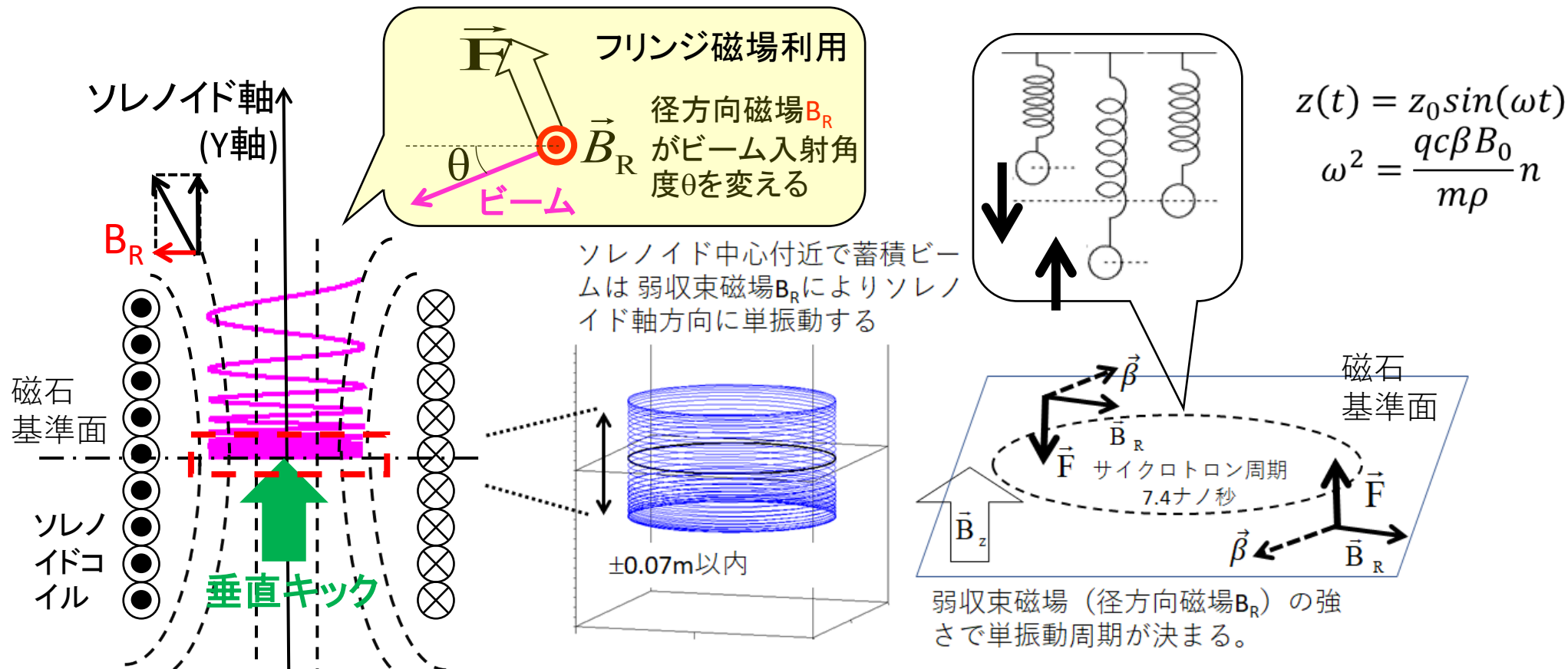
ソレノイド磁石1個で入射領域と蓄積領域を実現



ソレノイド磁石1個で入射領域と蓄積領域を実現



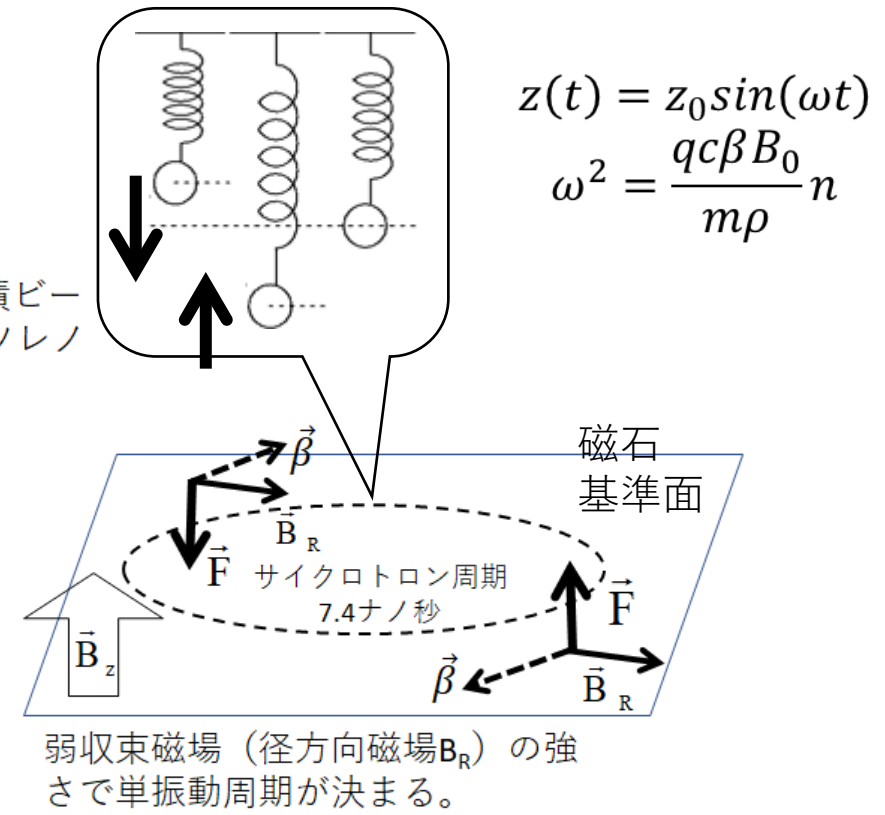
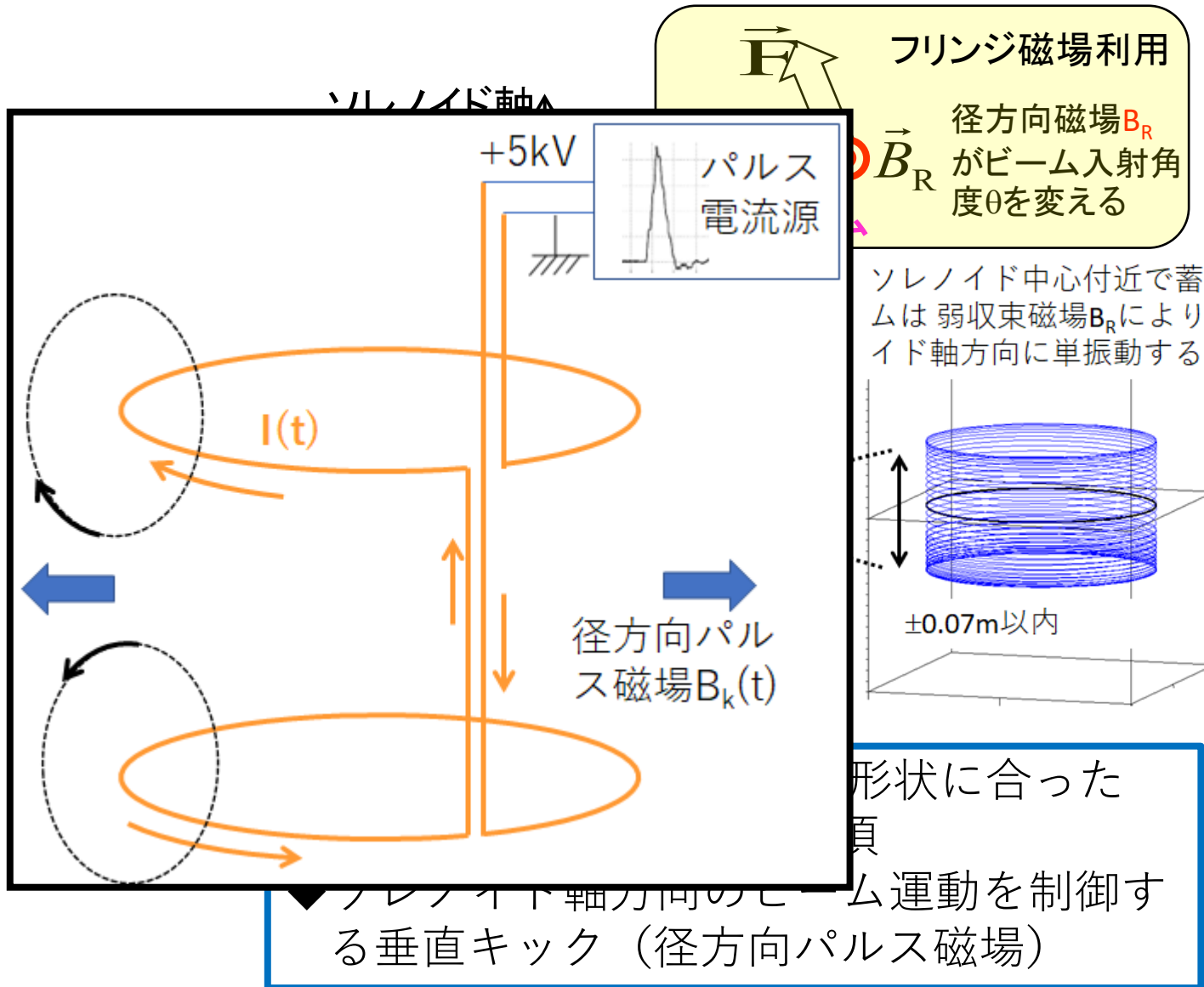
ソレノイド磁石1個で入射領域と蓄積領域を実現



- ◆ 径方向フリンジ磁場 B_R の形状に合ったベーム成形 = **X-Y結合** が必須
- ◆ ソレノイド軸方向のベ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ベーム軌道を制御する。磁石基準面と、ベームの軌道平面を一致させる。

ソレノイド磁石1個で入射領域と蓄積領域を実現



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。

ソレノイド磁石1個で入射領域と蓄積領域を実現

ソレノイド軸

+5kV

パルス電流源

$I(t)$

径方向パルス磁場 $B_k(t)$

\vec{E} フリンジ磁場利用

径方向磁場 B_R がビーム入射角度 θ を変える

ソレノイド中心付近で蓄積ビームは弱収束磁場 B_R によりソレノイド軸方向に単振動する

$\pm 0.07\text{m}$ 以内

$$z(t) = z_0 \sin(\omega t)$$

$$\omega^2 = \frac{qc\beta B_0}{m\rho} n$$

$B_w = -n \frac{B_0}{\rho} z$

Z=0

径方向磁場 B_w

サイクロトロン周期 7.4ナノ秒

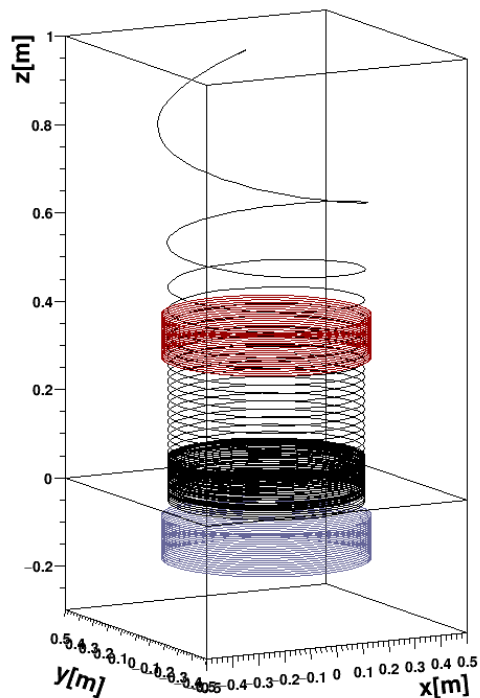
$\vec{\beta}$, \vec{B}_R , \vec{F} , \vec{B}_z

弱収束磁場 (径方向磁場 B_R) のさで単振動周期が決まる。

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。

3次元らせん軌道ビーム入射手法の開発

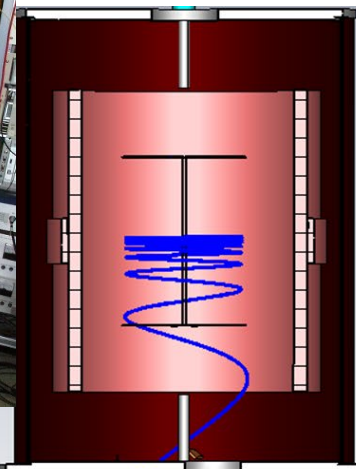
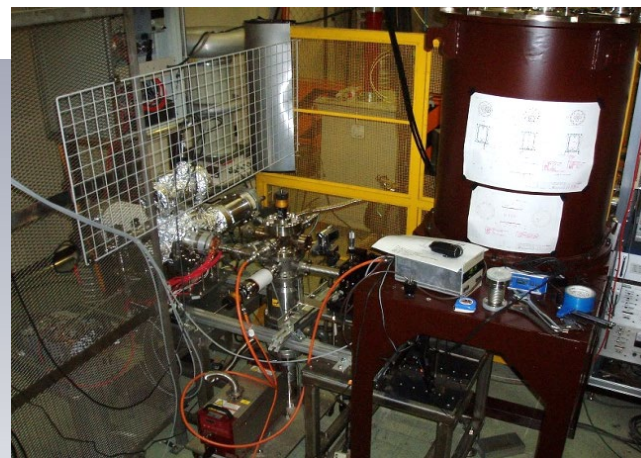


軌道半径33.3cmの世界最小蓄積磁石は、医療用MRIの磁場調整技術を応用し中心磁場3T、調整精度(+/-0.1ppm p-p)を目指す

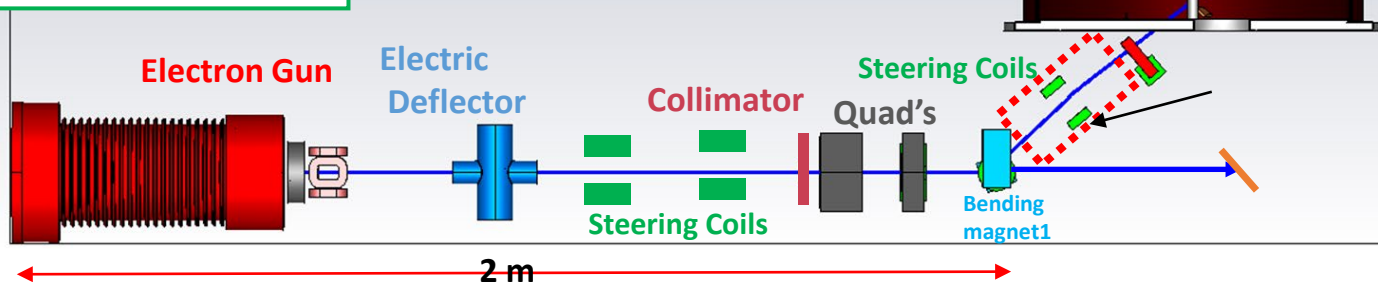
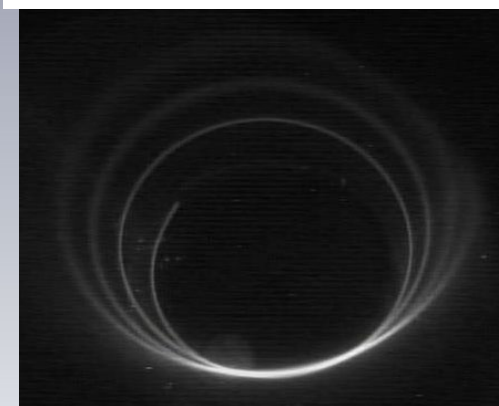
Z軸回転対称なソレノイド磁場中への3次元らせんビーム入射は、輸送ラインでの強いX-Y結合ビームの調整が肝。オリジナルアイデアで、加速器技術として前例がない挑戦。

2022年度より、垂直キッカーを使って、ビームを蓄積できるのか、原理実証の最終段階

原理実証実験：
電子ビームを用いた1/3スケールテストスタンド
@KEKつくばで3次元螺旋軌道入射の実証実験進行中



蓄積層上部から広角カメラで撮影

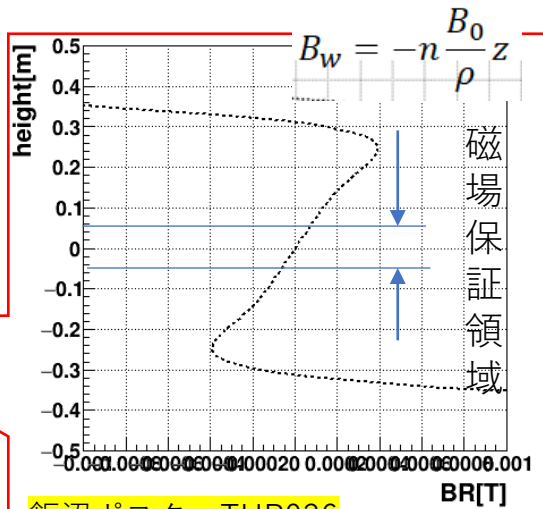


- 若手B:2011~2013
- 基盤B:2014~2018
- 基盤研究A 2019~2022
課題番号19H00673

共に弱収束磁場付ソレノイド磁石だが、性能は異なる

中心磁場 3T
均一度 < +/- 0.1ppm

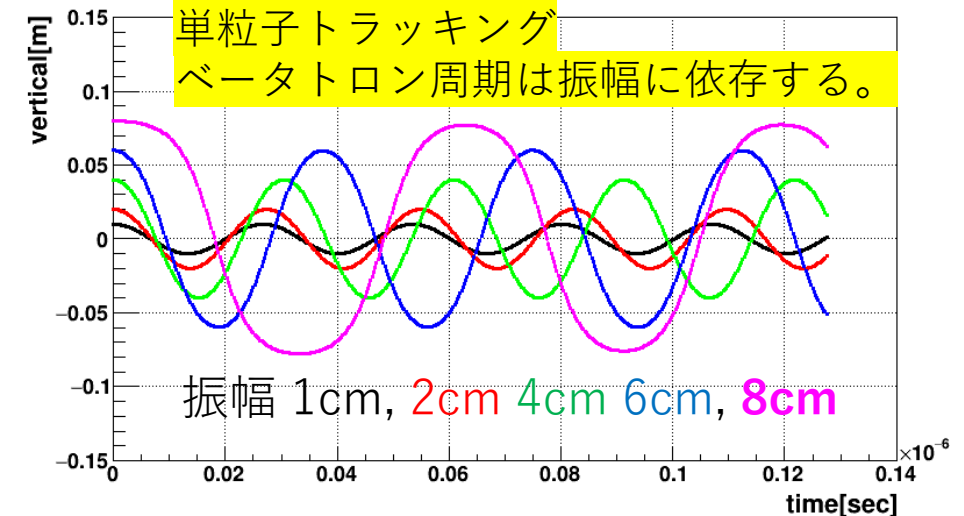
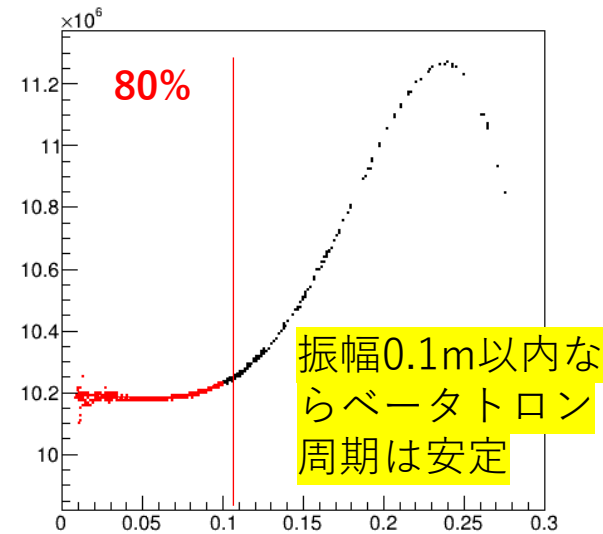
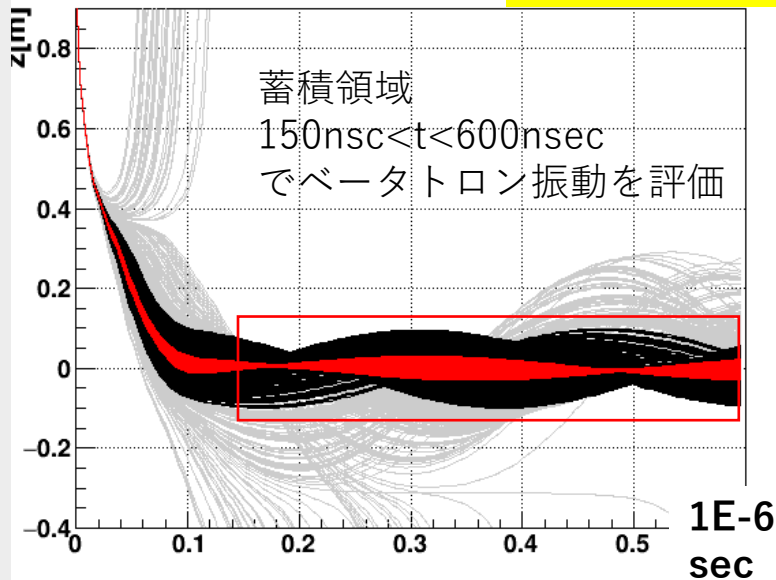
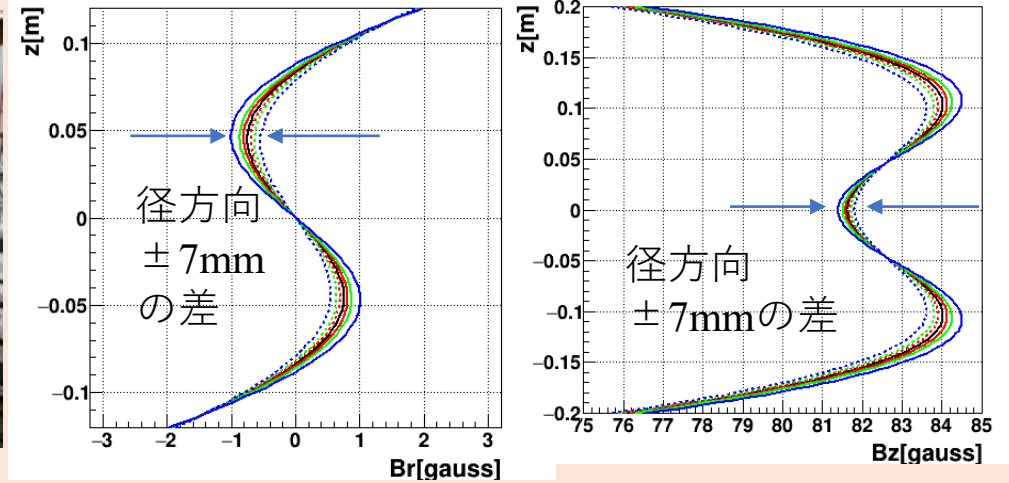
弱収束磁場も精密制御



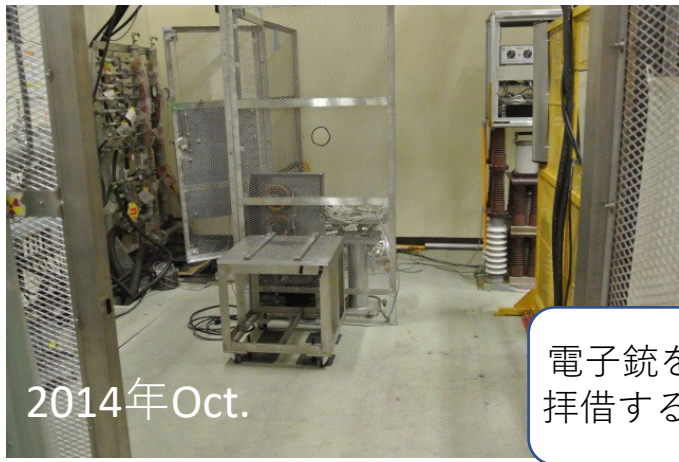
飯沼ポスターTUP036

中心磁場 81gauss, **可変の弱収束磁場**, 均一度は悪い。

径方向1mmズレると、±1%の磁場変動



新しいビーム入射手法の 実証を行うビームライン建設@KEKつくば入射器棟



2014年Oct.

電子銃を
拝借する。



2014Oct



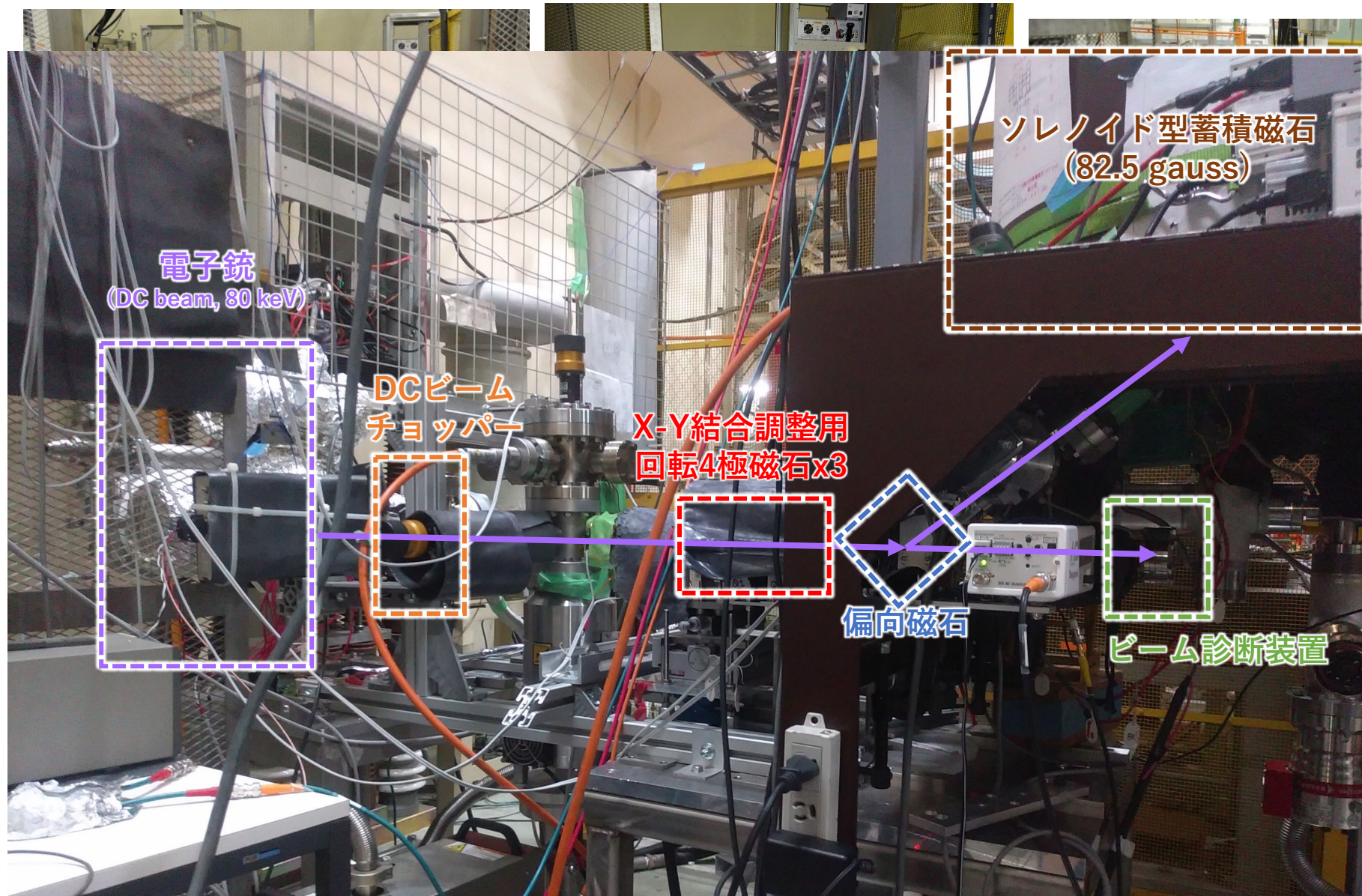
2015Apr.

新規製作のソレノイド
磁石をインストール

科研費+KEKのサポート
基盤研究B:2014~2018,基盤研究 A 2019~2022

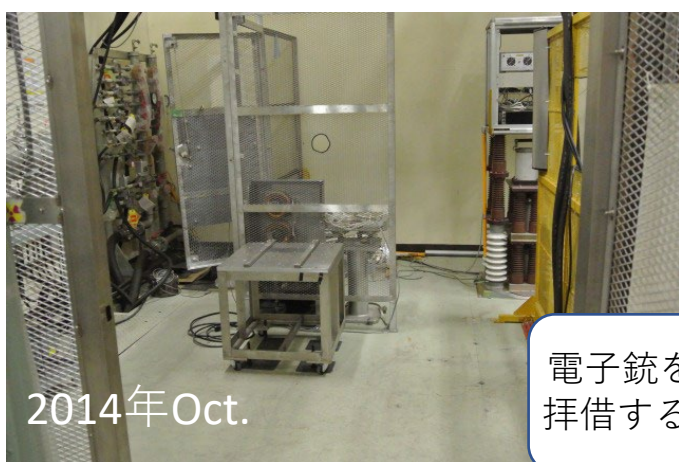
新しいビーム入射手法の 実証を行うビームライン建設@KEKつくば入射器棟

新規製作のソレノイド
磁石をインストール



KEKのサポート
2014~2018, 基盤研究 A 2019~2022

新しいビーム入射手法の 実証を行うビームライン建設@KEKつくば入射器棟

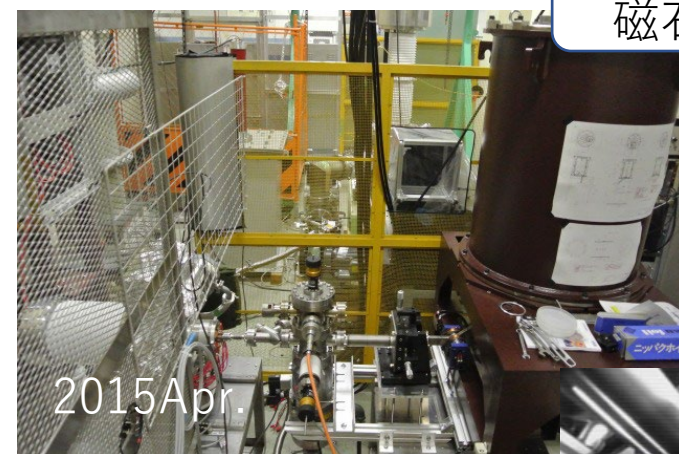


2014年Oct.

電子銃を
拝借する。



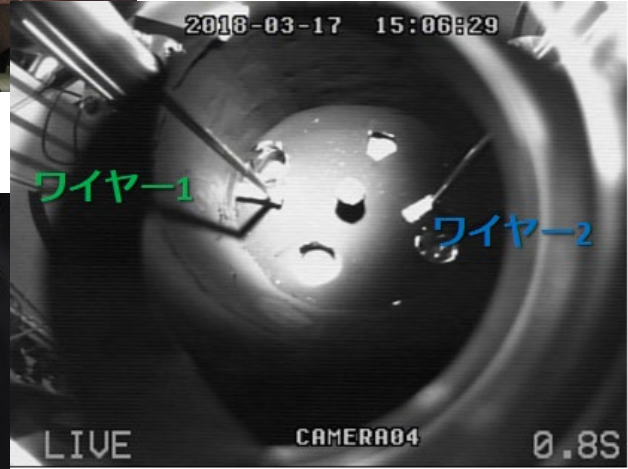
2014Oct



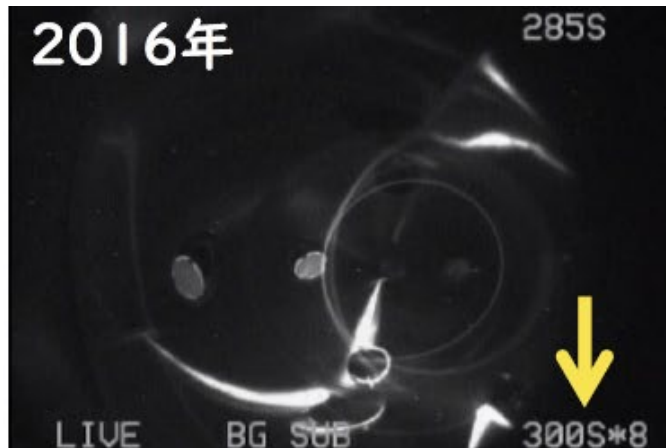
2015Apr.

新規製作のソレノイド
磁石をインストール

蓄積磁石内側の
チェンバ内の様子

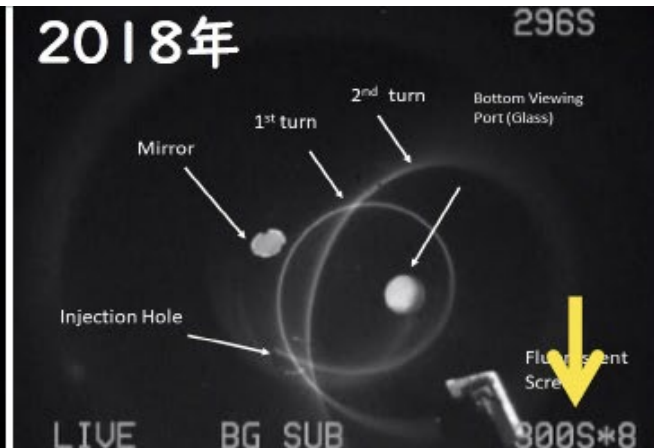


毎月3~4回KEKつくばに通い、 KEKスタッフと連携して研究に取り組む



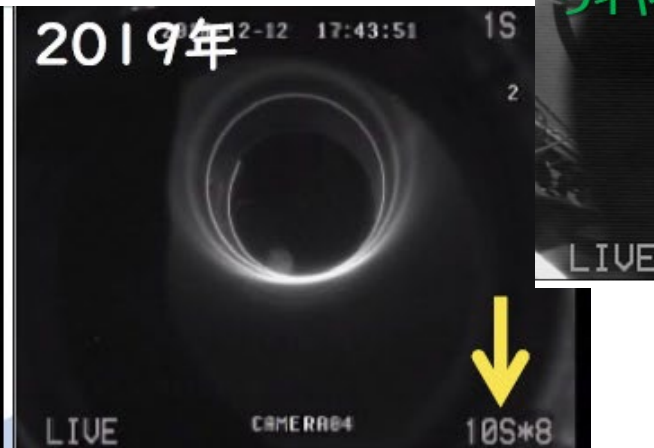
2016年

285S
LIVE BG SUB 300S*8



2018年

296S
LIVE BG SUB 300S*8



2019年

1S
LIVE CAMERA04 10S*8

- テスト実験の最終目的：ビーム蓄積試験進行中 → 本講演で進捗報告
- 3次元らせん軌道入射の実証を完了し、本番実験へ。

科研費+KEKのサポート
基盤研究B:2014~2018,基盤研究A 2019~2022

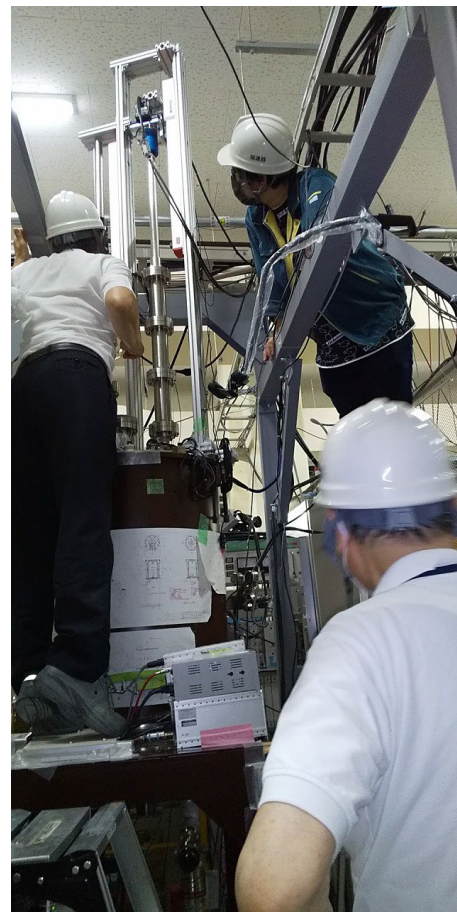
3次元螺旋入射実証実験：KEKつくば構内にテストビームライン



学位取得者

2020年度 総研大 博士
 2021年度 茨大 修士1名
 2021年度 東大学際理学修士1名

現在
 博士1名、修士3名、ポスドク1名
 シニアスタッフ 3名+飯沼



- 2011年 キッカー装置試作
- 2014年 電子銃を用いた実証ビームライン建設開始
- 2016年 ビーム運転開始(DCビーム)
- 2019年 X-Y結合制御 (平山)
ワイヤースキャナー開発(Rehman)



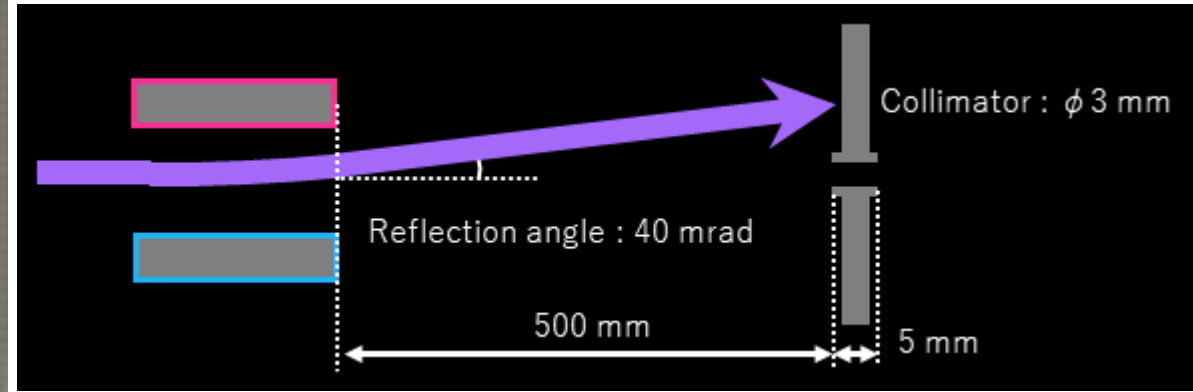
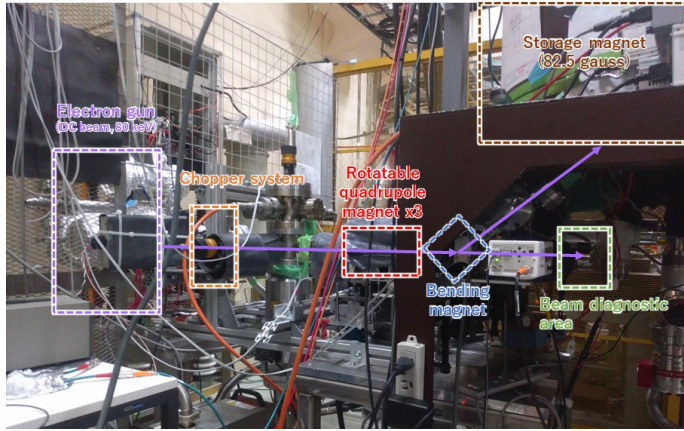
マイルストーン1:
 3次元軌道の可視化・X-Y結合制御

DCビームの画像取得時間を300秒
 →10秒に改善!

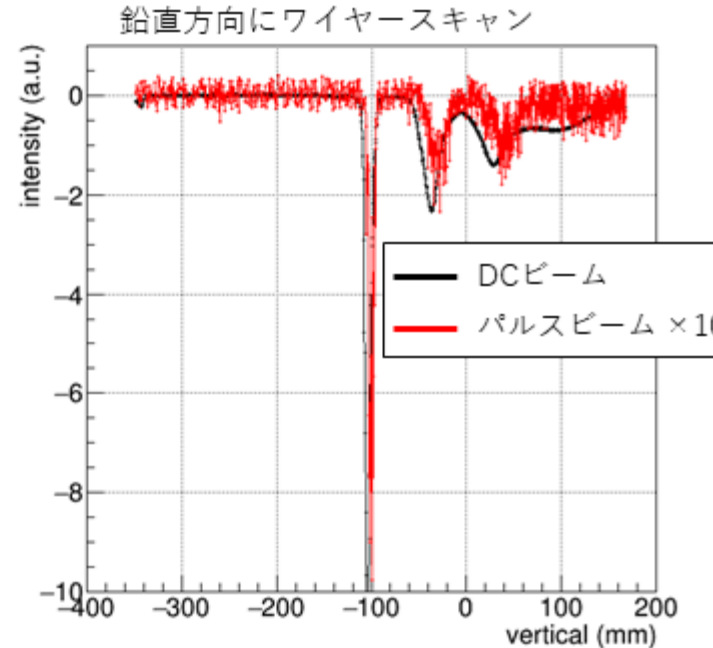
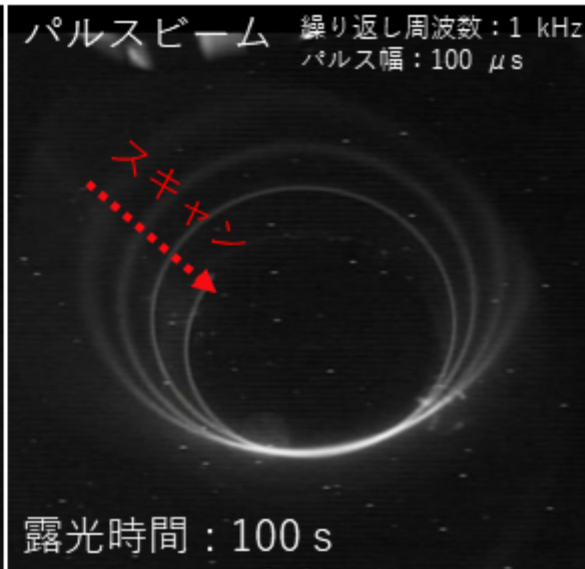
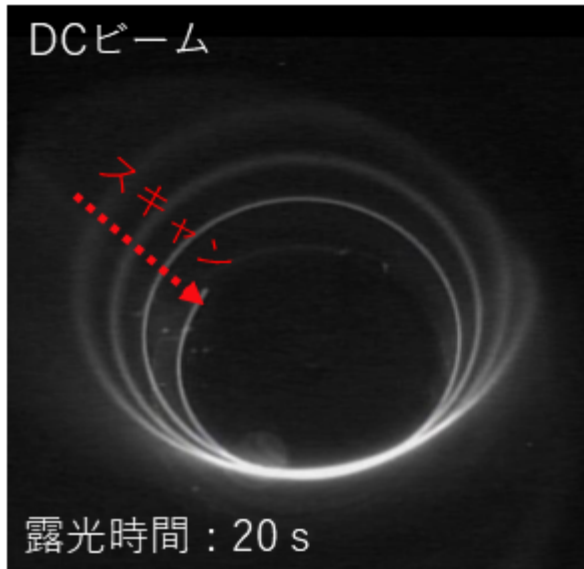
- 2020年 キッカーコイル・電源準備
DCビームをパルス化(松下)
- 2021年 パルスビーム検出器開発 (松下)
- 2022年 **キッカー装置設置、蓄積運転開始**

蓄積に向けた準備-1: パルスビーム切り出し

東大・松下



蓄積槽上部より入射軌道撮影

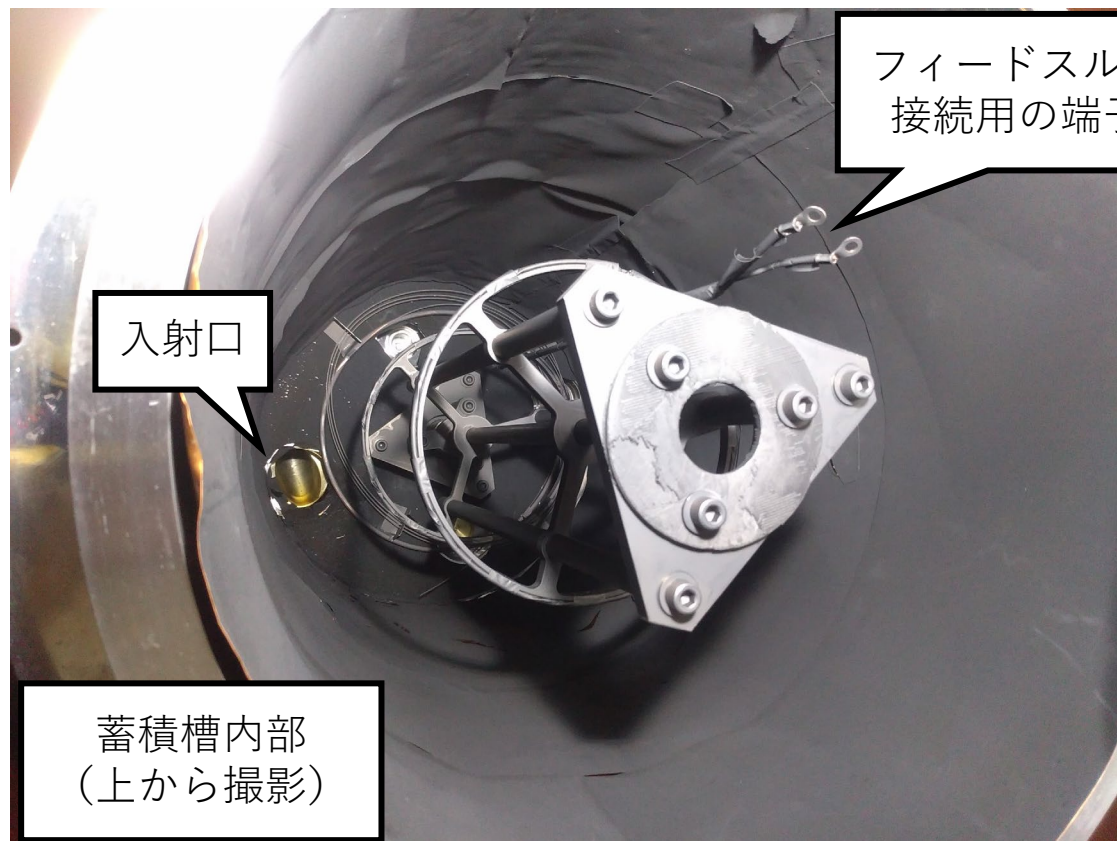
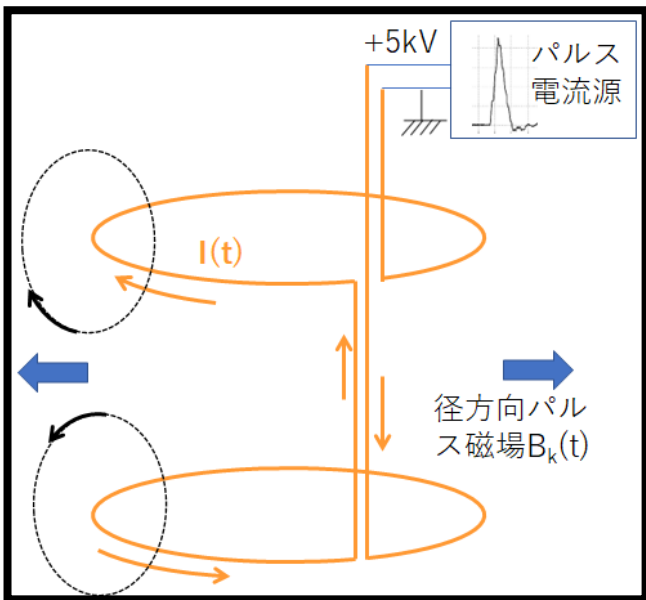


チョッパー装置により、ビーム軌道が変わるかどうか、窒素ガス電離発行を利用した3次元軌道の画像確認に加え、ワイヤースキャナーで確認

準備-2:キッカーコイル設置

東大・松下、
茨大・小田

- 2022年3月末、蓄積槽内部に、キッカーコイルを設置
- キッカーコイルには、ビームがぶつかりチャージアップ対策のため導電性塗料を塗布

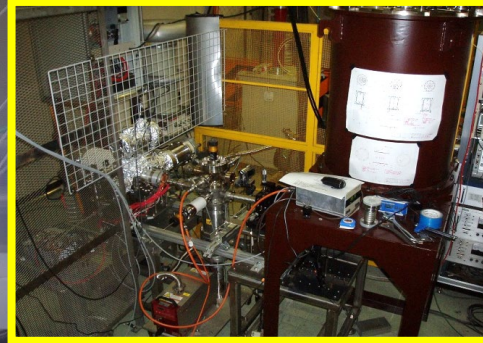


準備3: キッカーコイルを電流源に接続

東大・松下、
茨大・小田

15

キッカーパルス電源



- 蓄積チェンバーの蓋を閉じた後、上から撮影した俯瞰図
- キッカーに流す電流波形は、ロゴスキーコイルで測定
 - 印加したHV : 5kV
 - 電圧 --> 電流への変換 : $50\text{mV} = 1\text{A}$

マッチング素子

ロゴスキー
コイル

拡大

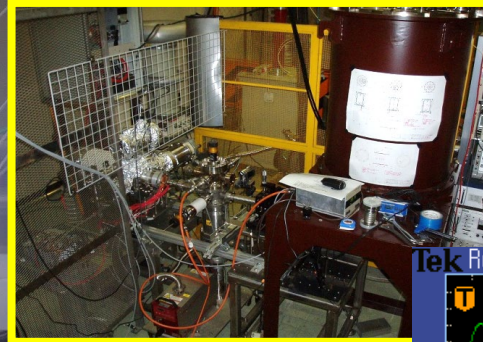
フィードスルー部分拡大

準備3: キッカーコイルを電流源に接続

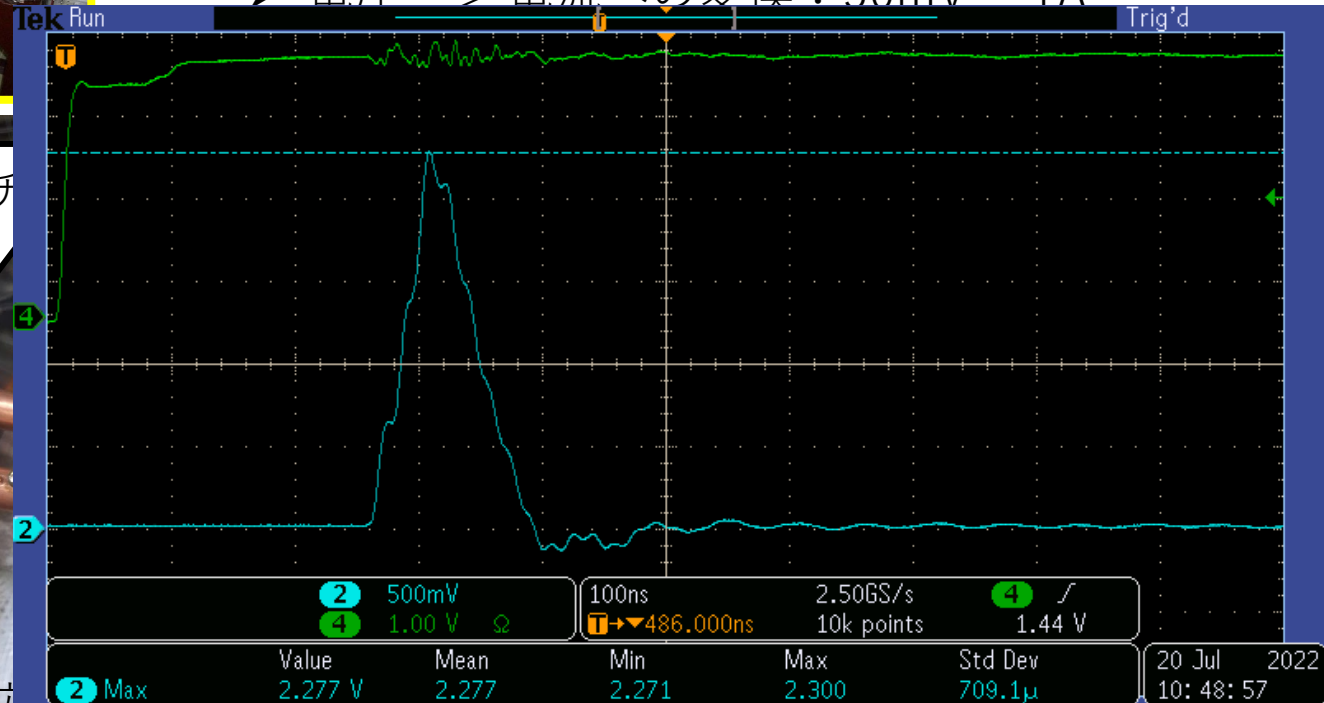
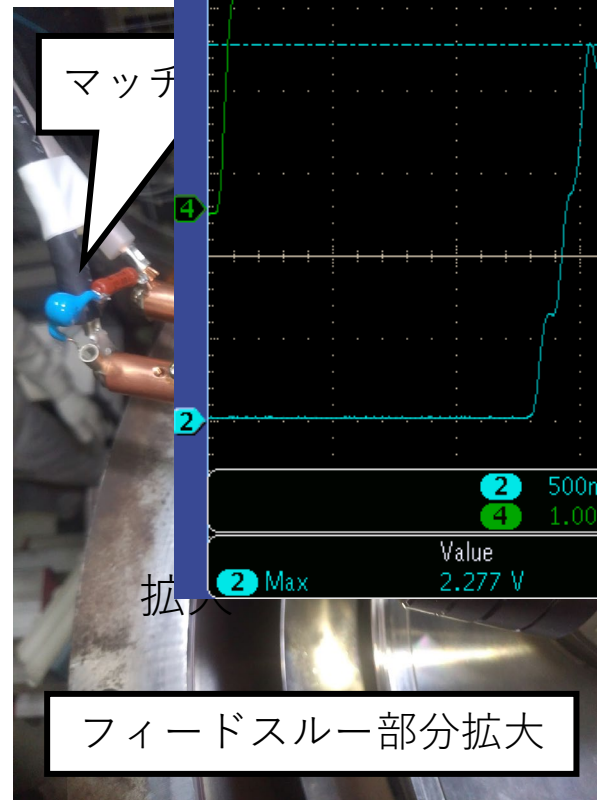
東大・松下、
茨大・小田

16

キッカーパルス電源



- 蓄積チェンバーの蓋を閉じた後、上から撮影した俯瞰図
- キッカーに流す電流波形は、ロゴスキーコイルで測定
 - 印加したHV: 5kV
 - 電圧 --> 電流への変換: $50\text{mV} = 1\text{A}$



フィードスルー部分拡大

準備3: キッカーコイルを電流源に接続

東大・松下、
茨大・小田

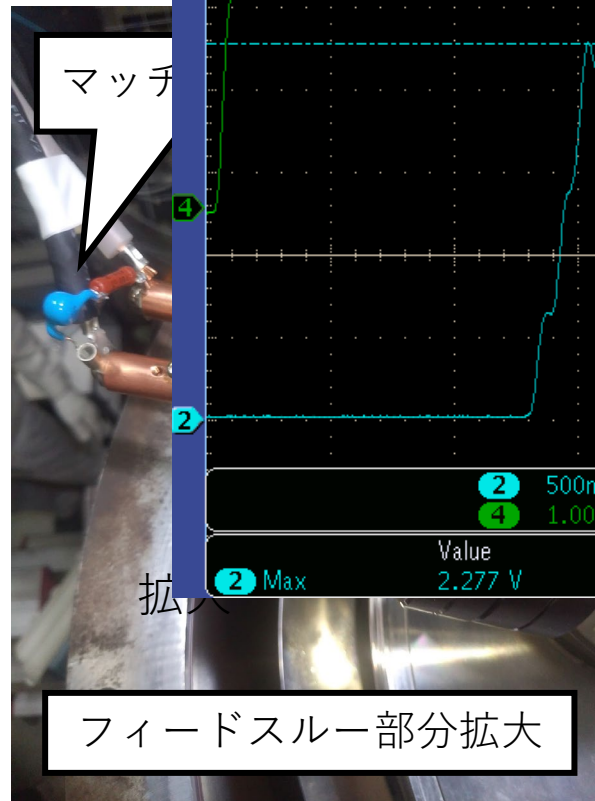
17

キッカーパルス電源



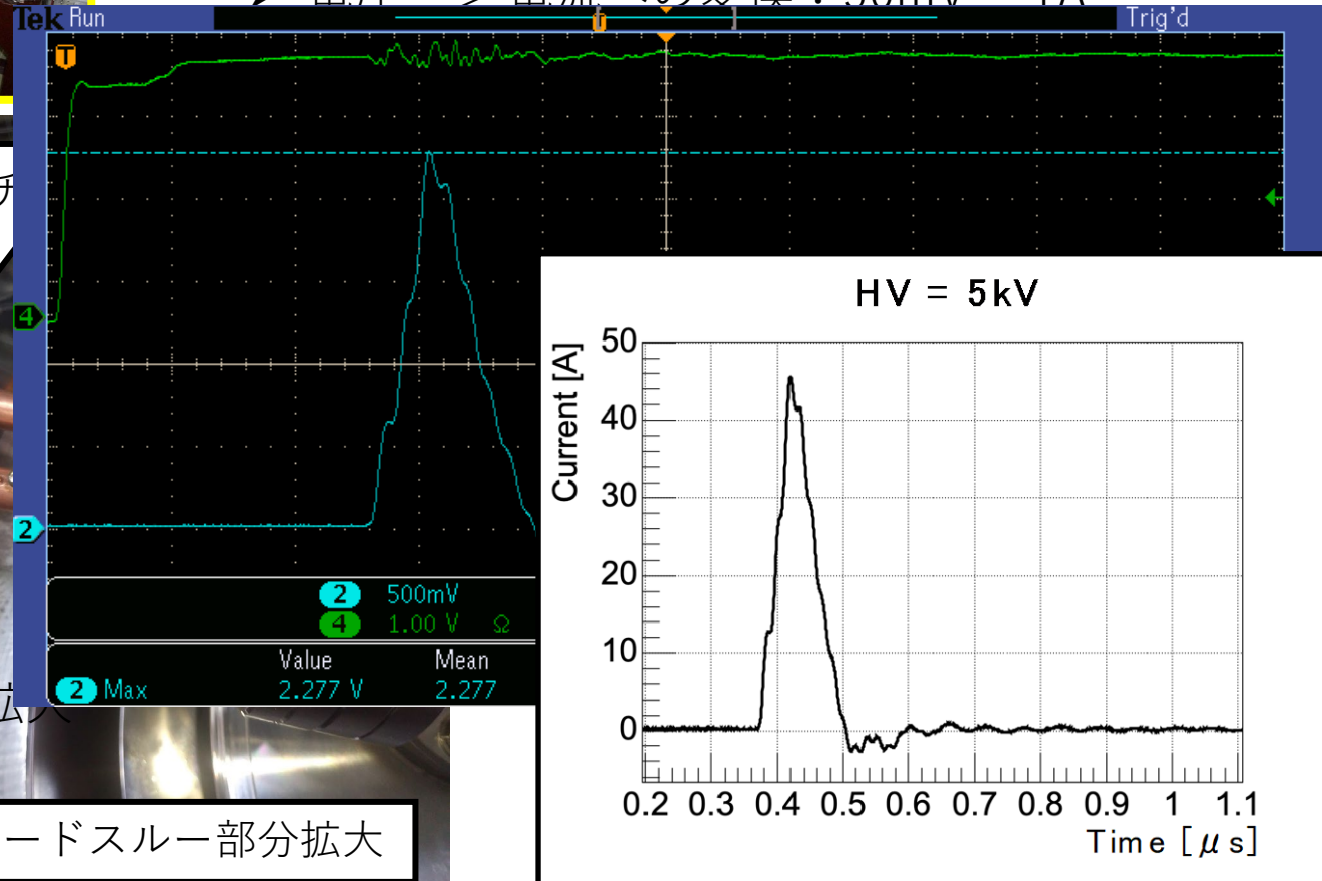
コイルに電流を流すためのフィードスルー

マッチ

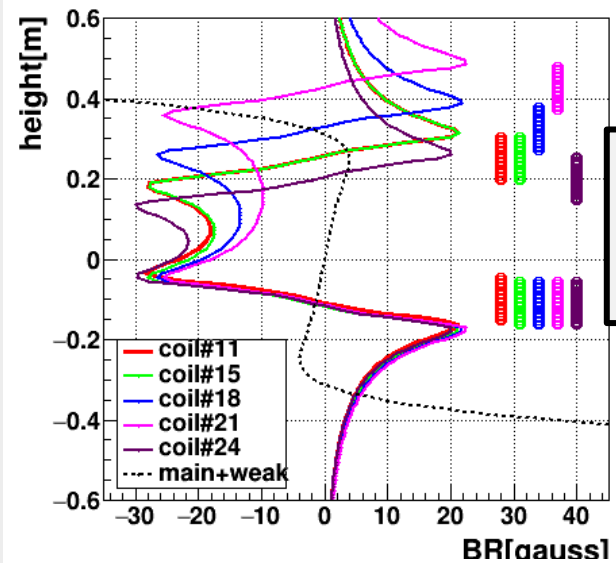


フィードスルー部分拡大

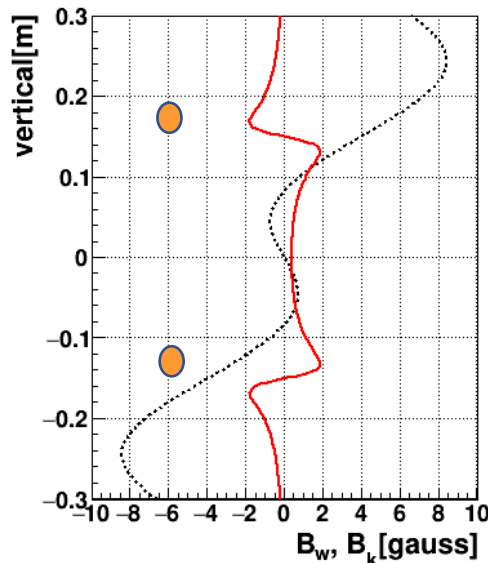
- 蓄積チェンバーの蓋を閉じた後、上から撮影した俯瞰図
- キッカーに流す電流波形は、ロゴスキーコイルで測定
 - 印加したHV: 5kV
 - 電圧 --> 電流への変換: $50\text{mV} = 1\text{A}$



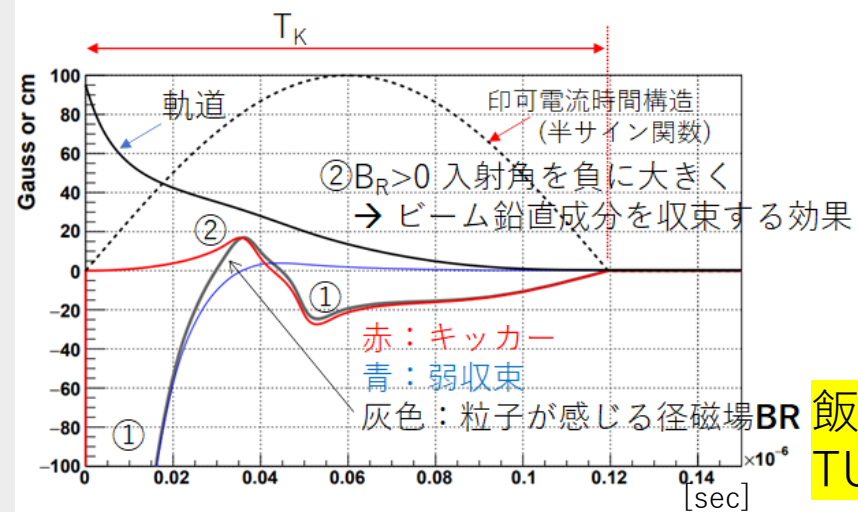
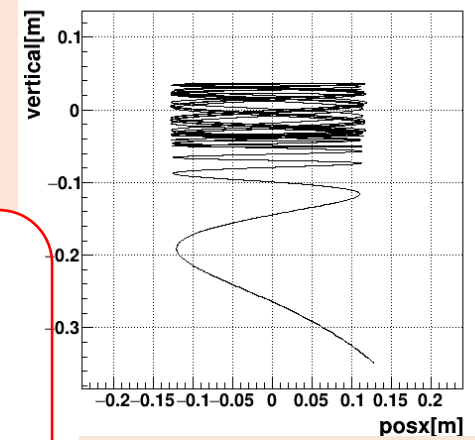
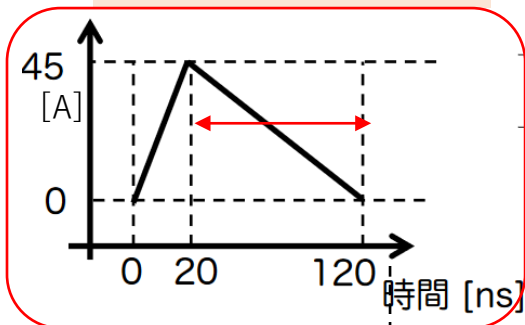
キッカー装置の比較：共に時間幅120nsecのパルス電流で垂直キックを与えるが、電流値・電源電圧がかなり異なる。



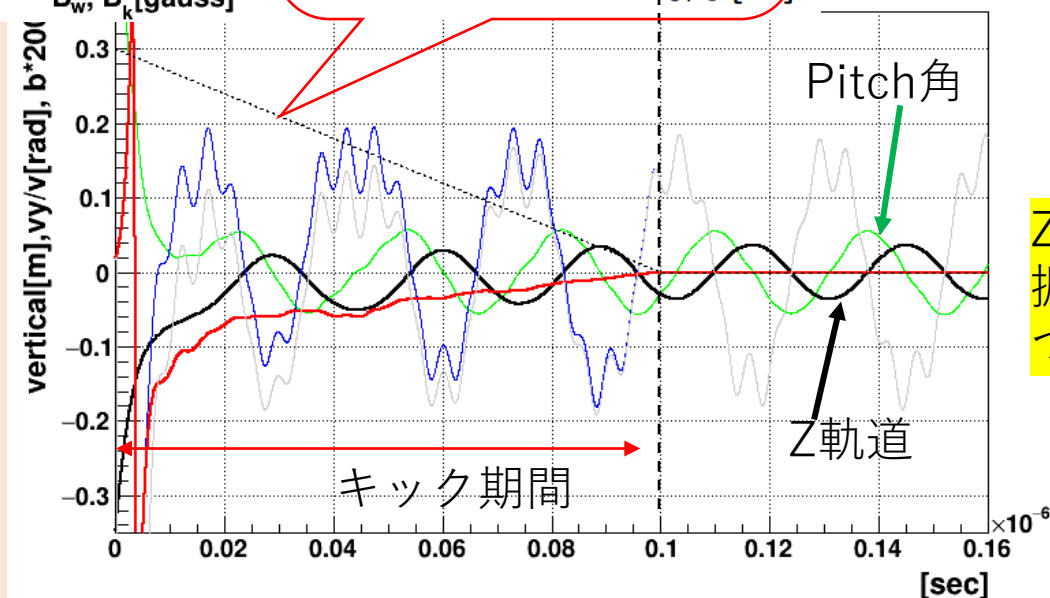
コイル印可電流
900A
L~1.1 μH/coil



コイル印可電流
40~50A
L~0.2 μH上下

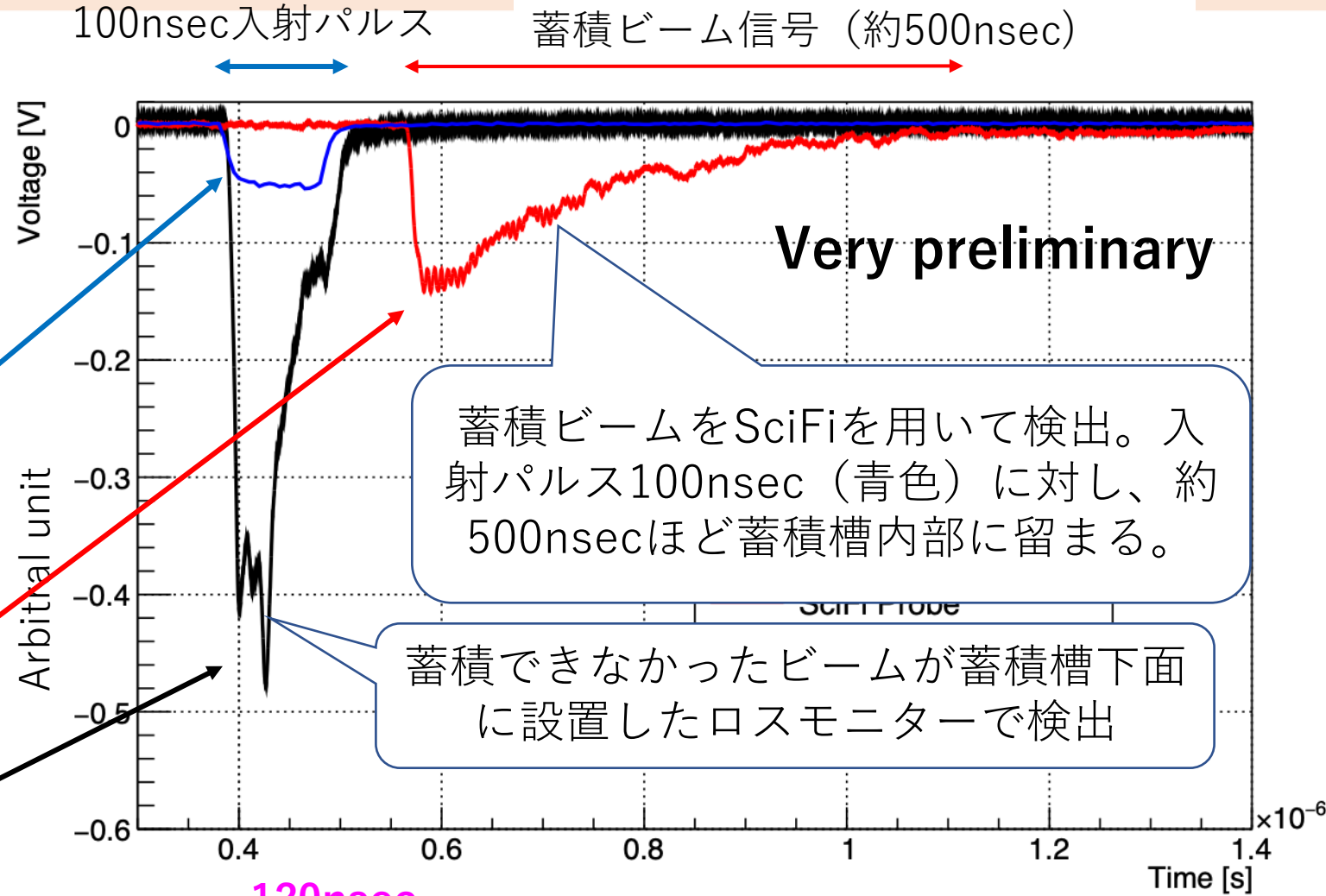
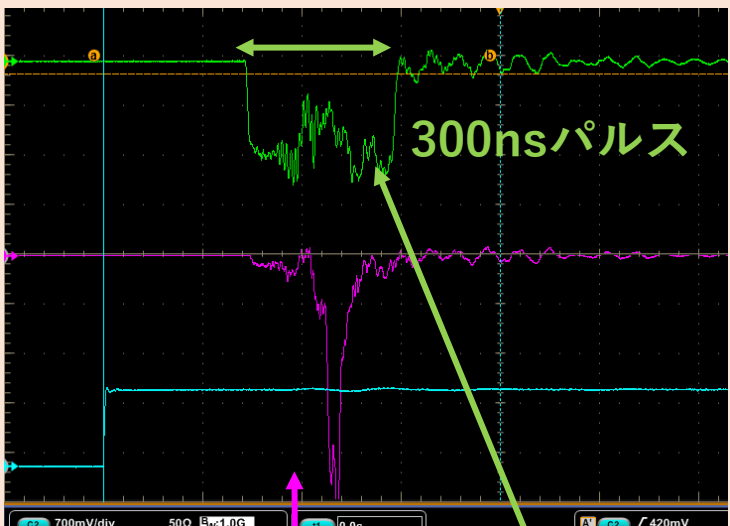


飯沼ポスター
TUP036

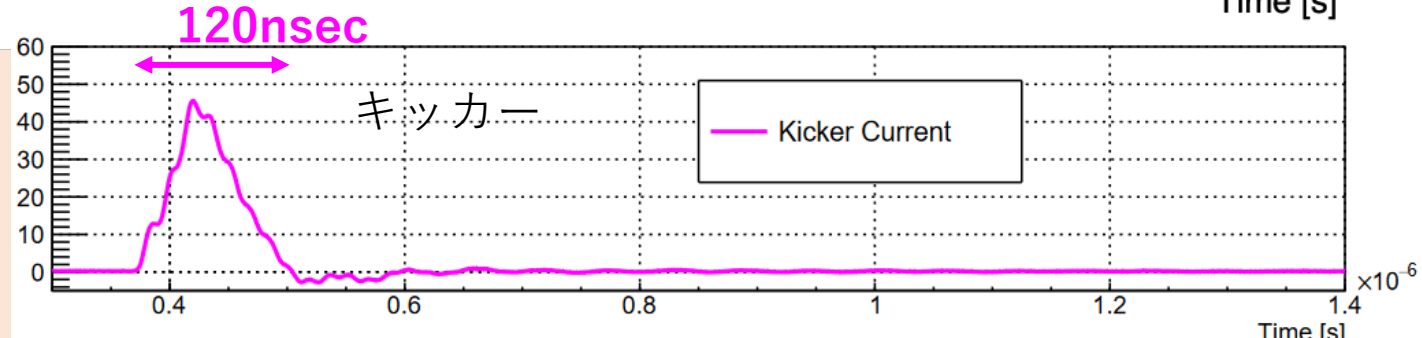
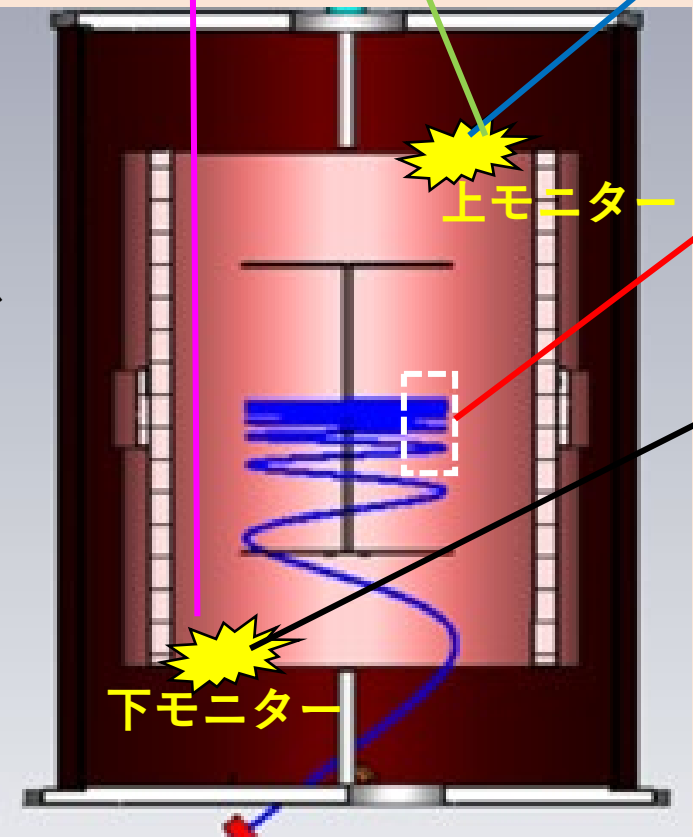


Z方向に
振動しつ
つ蓄積

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

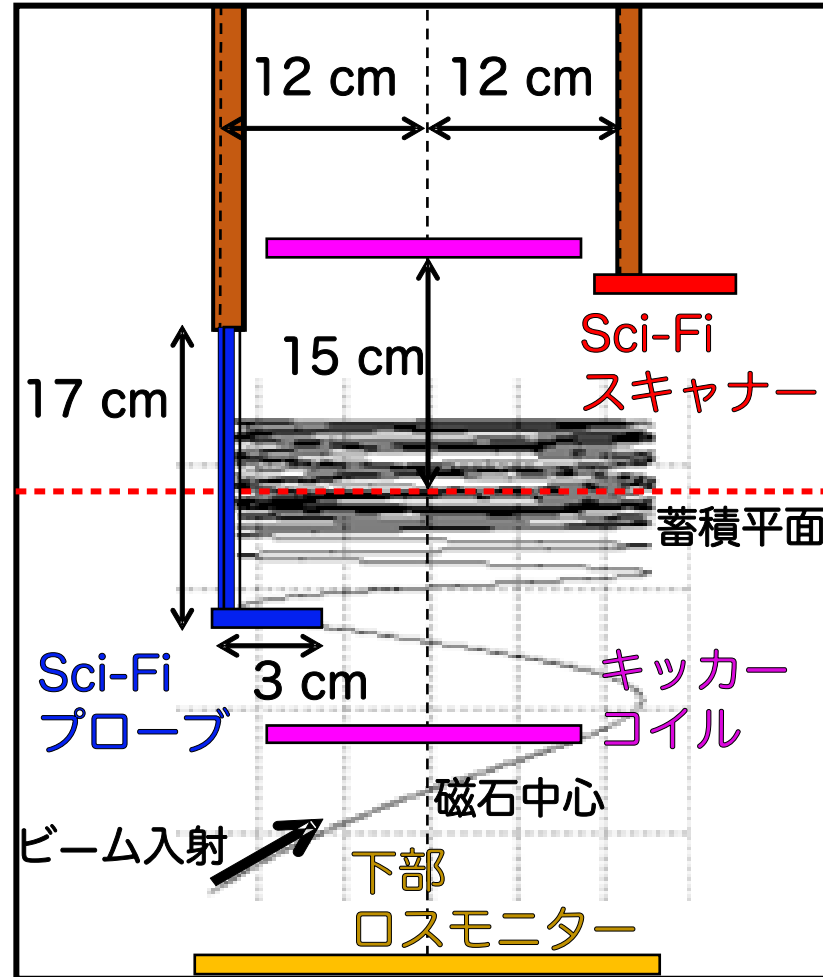
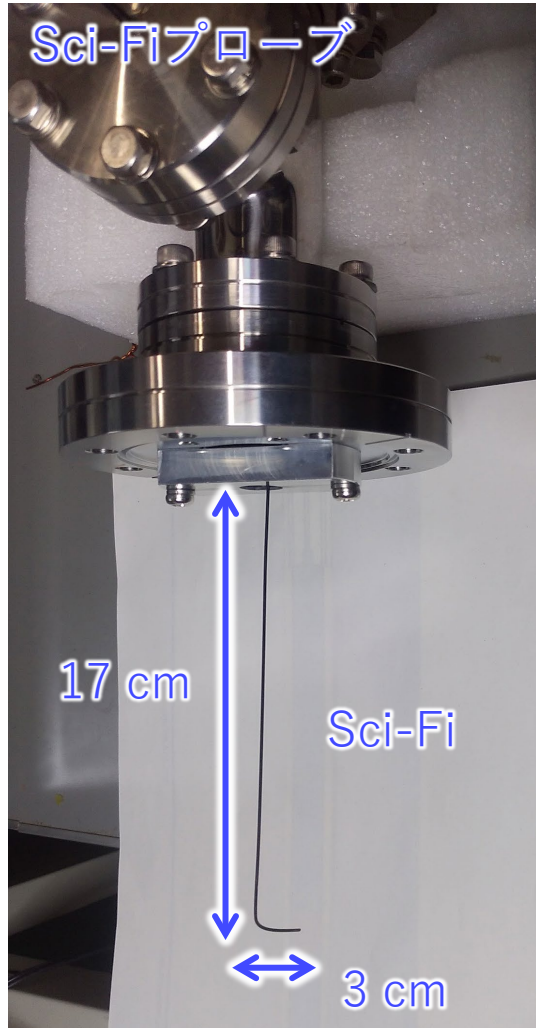


蓄積磁石、蓄積槽断面図

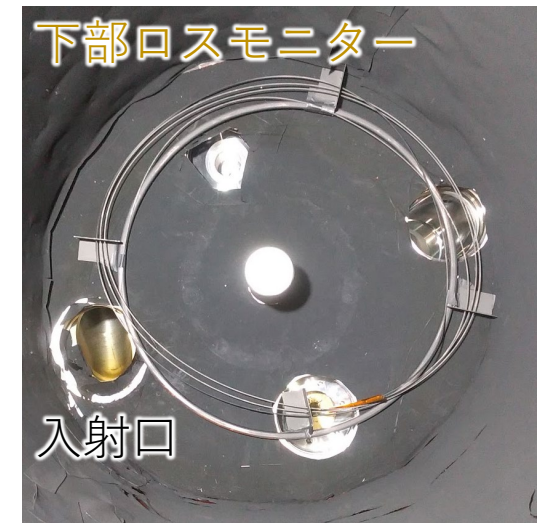
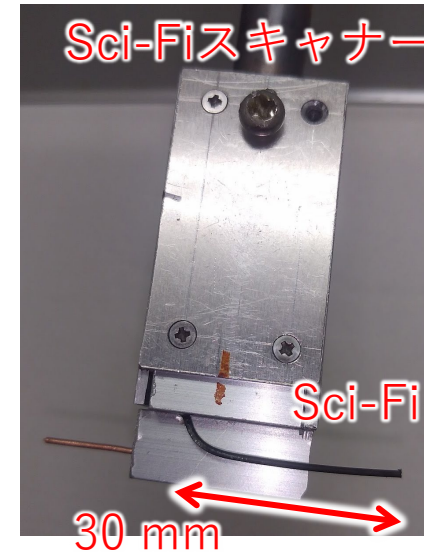


準備4: 蓄積槽内のモニター

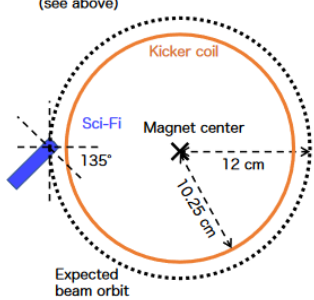
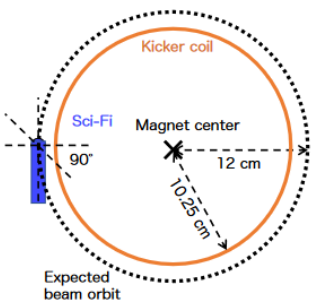
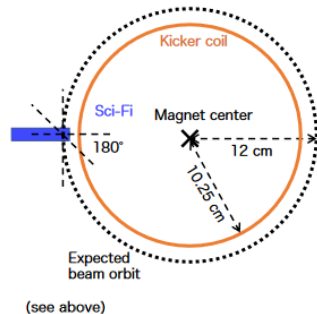
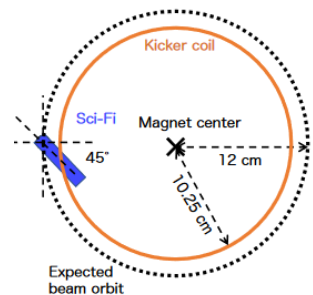
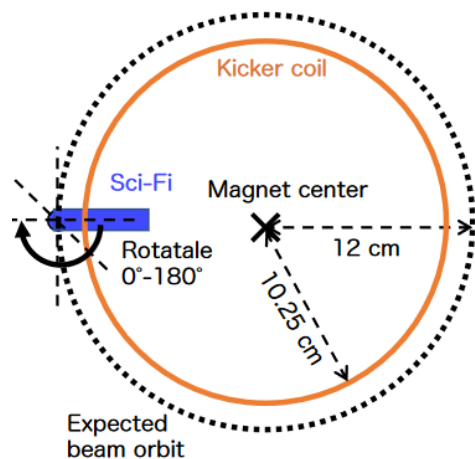
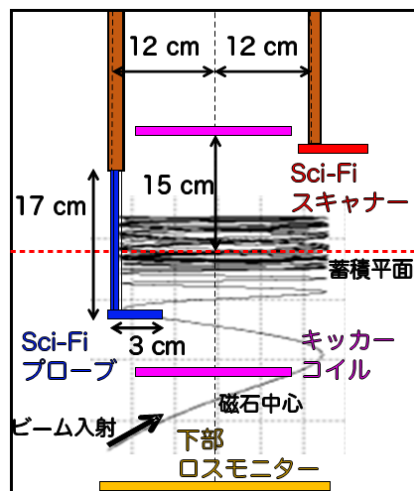
蓄積磁石内部の検出器
(横から見た図)



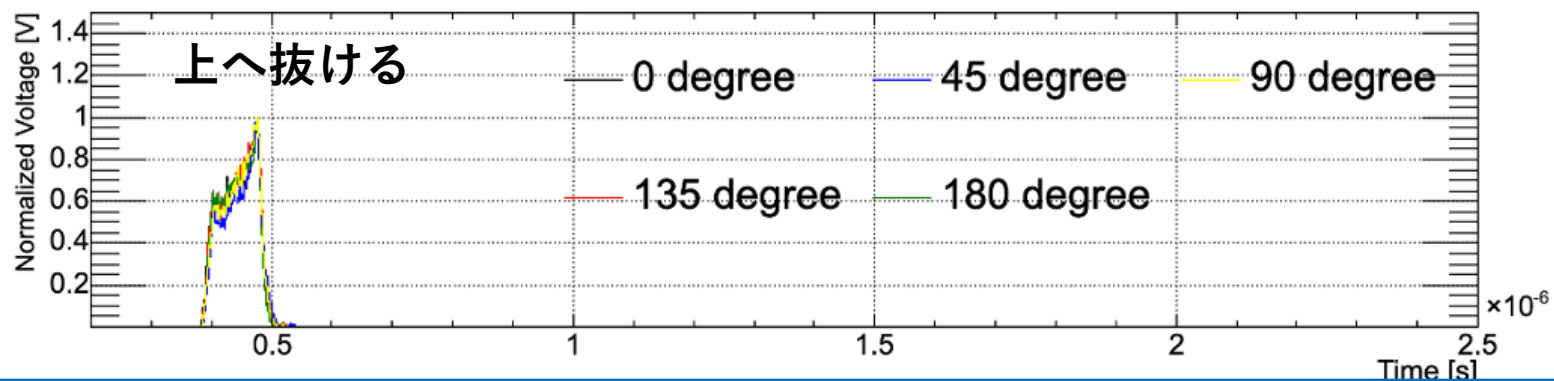
- ビーム調整、蓄積に成功/失敗したビームを検出するための、3種類の検出器
 - Sci-Fiプローブ：蓄積ビーム用
 - Sci-Fiスキャナー：ビーム調整用
 - 下部ロスモニター：反射したビーム用
- シンチファイバー(Sci-Fi)を使用
 - 光信号をPMTで電気信号に変換し、オシロで読み出し



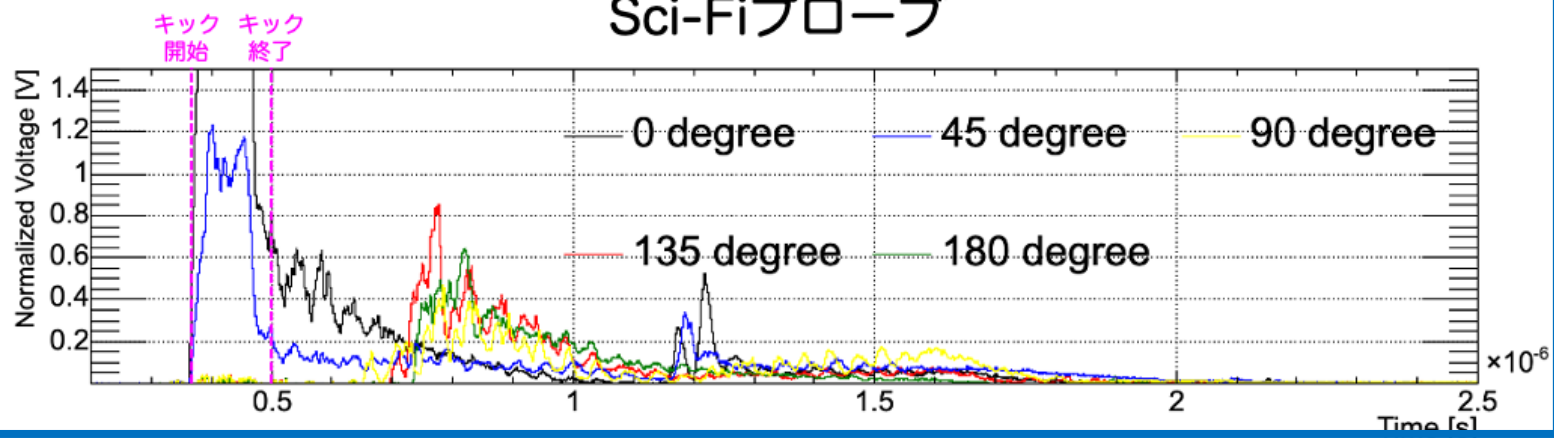
Z=0面



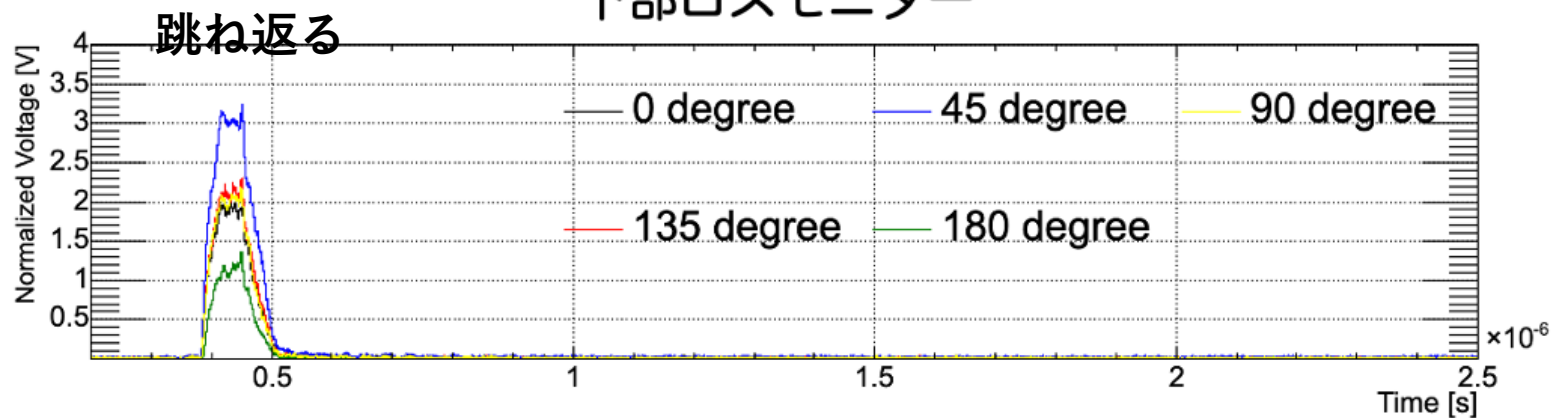
Sci-Fiスキャナー



Sci-Fiプローブ

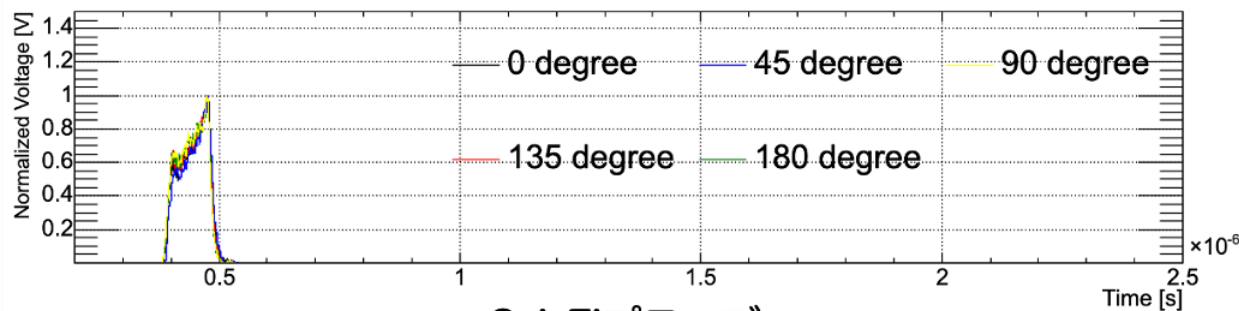


下部ロスモニター

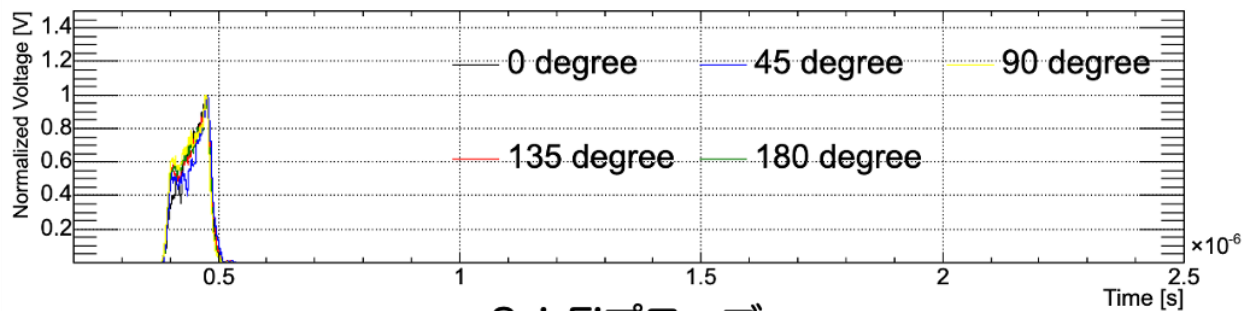


SciFiプローブ $z=-10\text{mm}$, $z=10\text{mm}$

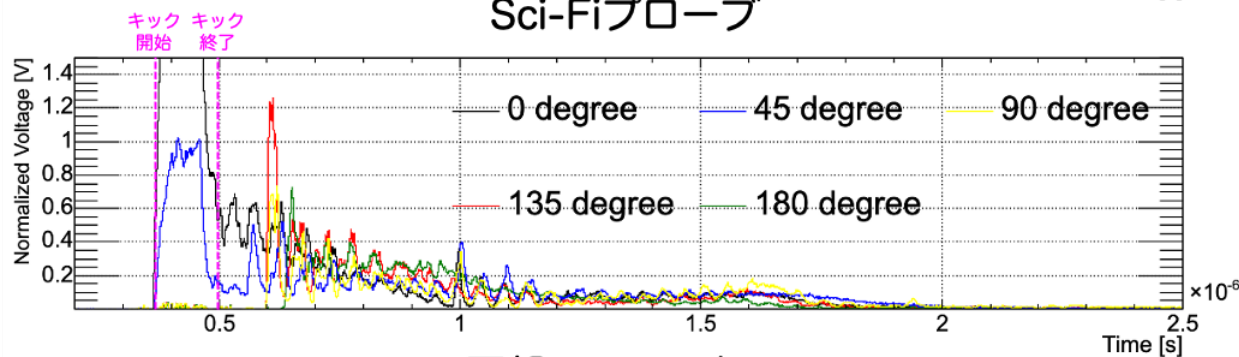
Sci-Fiスキャナー



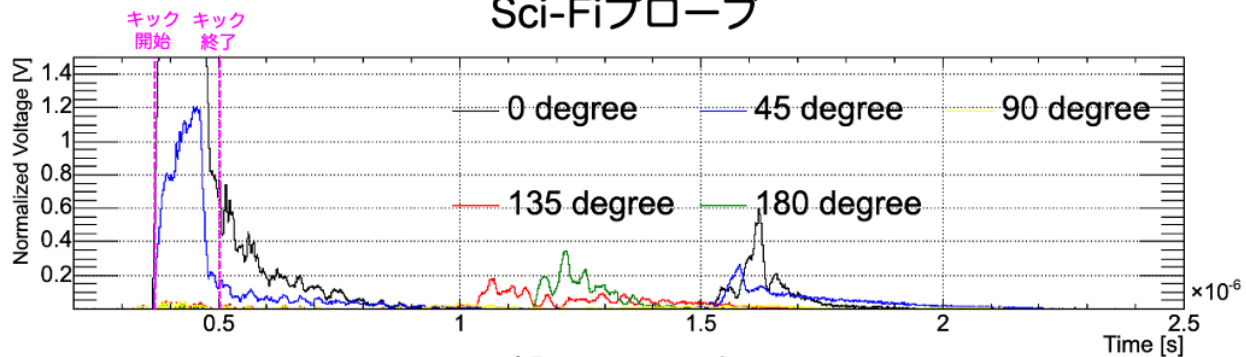
Sci-Fiスキャナー



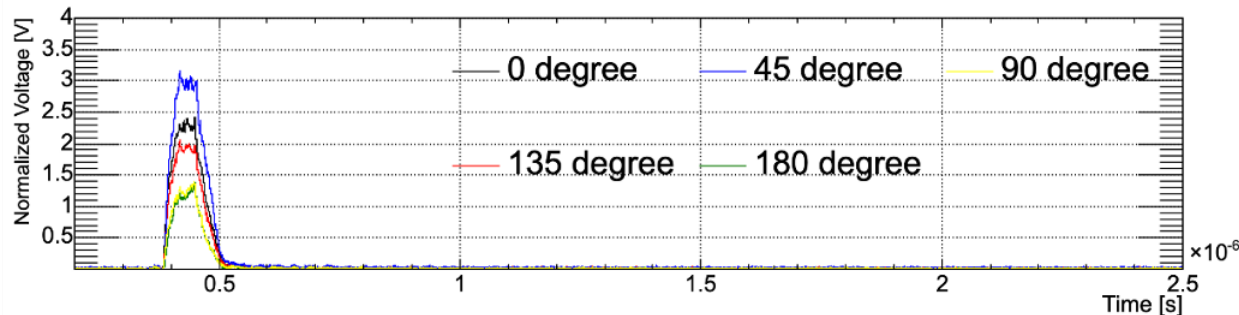
Sci-Fiプローブ



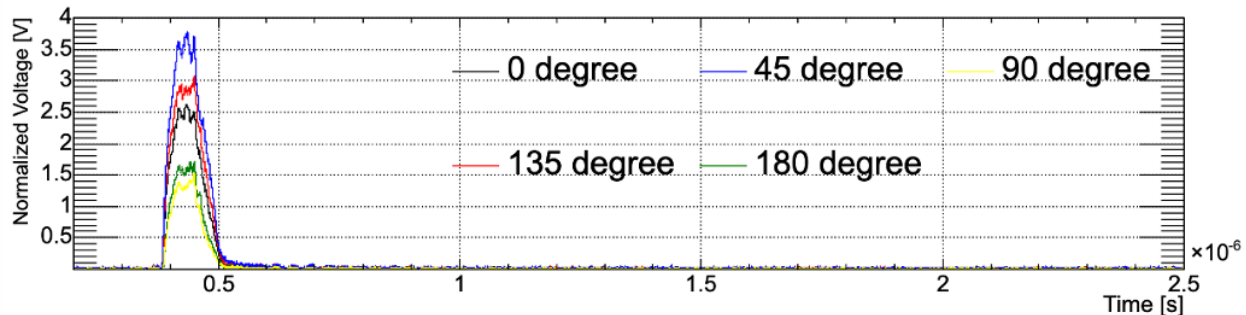
Sci-Fiプローブ



下部ロスモニター

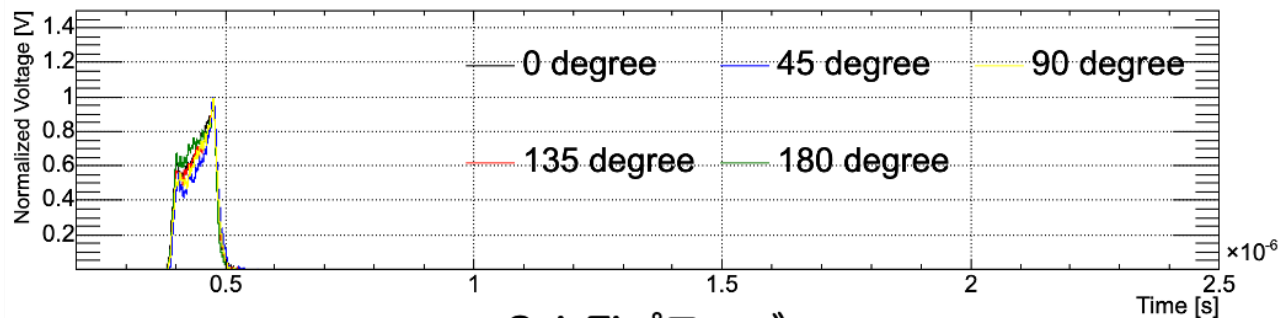


下部ロスモニター

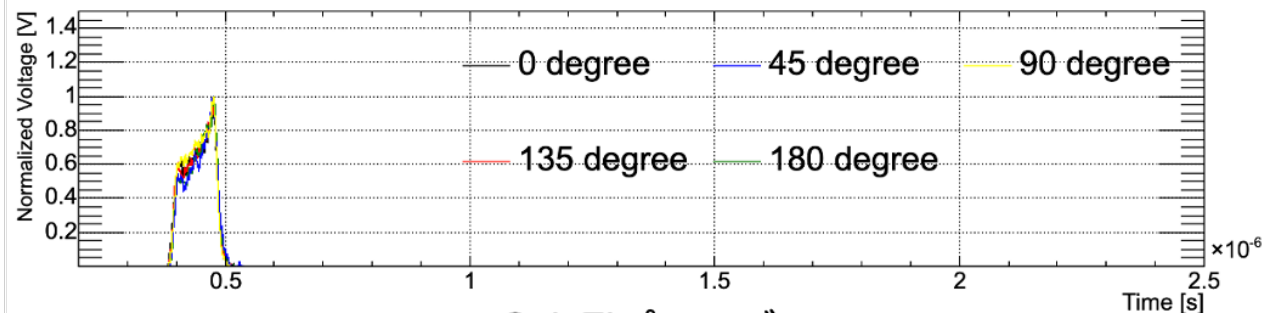


SciFiプローブ $z=-20\text{mm}$, $z=20\text{mm}$

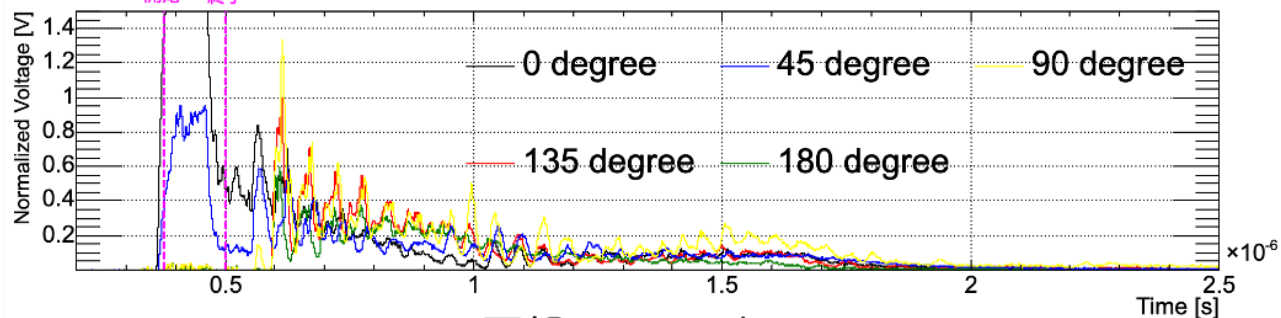
Sci-Fiスキャナー



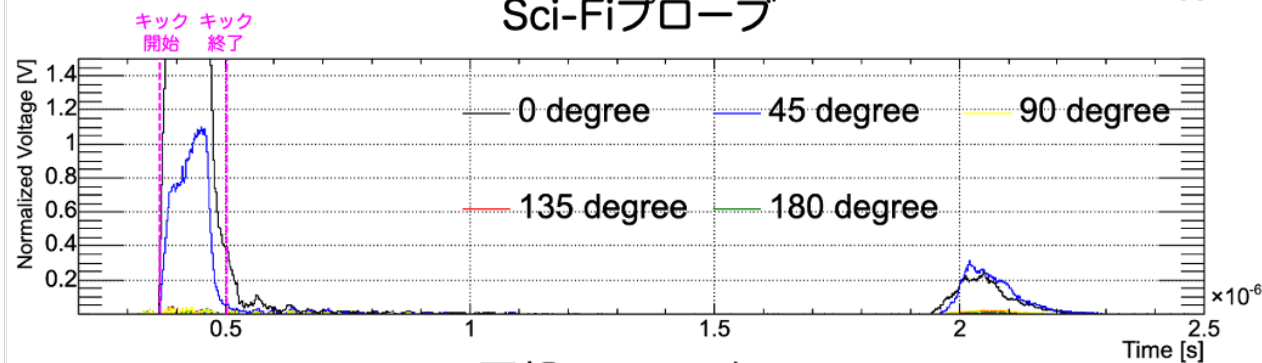
Sci-Fiスキャナー



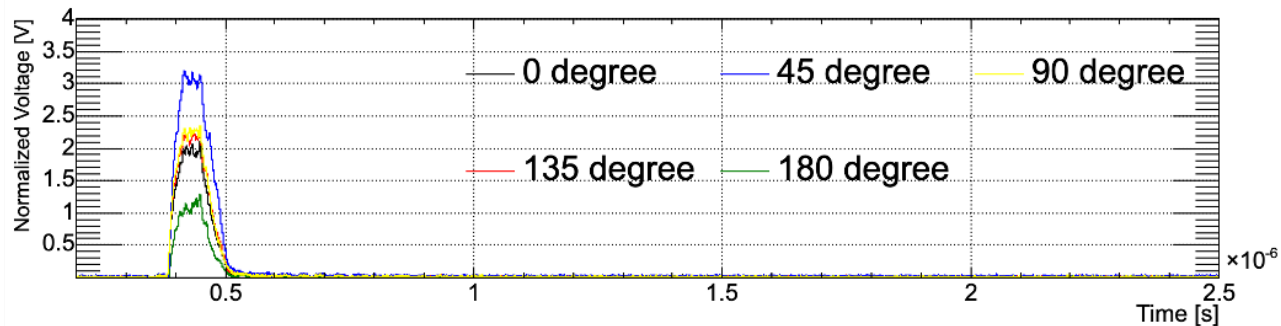
Sci-Fiプローブ



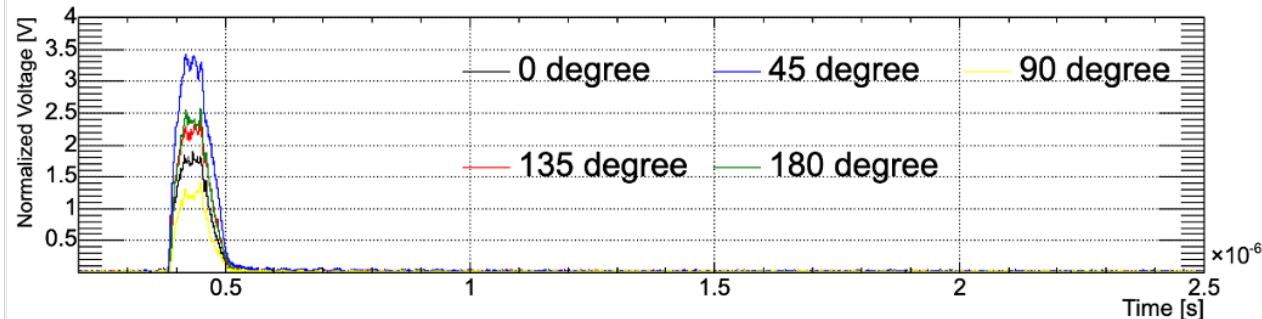
Sci-Fiプローブ



下部ロスモニター

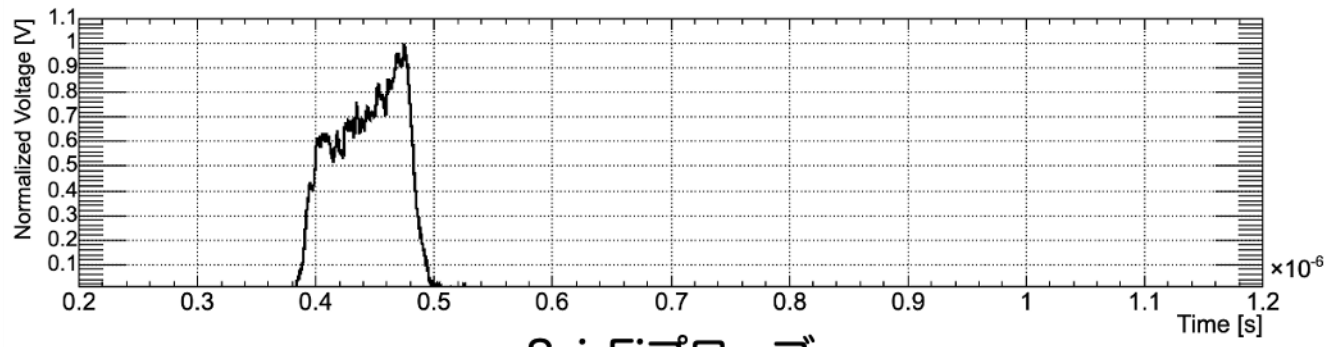


下部ロスモニター

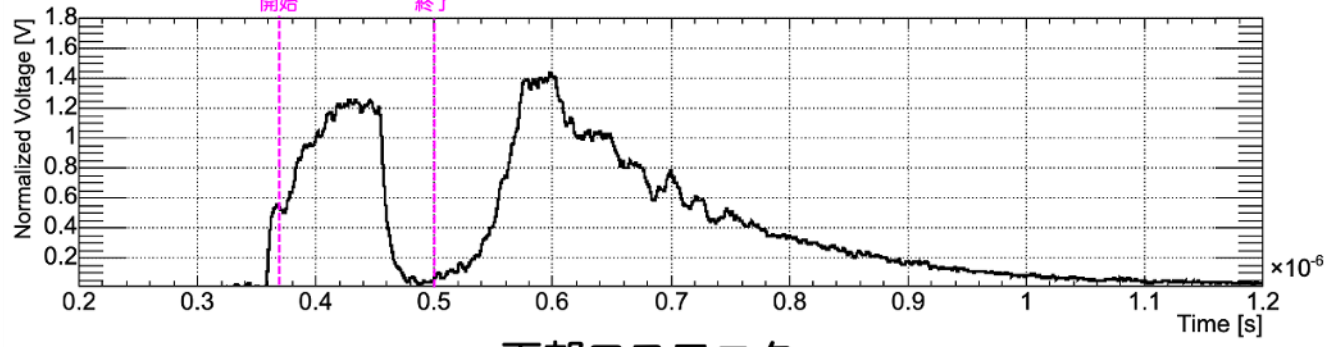


蓄積可能な下限(z=-80mm,45度)に信号が多い？

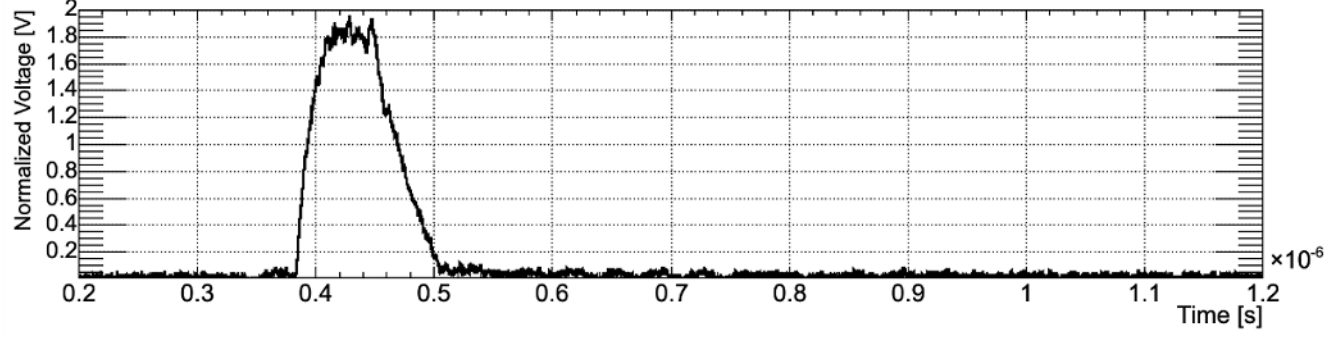
Sci-Fiスキャナー



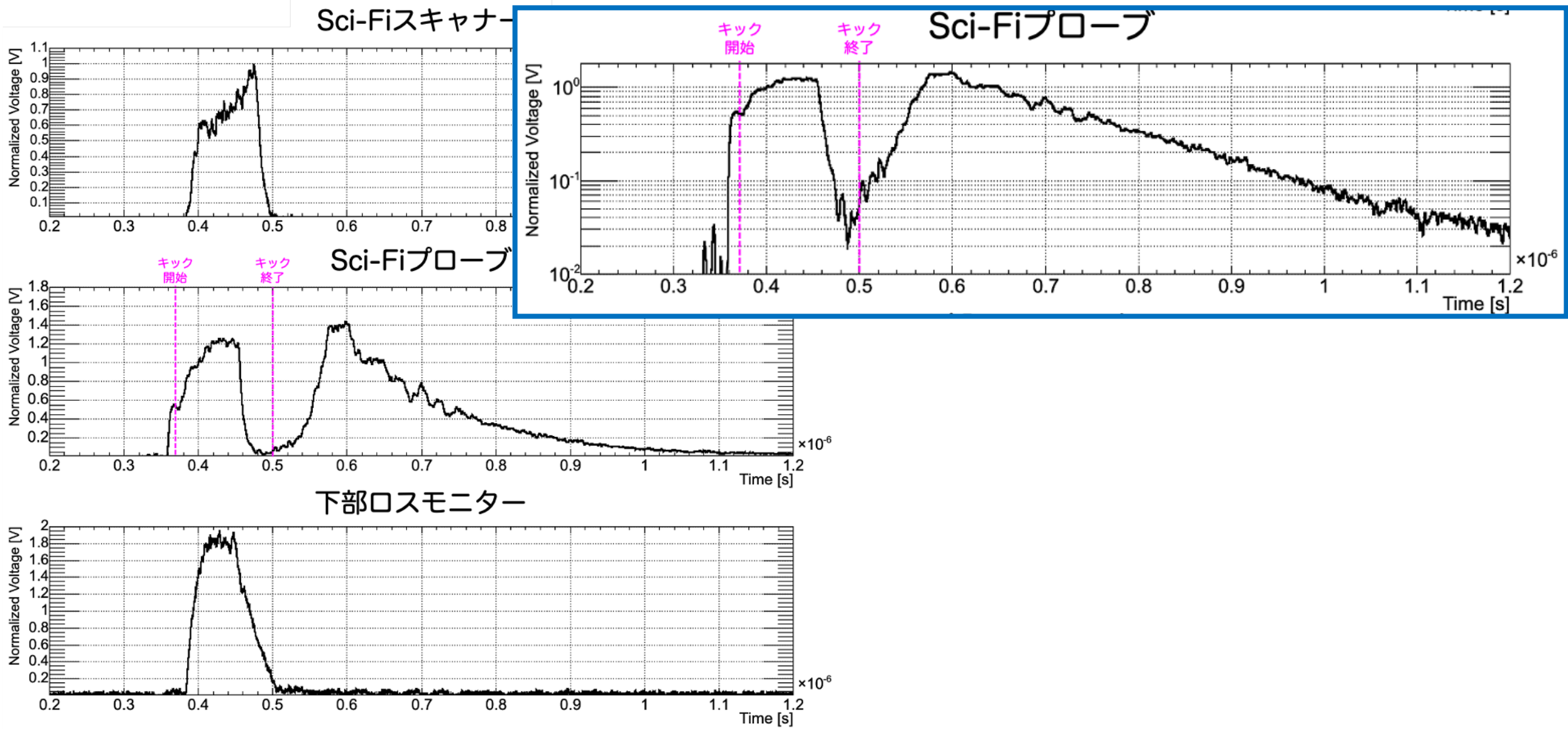
Sci-Fiプローブ



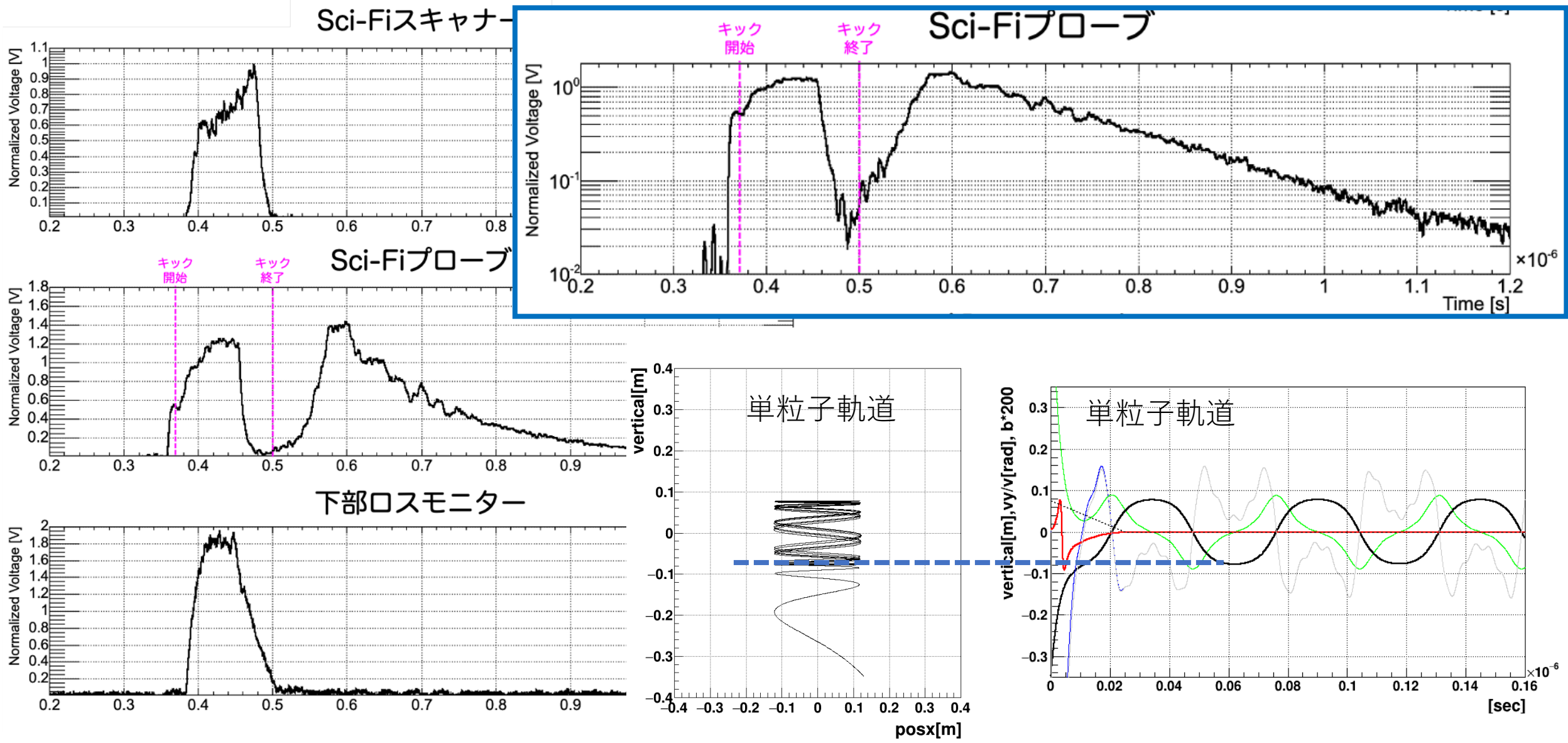
下部ロスモニター



蓄積可能な下限(z=-80mm,45度)に信号が多い？



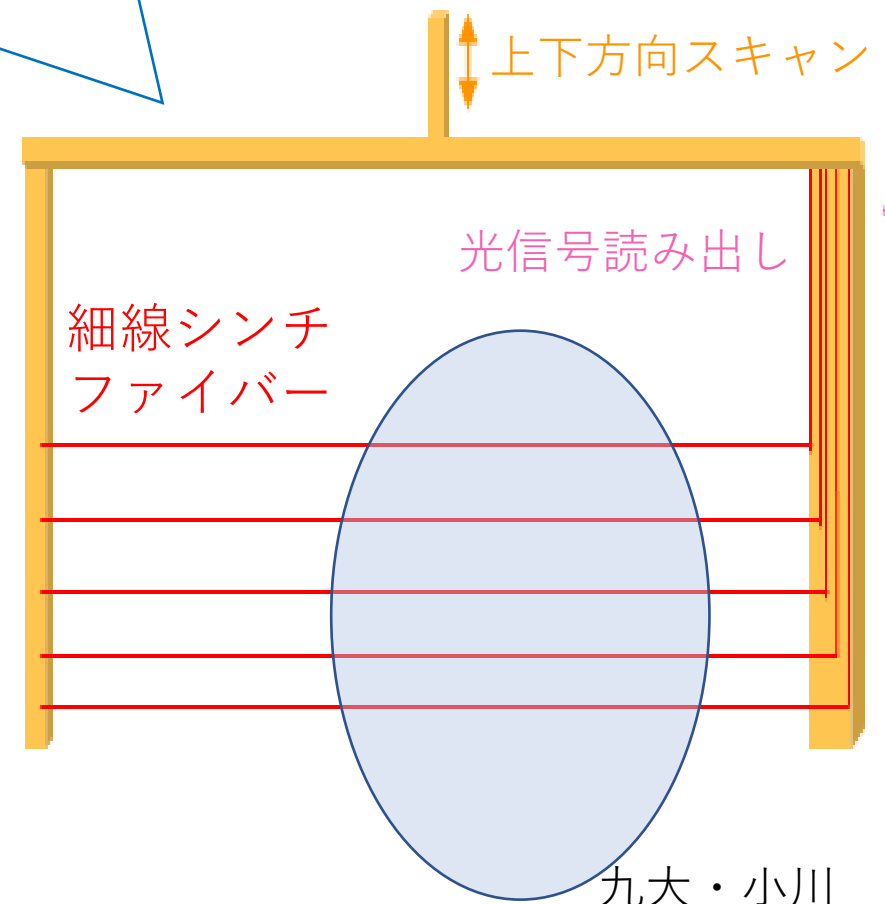
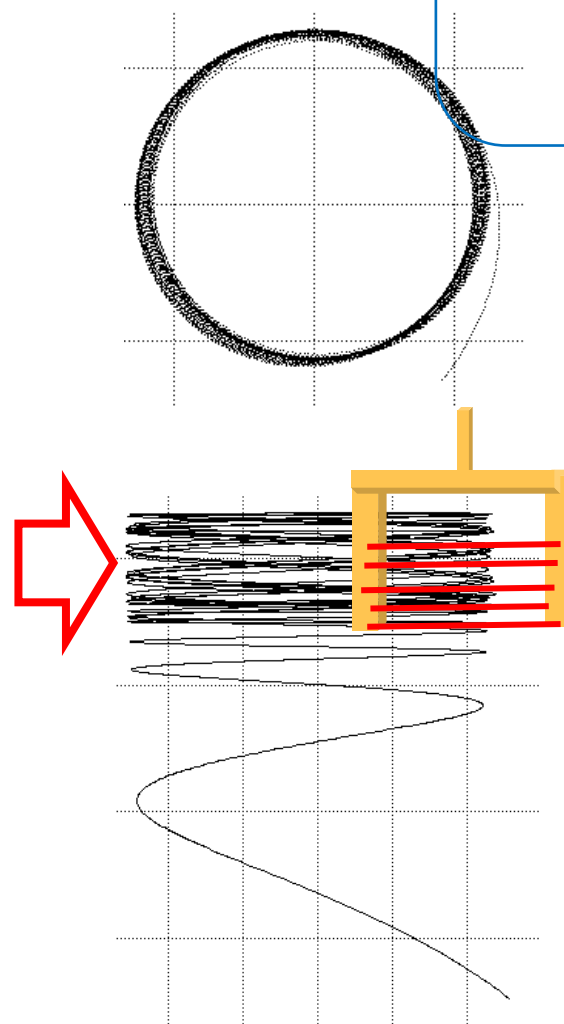
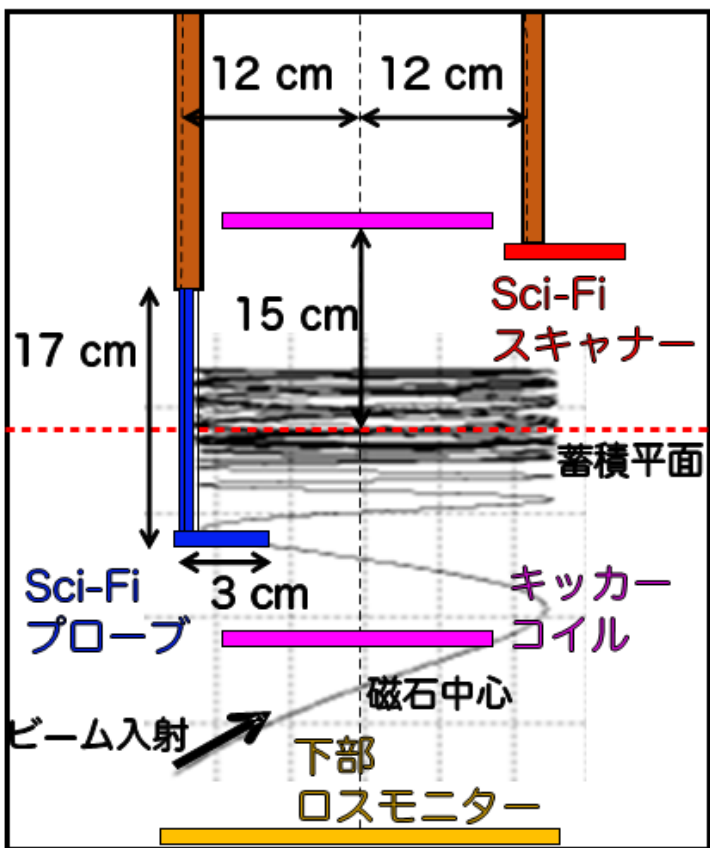
蓄積可能な下限(z=-80mm,45度)に信号が多い?



モニターの情報が必要不足!

押しポイント

細線シンチファイバーでビームへの影響を最小化
 複数本で縦方向の分布を同時測定
 より広いR方向の測定範囲
 (=ファイバー縦方向はビームに当たらないようにして、縦横の情報の切り分け)



まとめ

- ✓ 3次元螺旋軌道ビーム入射の実証実験を2014年より進めている。
80keV電子ビームを1mほど輸送し、ソレノイド磁石内、半径12cm軌道に蓄積する。
- ✓ **マイルストーン1：OK**
X-Y結合制御シナリオ、蓄積軌跡の可視化
- ✓ DCビームのパルス化、キッカー装置のインストールを行った。
- ✓ **マイルストーン2：進捗報告**
垂直キッカーと弱収束磁場を組み合わせた蓄積ビーム由来の信号を検出した。
- ✓ ビームモニターの情報を増やし、詳細検討を今後も続ける。

本番実験に向けて

- 弱収束磁場の分布、ソレノイド磁場の分布が本番磁石と比べて均一度が悪いため、ベータトロン振動周期が振幅依存性を持つ→軌道の理解が複雑。
- キッカーの時間幅・キッカーコイルの配置を変更できないが、弱収束磁場の強さは変えられるので、モニター性能向上と同時に、パラメータスタディを行う。
- キッカースタートタイミングと、ビーム入射角度の最適化は、本番実験の試運転でも必須項目なので、十分なスタディを行いたい。