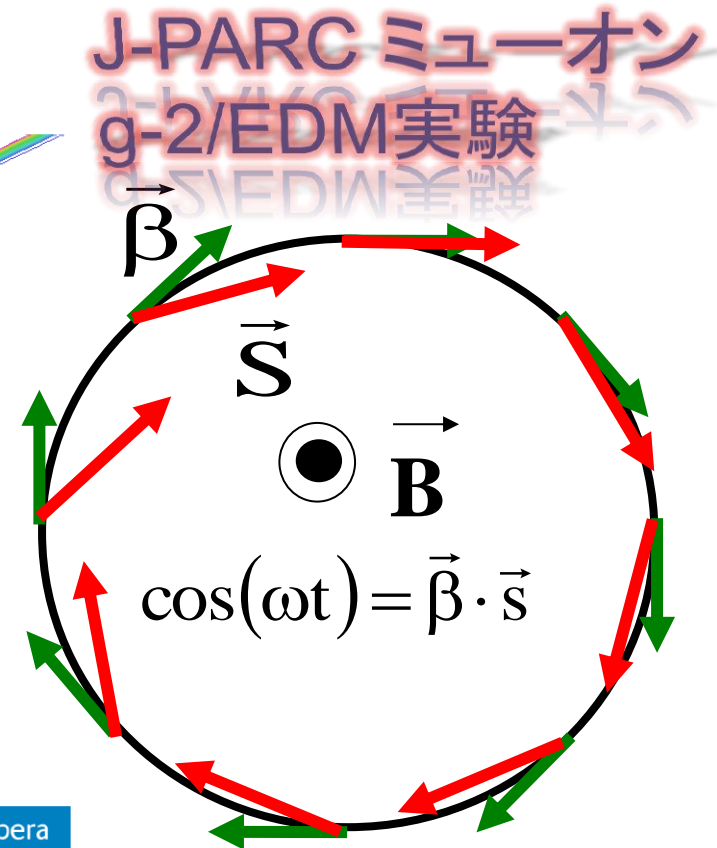
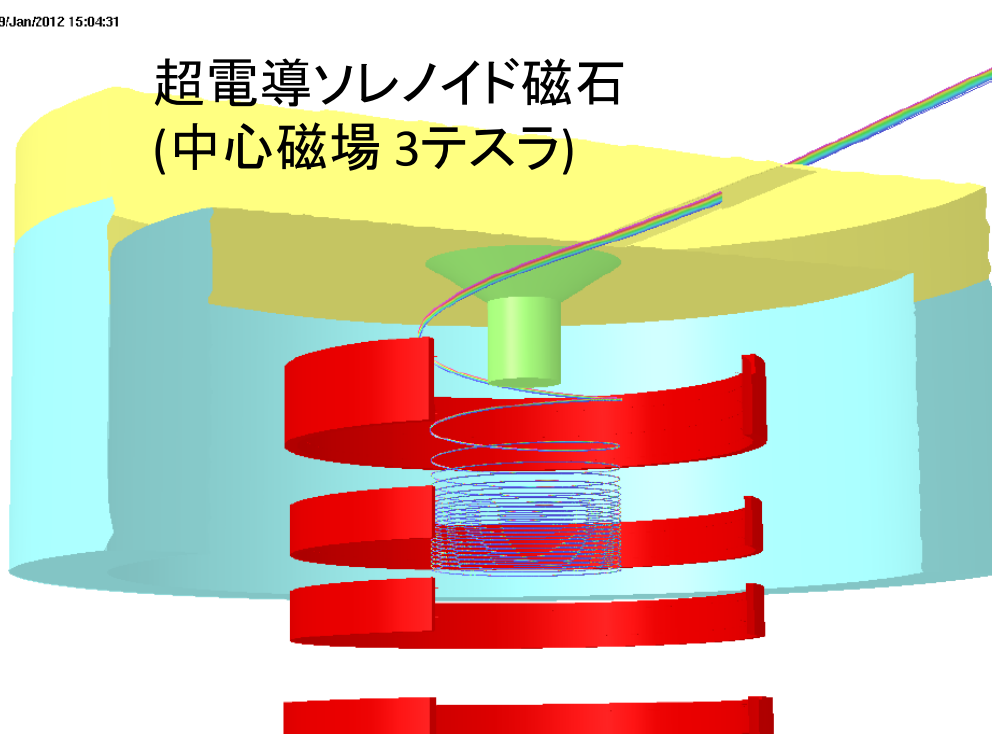


# 3次元らせん軌道ビーム入射のための パルス状磁場発生装置の開発

高エネ研 飯沼裕美、佐々木憲一、中山久義、三増俊広、三部勉、  
日立日立研 阿部充志

19/Jan/2012 15:04:31

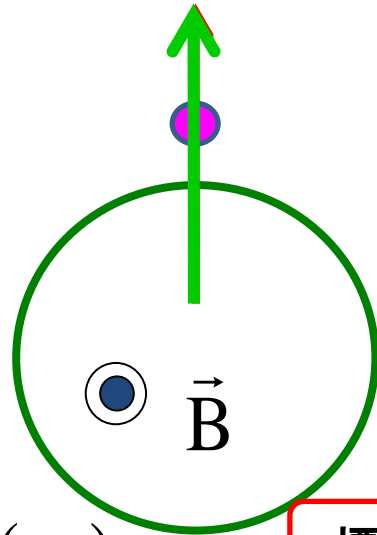
超電導ソレノイド磁石  
(中心磁場 3テスラ)



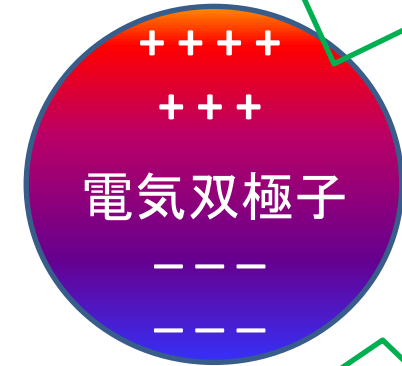
# J-PARC g-2/EDM実験の紹介

ミューオンが水分子みたいに分極？  
基本粒子なのに内部構造が？

g-2



EDM



$$\vec{\beta} \cdot \vec{s} = \cos(\omega t)$$

標準模型で精密計算

標準模型ではありえない!

ミューオンスピン  
歳差運動

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_{g-2} = \frac{e}{m_{\mu}} \frac{g-2}{2} \vec{B}$$

(2006年論文)

BNL/E821実験

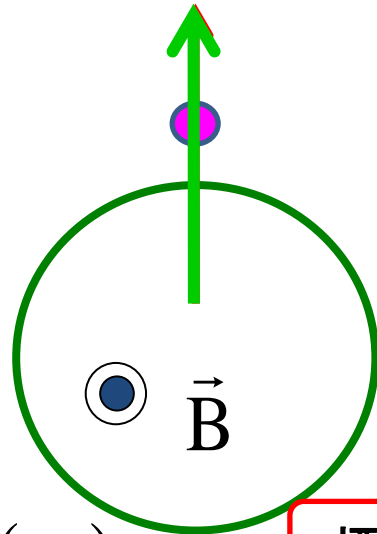
g-2: 0.54ppmで計測  
標準理論と3σのズレ

EDM: 上限値 ~ 1e-19 e.cm

# J-PARC g-2/EDM実験の紹介

ミューオンが水分子みたいに分極？  
基本粒子なのに内部構造が？

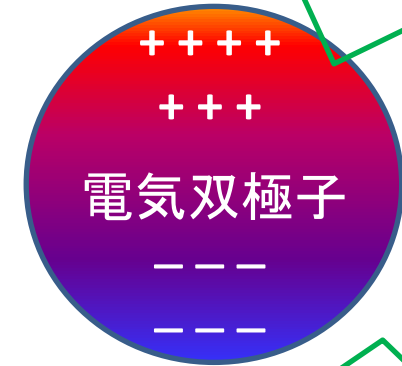
g-2



$$\vec{\beta} \cdot \vec{s} = \cos(\omega t)$$

標準模型で精密計算

EDM



標準模型ではありえない!

ミューオンスピン  
歳差運動  $\vec{\omega} = \vec{\omega}_{g-2} + \vec{\omega}_{EDM}$

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

g-2物理結果  
目標精度<0.1ppm

EDM物理結果  
目標感度<1e-20 e.cm

(2006年論文)  
BNL/E821実験

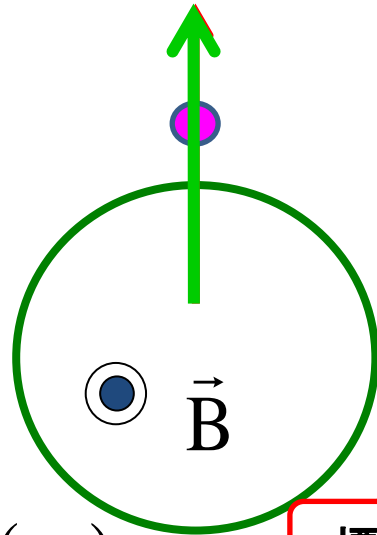
g-2: 0.54ppmで計測  
標準理論と3σのズレ

EDM: 上限値 ~ 1e-19 e.cm

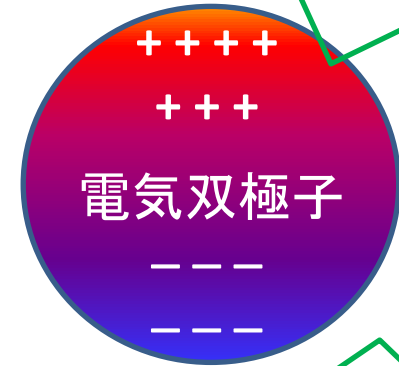
# J-PARC g-2/EDM実験の紹介

ミューオンが水分子みたいに分極？  
基本粒子なのに内部構造が？

g-2



EDM



$$\vec{\beta} \cdot \vec{s} = \cos(\omega t)$$

標準模型で精密計算

標準模型ではありえない!

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_{g-2} + \vec{\omega}_{EDM}$$

$$\vec{\omega}_{g-2} \propto \vec{B} \quad 1000$$

$$\vec{\omega}_{EDM} \propto (\vec{\beta} \times \vec{B}) \quad 1$$

**高精度な磁場調整と高品質のビームと制御が必須。**

実験の要請は、

- (a) ビーム蓄積磁場の均一度0.5ppm→コンパクトリング
- (b) ビームエミッタンス数 $10\mu\text{m}$ 程度→新しいビームライン



# どれだけコンパクト？ 貯蔵リング大きさ比較

BNL E821

半径0.33m,  $\gamma_{\mu}=3$ ,  $B=3$ [T]  
一体型貯蔵リング構造

半径7m,  $\gamma_{\mu}=29.3$ ,  $B=1.45$ [T]  
貯蔵リングは分割構造

精密磁場体積は従来方式の460分の1！



# 新しい ミューオンビームライン



J-PARC

KEK ☆

J-PARC Facility  
(KEK/JAEA)

P, 3GeV

ν

μ-beam

P, 30GeV

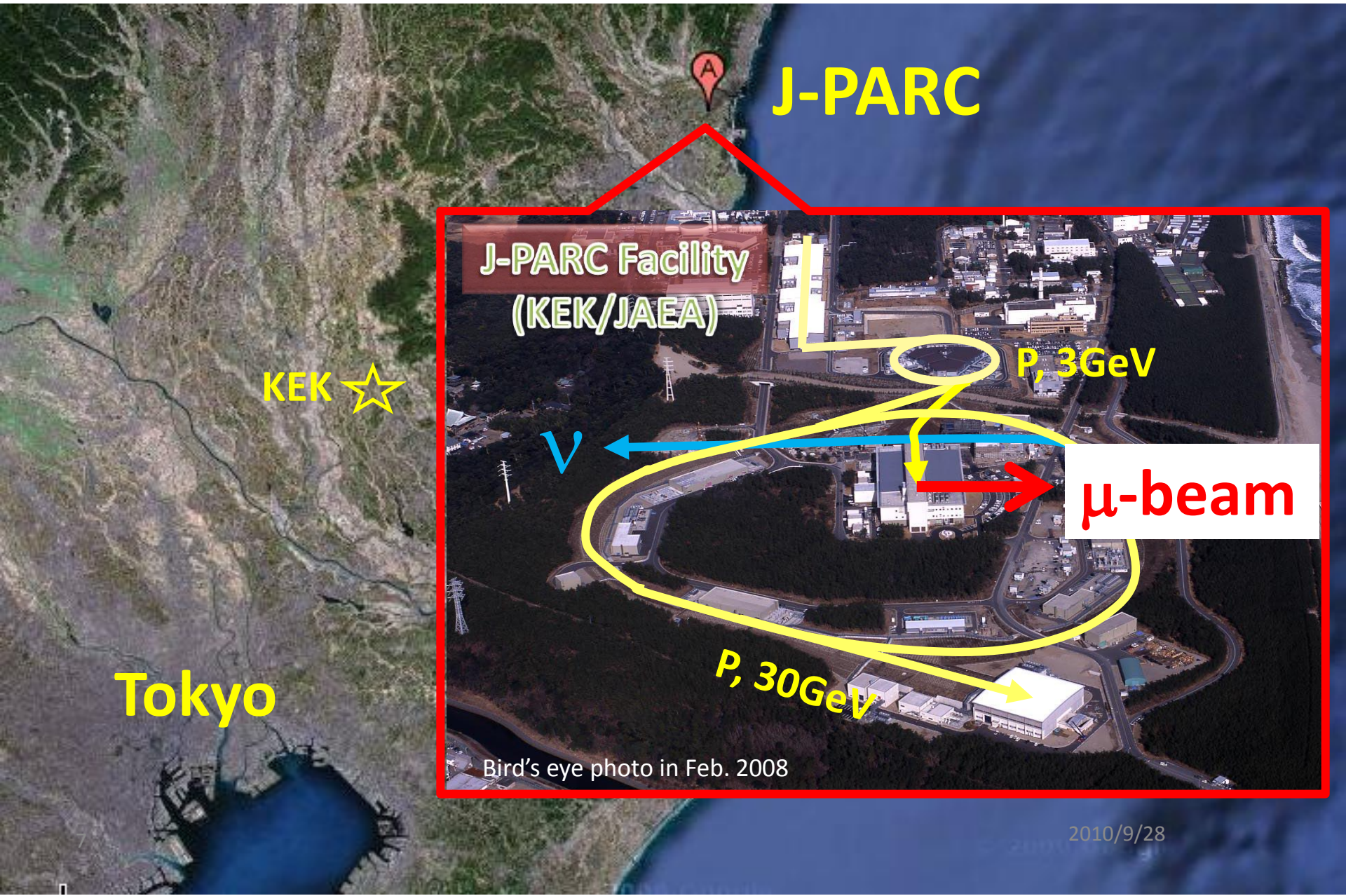
Tokyo

Bird's eye photo in Feb. 2008

2010/9/28



# 新しい ミューオンビームライン



J-PARC

J-PARC Facility  
(KEK/JAEA)

KEK ☆

P, 3GeV

μ-beam

P, 30GeV

Tokyo

Bird's eye photo in Feb. 2008

2010/9/28



3 GeV 陽子ビーム

(333  $\mu\text{A}$ )

グラファイト標的 (20 mm)

表面ミュオンビーム  
(28 MeV/c,  $4 \times 10^8/\text{s}$ )

ミュオンニウム生成

(300 K ~ 25 meV  $\Rightarrow$  2.3 keV/c)

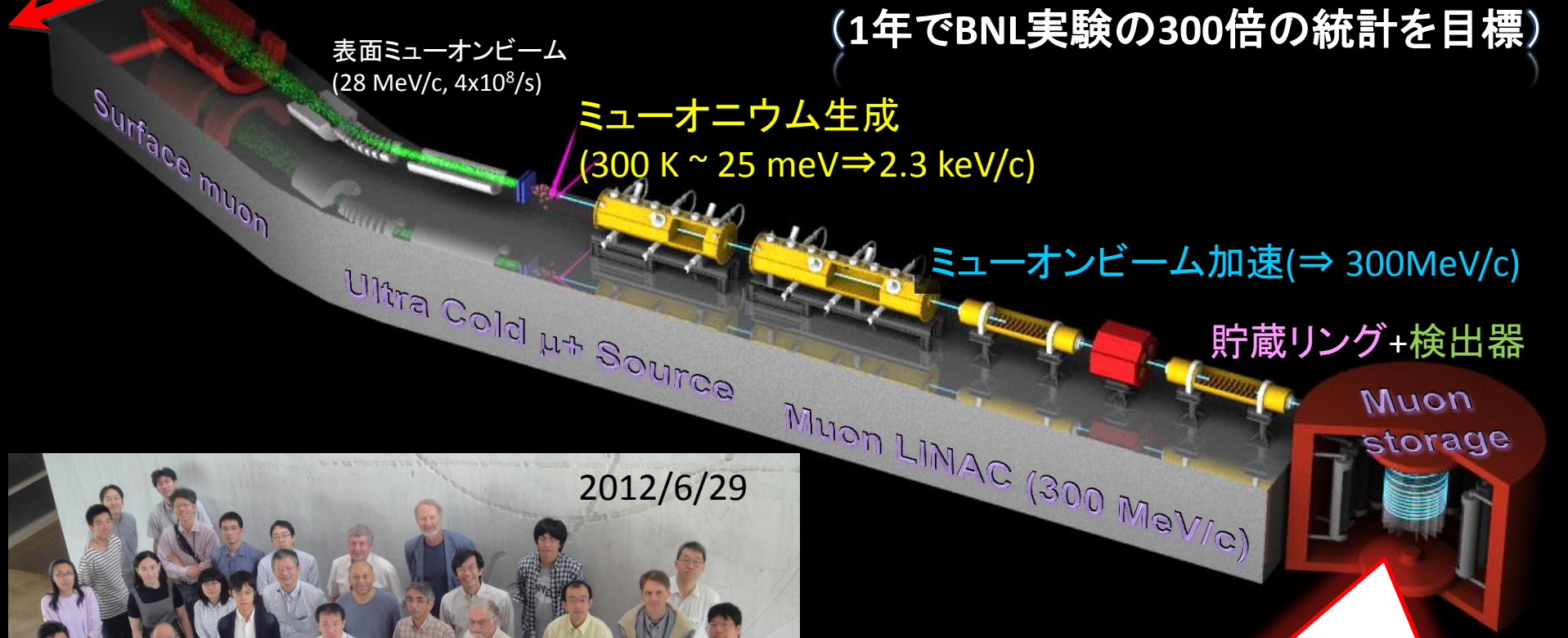
ミュオンビーム加速 ( $\Rightarrow$  300 MeV/c)

貯蔵リング+検出器

Muon storage

# J-PARC ミューオンg-2/EDM実験

(1年でBNL実験の300倍の統計を目標)



2012/6/29

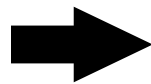
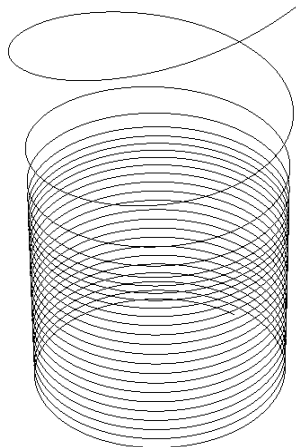
妊娠7か月

4万個/beam (25Hz)もの  
300MeV/c ミューオンが3テスラの磁場中、  
半径33.3cmの円軌道に蓄積され、  
スピン歳差運動をする。  
ミュオン異常磁気モーメント(g-2)  
および電気双極子(EDM)を測定する。

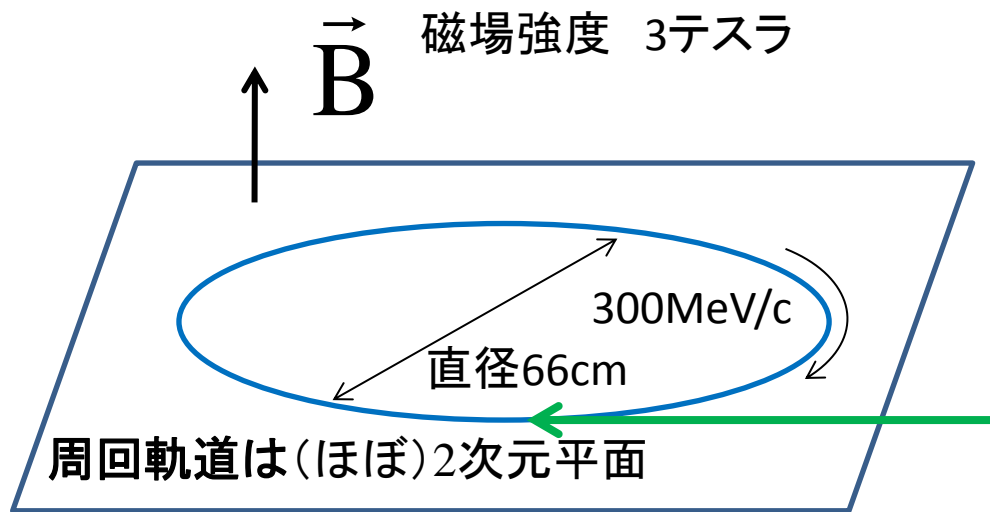


# らせん軌道入射とは？ なぜ必要なのか？

らせん軌道入射



垂直方向キック



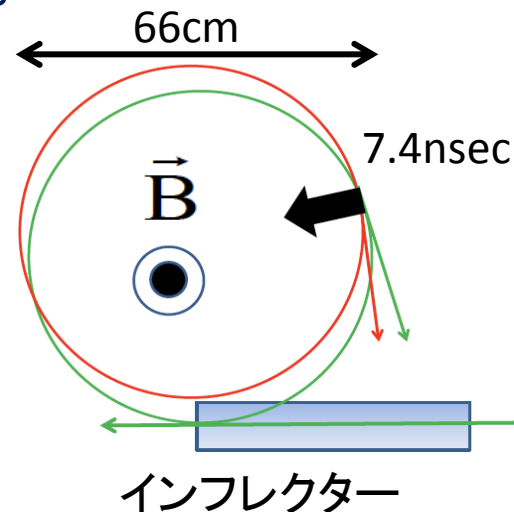
実験からの要請: 300MeV/c ミューオンビーを3テスラ磁場中、  
軌道半径33.3cmに300 $\mu$ 秒ほど蓄積する。

(a) ビーム蓄積磁場の均一度0.5ppm

(b) ビーム広がりをサブミリに抑える

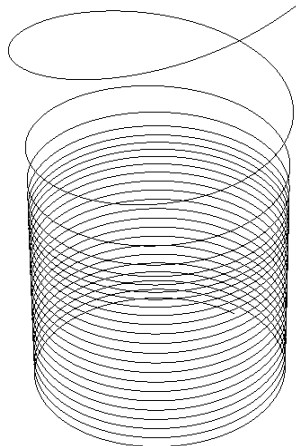
コンパクト強磁場リングへの水平入射は技術的に難しい:

- 1ターン以内に水平キック( $\sim 60$  mrad)
- 3[T] 磁石のフリンジフィールドをキャンセル

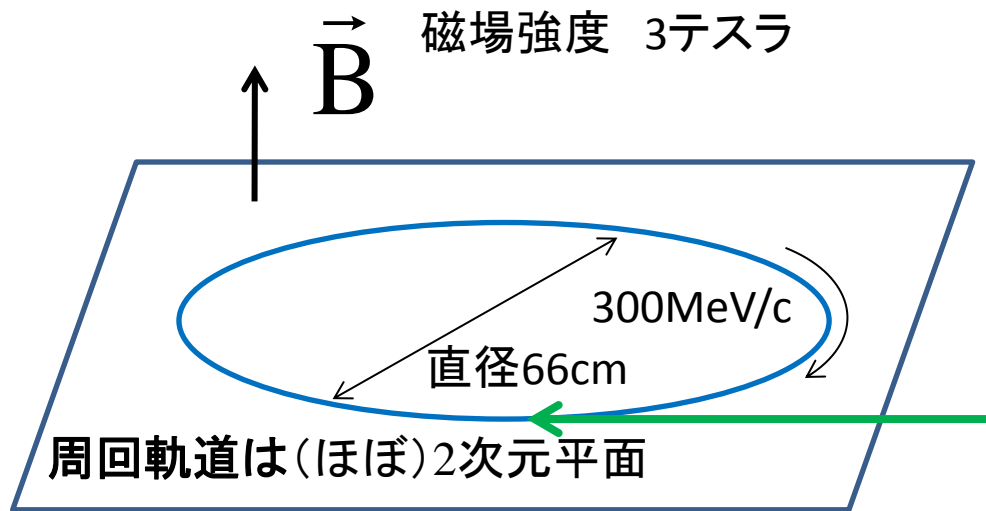


# らせん軌道入射とは？ なぜ必要なのか？

らせん軌道入射



垂直方向キック



実験からの要請: 300MeV/c ミューオンビーを3テスラ磁場中、蓄積する。

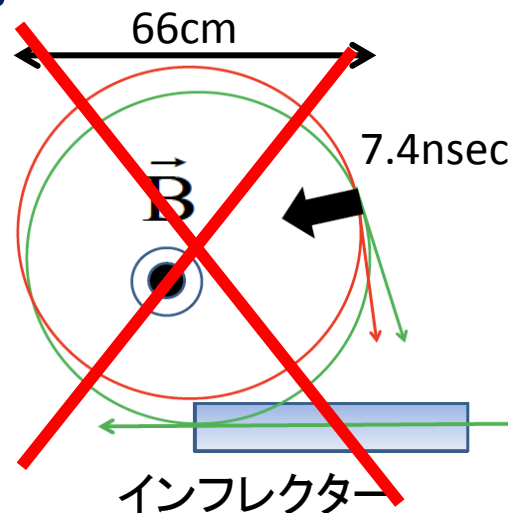
- (a) ビーム蓄積
- (b) ビーム広がりを抑える

水平キックがダメなら、  
垂直キック！

コンパクト強磁場

- 1ターン以内のホライズン ( $< 60 \text{ mrad}$ )
- 3[T] 磁石のFRINGEフィールドをキャンセル

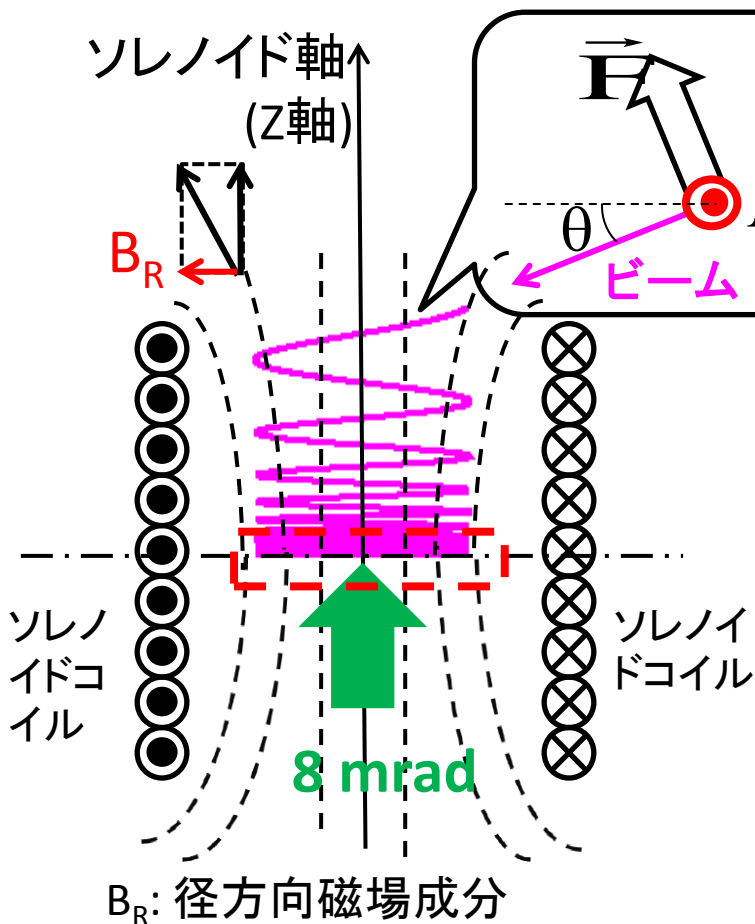
難しい:





# 入射・蓄積部一体型磁石の概念説明

## ソレノイド磁石1個



磁場中の運動:

- ◆ 運動量絶対値  $p$  は一定
- ◆ ビーム入射角度  $\theta$  とFRINGE部の磁場  $B_R$  の関係は一意

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

利点:

- 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で外乱要因を除き、蓄積部の誤差磁場を小さくする。

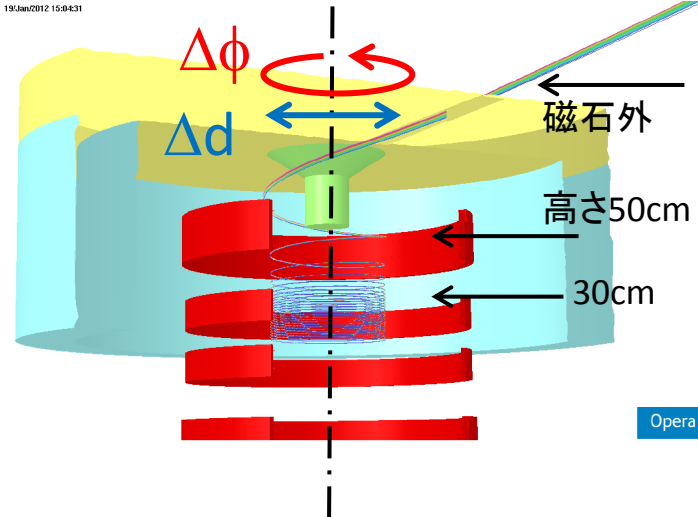
難しい点

- FRINGE磁場中を通すために、ビーム運動を水平垂直で強く結合(X-Yカップリング)させる必要がある。

# どんなビームを準備すればよいか？

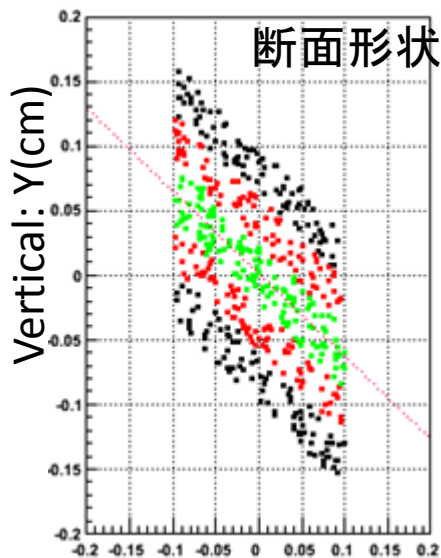
ソレノイド磁場 → 軸対称な磁場 → 軸対称な軌跡群  
 → 水平垂直結合: X-Yカップリング

- ◆ 軸のまわり  $\Delta\phi \sim \pm 10^\circ$  入射可能
- ◆ 回転中心が  $\pm 1\text{mm}$  程度ずれても入射可能

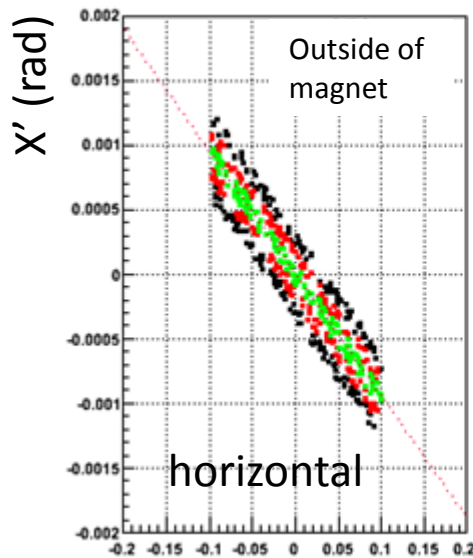


磁石外でのビーム初期パラメタ

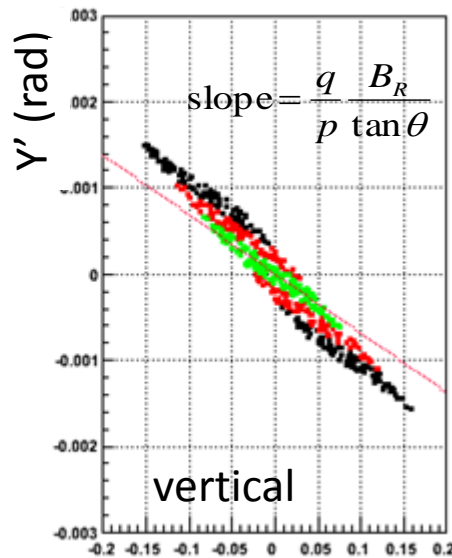
X-Yカップリングを考慮し1ミリ四方の断面に500サンプルを入射した例。  
 (アクセプタンスの上限を現在見積り中。)



Horizontal: X(cm)



X(cm)



Y(cm)

$$\text{slope} = \frac{q}{p} \frac{B_R}{\tan \theta}$$

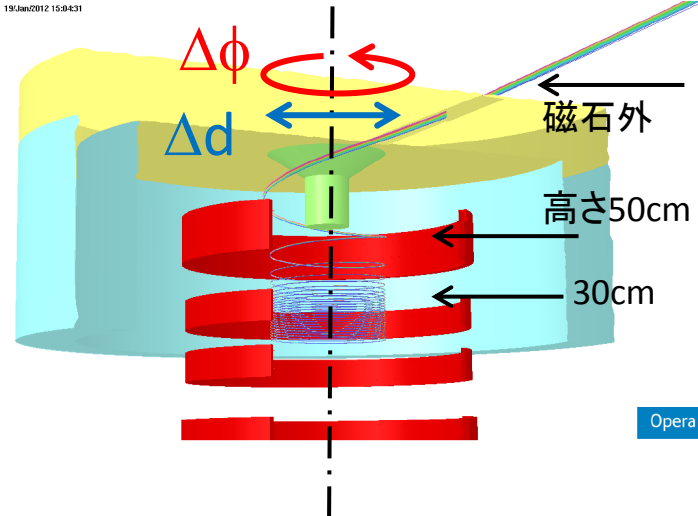




# どんなビームを準備すればよいか？

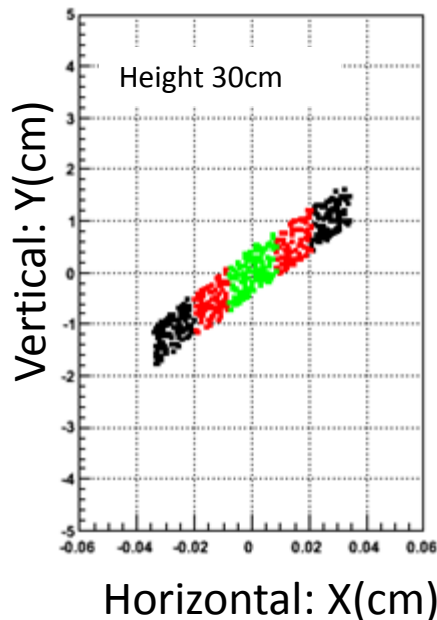
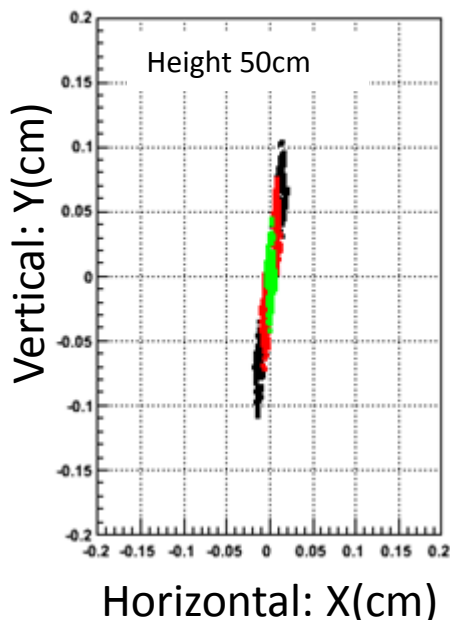
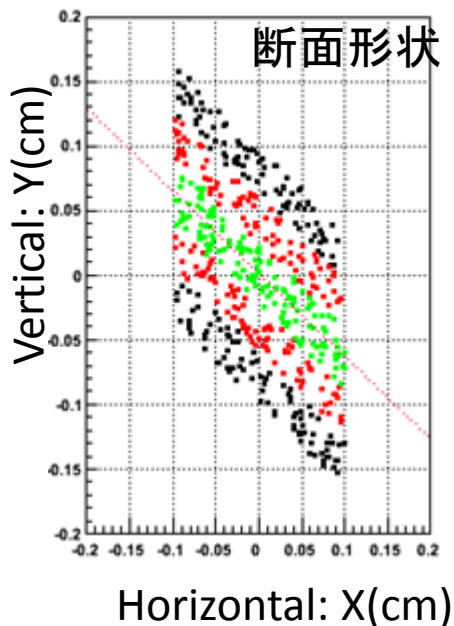
ソレノイド磁場 → 軸対称な磁場 → 軸対称な軌跡群  
→ 水平垂直結合: X-Yカップリング

- ◆ 軸のまわり $\Delta\phi \sim \pm 10^\circ$  入射可能
- ◆ 回転中心が $\pm 1\text{mm}$ 程度ずれても入射可能



磁石外でのビーム初期パラメタ

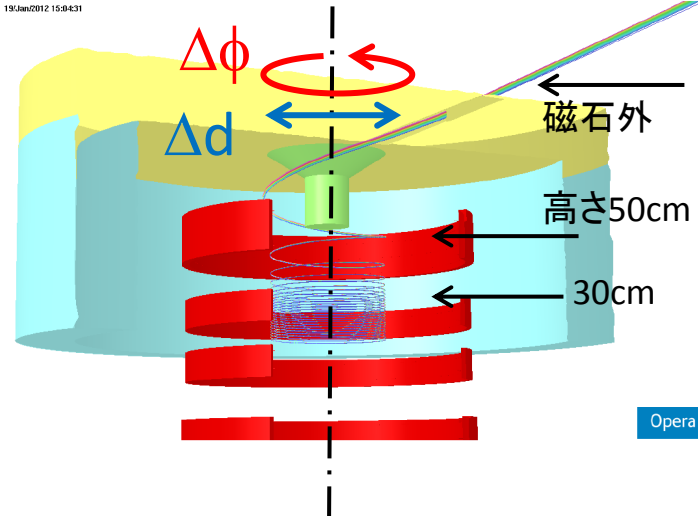
X-Yカップリングを考慮し1ミリ四方の断面に500サンプルを入射した例。  
(アクセプタンスの上限を現在見積り中。)



# どんなビームを準備すればよいか？

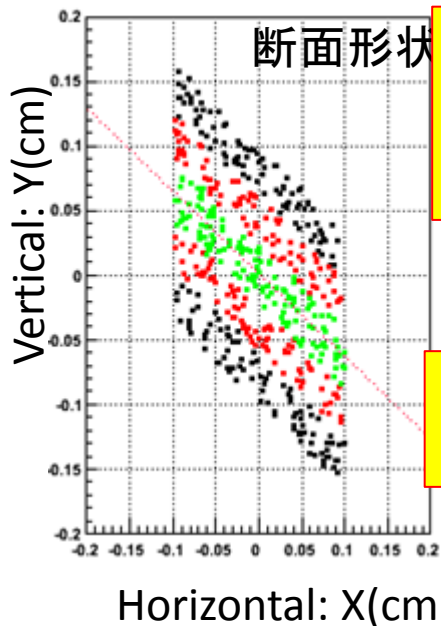
ソレノイド磁場 → 軸対称な磁場 → 軸対称な軌跡群  
 → 水平垂直結合: X-Yカップリング

- ◆ 軸のまわり $\Delta\phi \sim \pm 10^\circ$  入射可能
- ◆ 回転中心が $\pm 1\text{mm}$ 程度ずれても入射可能



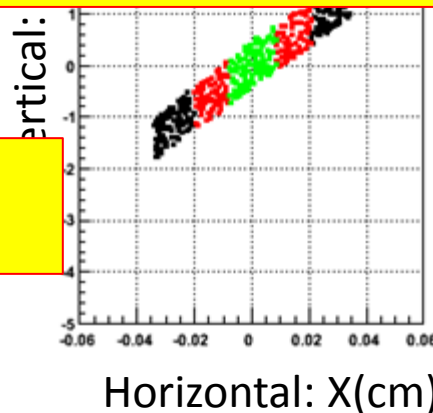
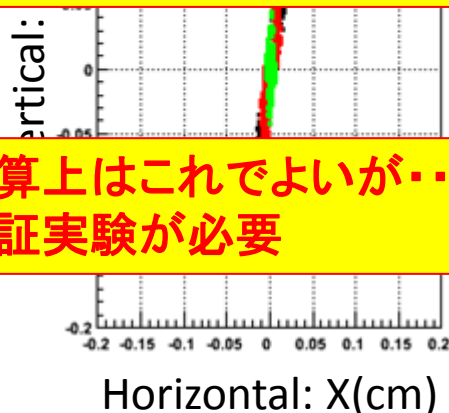
磁石外でのビーム初期パラメタ

X-Yカップリングを考慮し1ミリ四方の断面に500サンプルを入射した例。  
 (アクセプタンスの上限を現在見積り中。)



FRINGE磁場に合うようにXYカップリングの調整をしたビームを入射すれば高い入射効率を期待できる。

計算上はこれでよいが...  
 実証実験が必要





# 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
- 鉄ヨーク外半径 2m

LINAC

$\mu^+$ ビーム

天板(純鉄)

トンネル

ポールチップ  
(純鉄)

円筒型  
リターン  
(純鉄)

超電導主  
コイル

Opera

1/4モデル(OPERA)

# 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(純鉄)

円筒型リターン(純鉄)

超電導主コイル

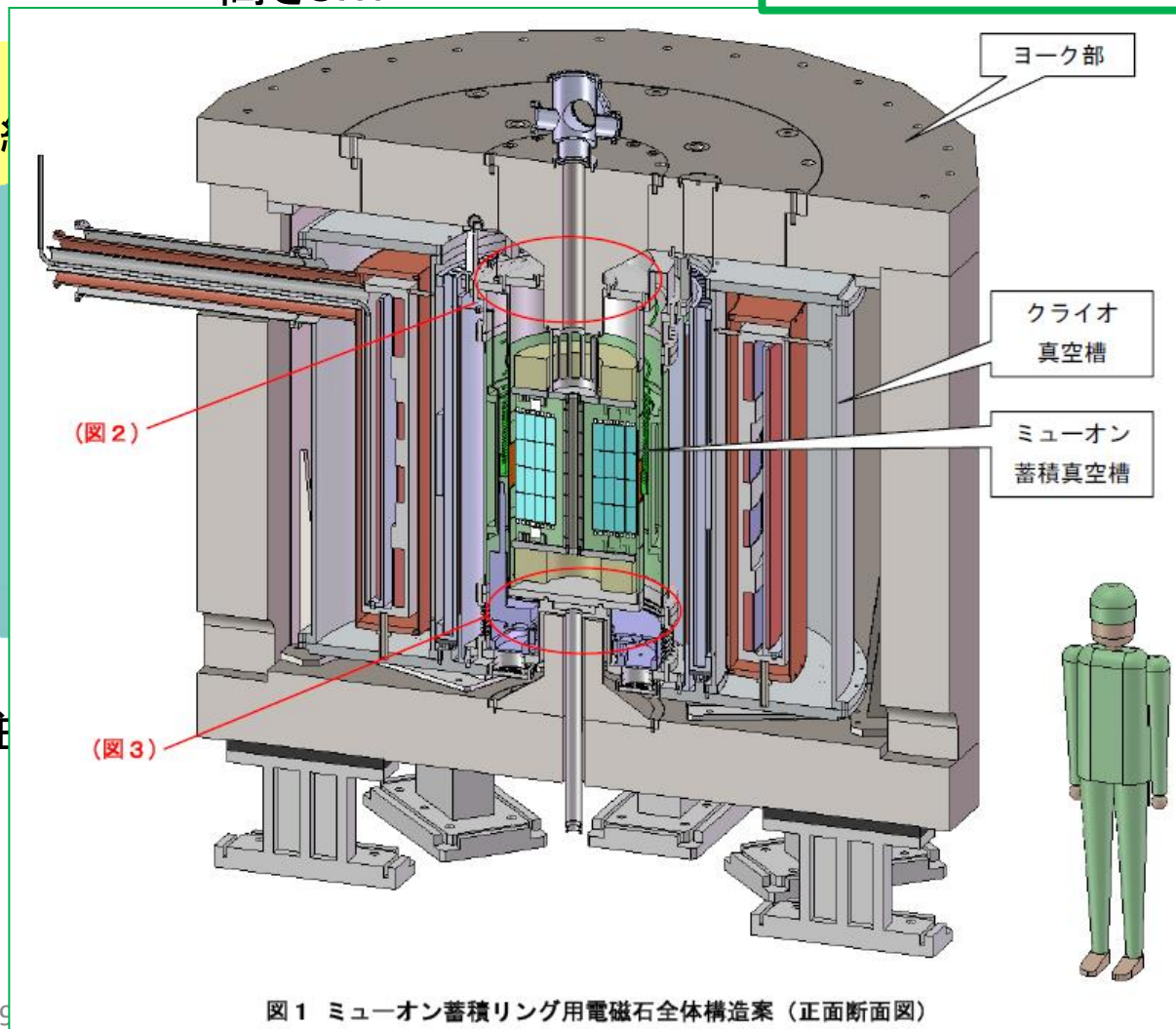


図1 ミューオン蓄積リング用電磁石全体構造案(正面断面図)

# 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

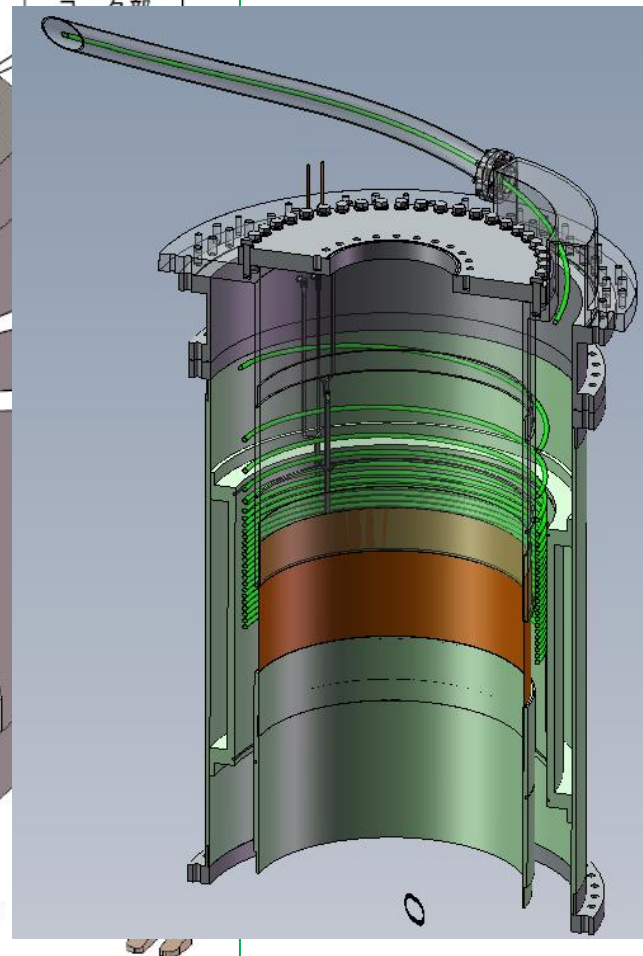
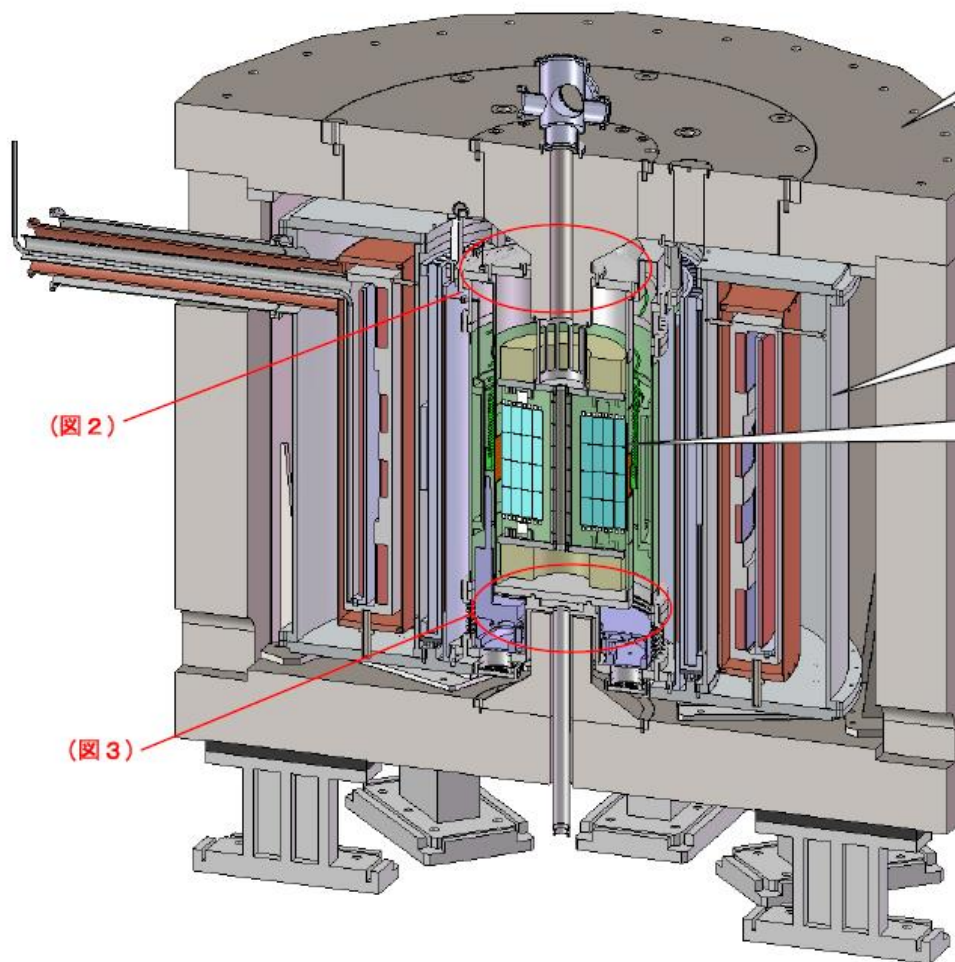
- ✓KEK低温センター
- ✓日立研究所と共同研究

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



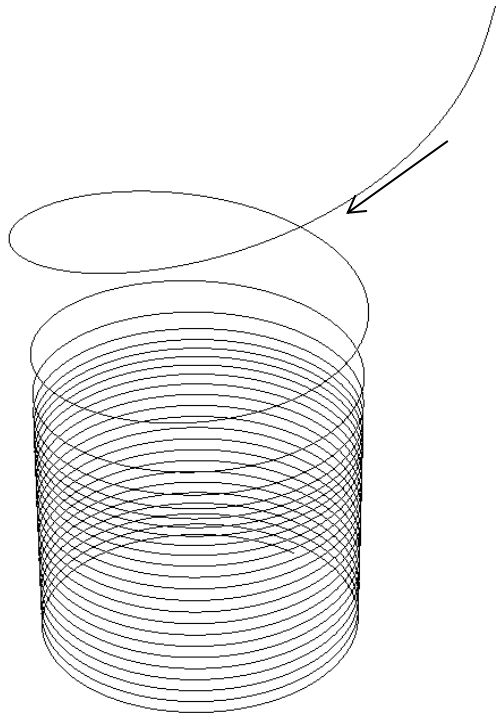
2013/9/19

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)



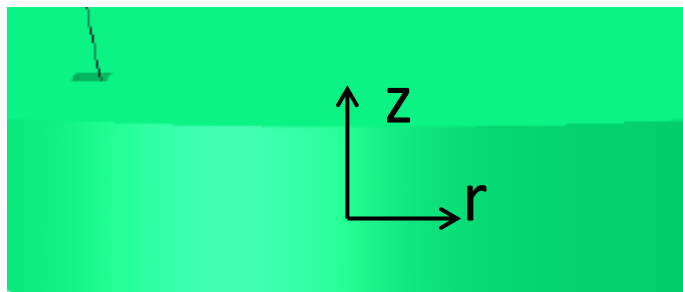
# 磁石の大きさ、磁場の強さは医療用MRI磁石程度

放射線医学総合研究所  
3テスラソレノイド型MRI磁石



磁場測定システム開発のため、共同研究中

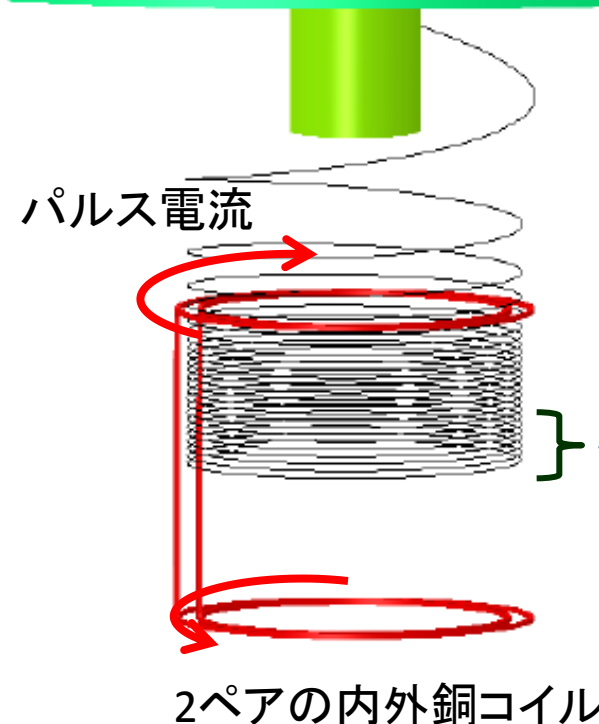
# キッカー装置：軸対称径方向パルス磁場 $B_{kick}$



✓ソレノイド軸方向の動き 8mrad を垂直キックする

✓  $\omega = \pi / T_{kick}$  →  **$T_{kick}/2 = 200 \text{ nsec}$**

$$p_z(t) = \frac{p_{z0}}{2} [1 + \cos\{\omega \times (t - t_0)\}] \Rightarrow 0$$



$$B_{kick}(r, z, t) = B_{kick}(r, z) \times \sin(\omega t)$$

$$B_{kick}(r, z) \sim \mathbf{1.5 \text{ Gauss}}$$

- 径方向33cm  $\pm$  5mm 範囲で**1%程度の均一度**
- ソレノイド軸方向(高さ)  $\pm$  10cm 程度

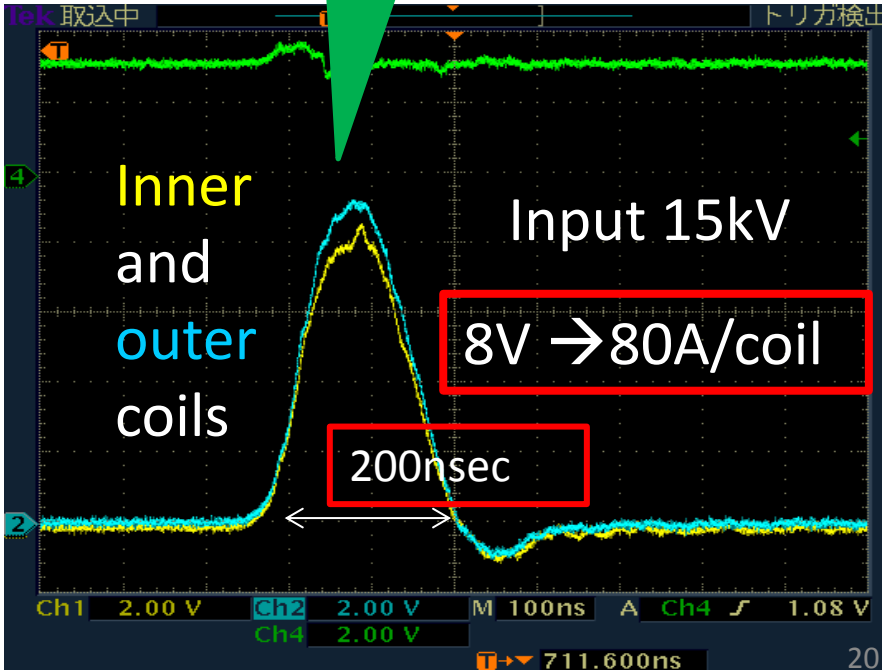
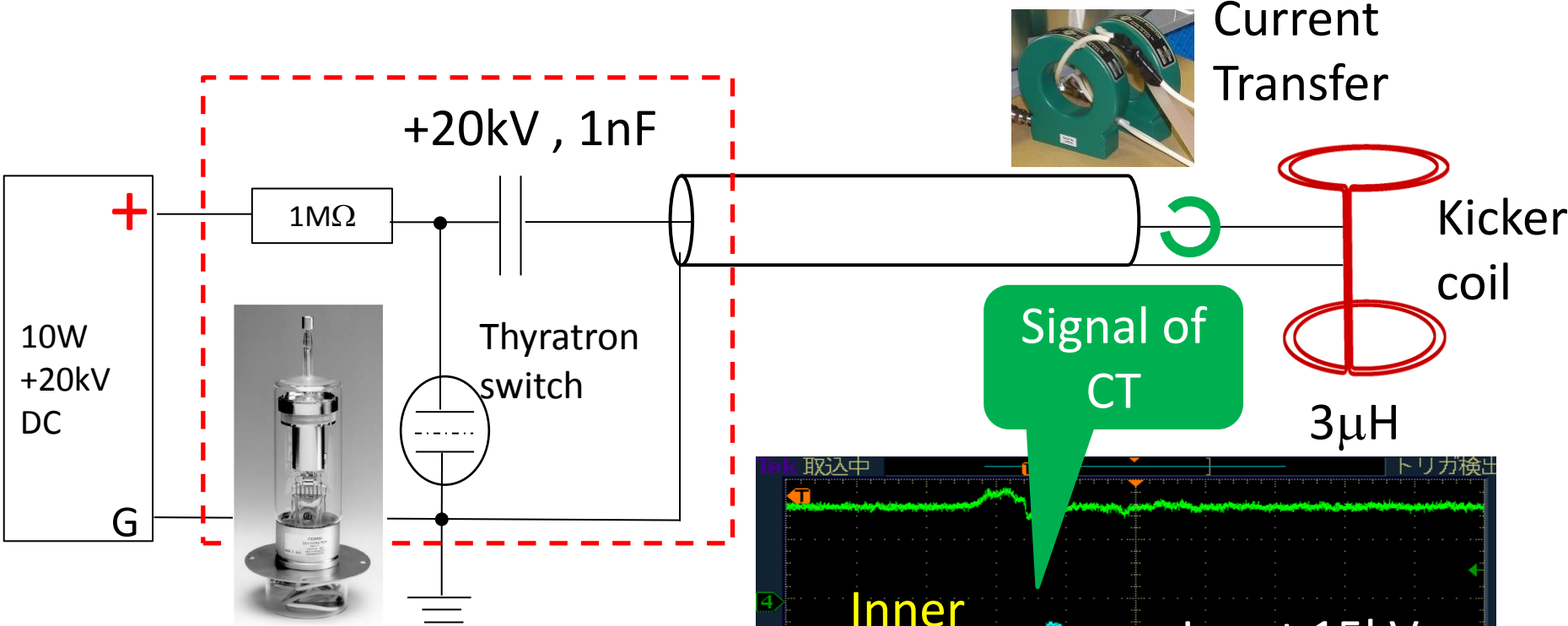
$$I(t) = I_{peak} \times \mathbf{\sin(\omega t)}$$

$$T_{kick}/2 = \mathbf{200 \text{ nsec}}$$

$$I_{peak} \sim \mathbf{100 \text{ A/coil}}$$

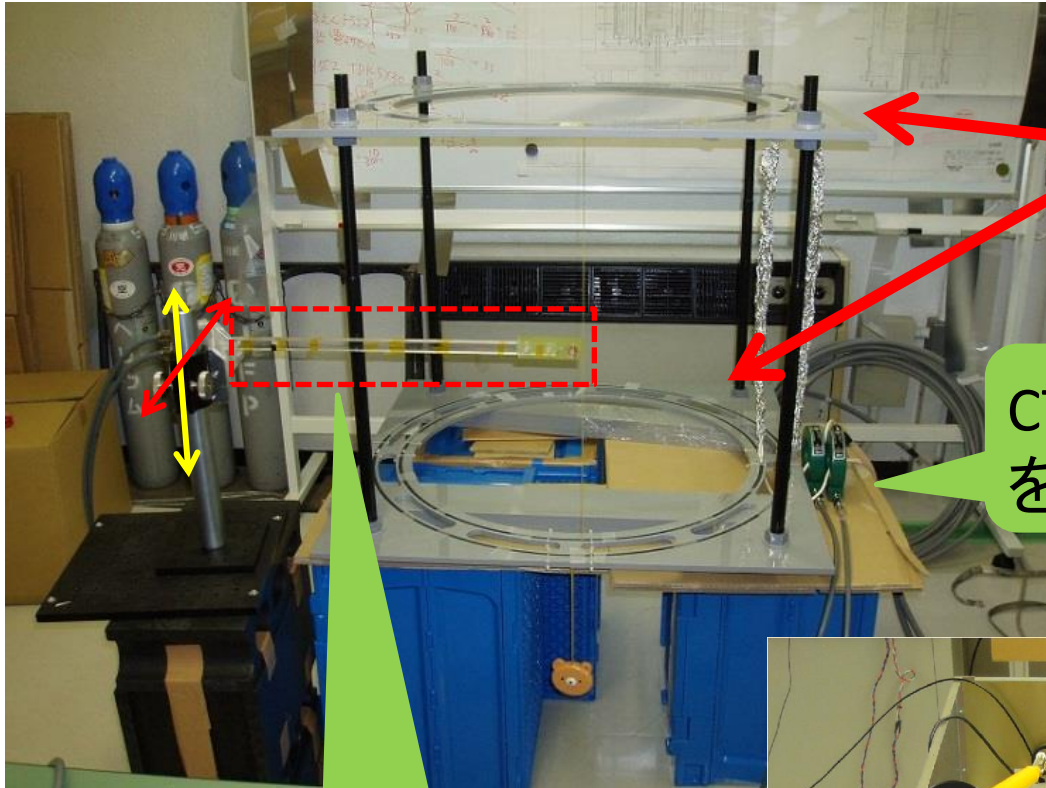
**高電流パルス電源が必要**

# パルス高電流電源の開発





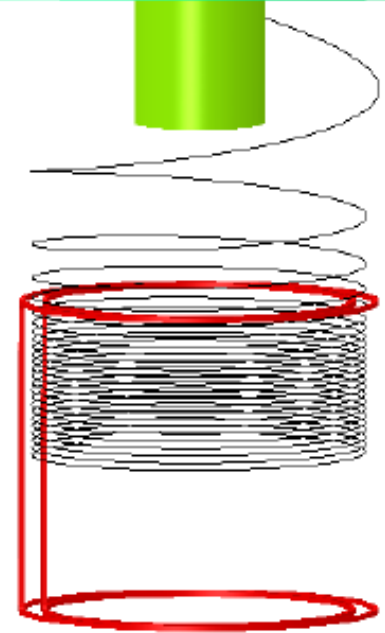
# キッカーテストベンチ



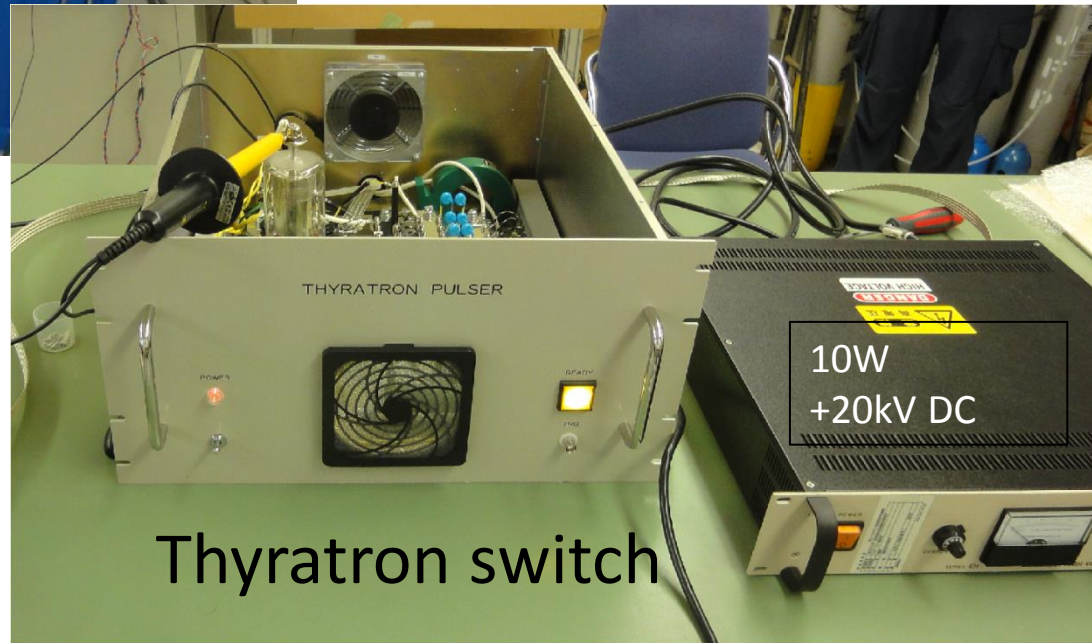
コイル

CTで電流  
を測定

Pick-up coil  
で磁場測定

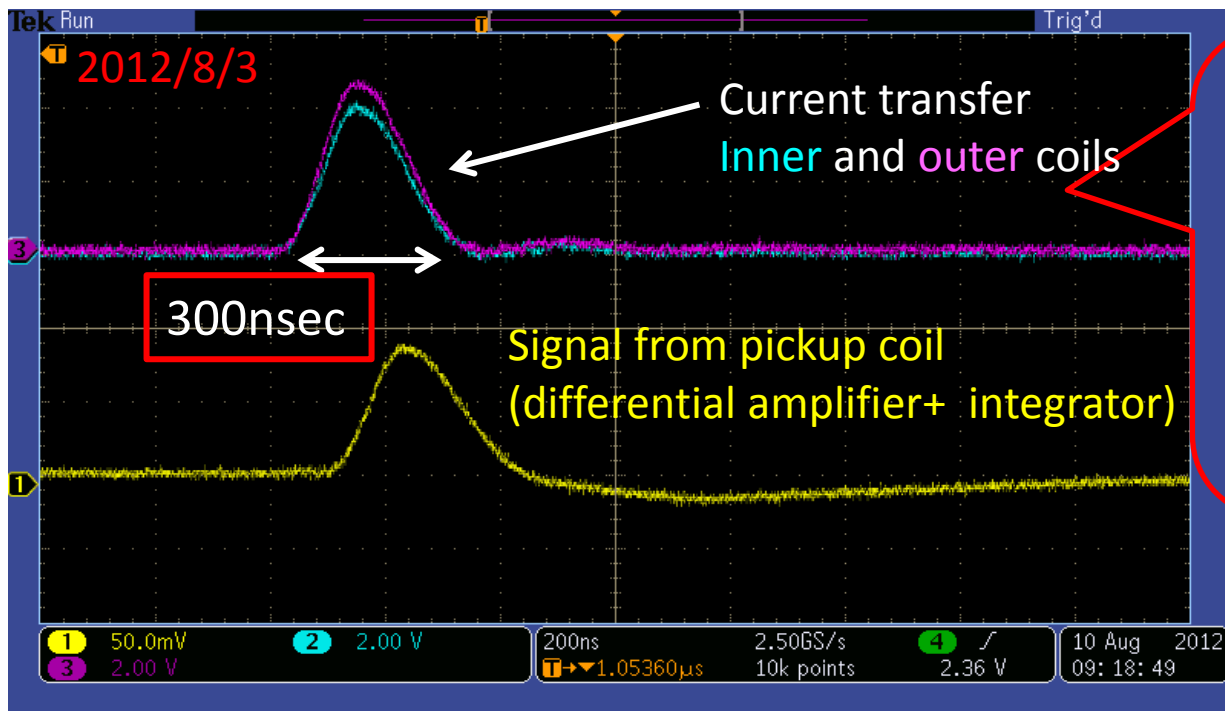


科研費 若手B

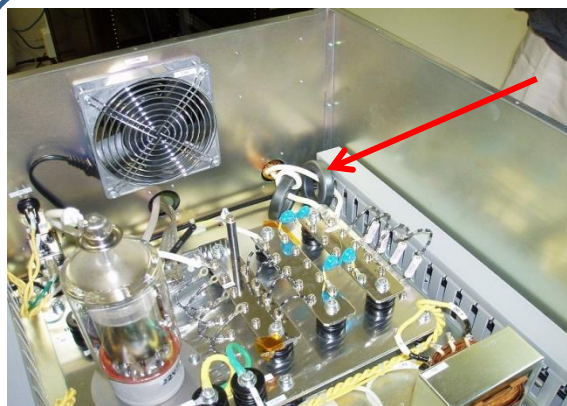
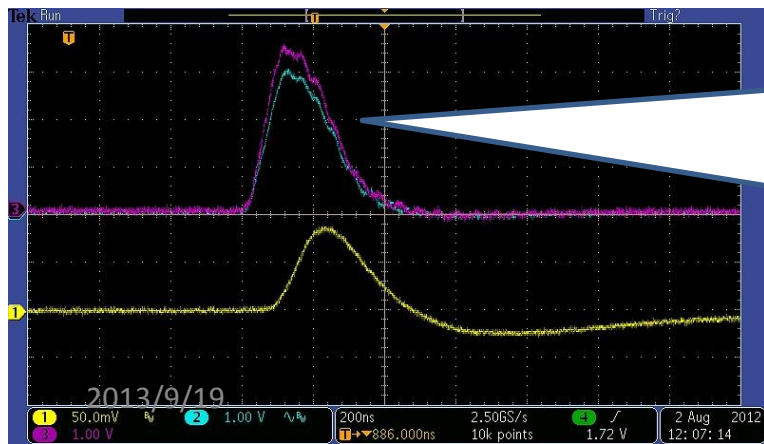


Thyratron switch

# 生信号 $B_{\text{kick}}(t)$



- 電流  $I(t)$  の時間構造は **ハーフサイン** になっている。(300nsec  $\rightarrow$  200nsec にしたい: コイルインダクタンスで調整を試みる)
- 磁場の空間分布は?



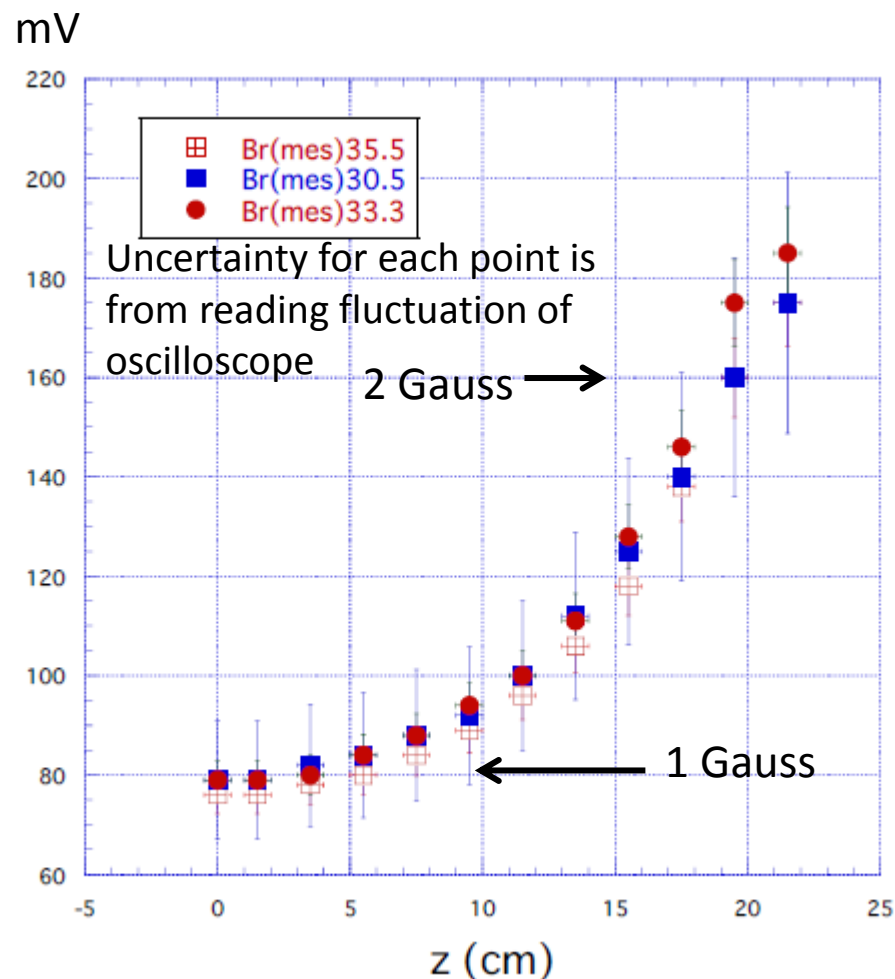
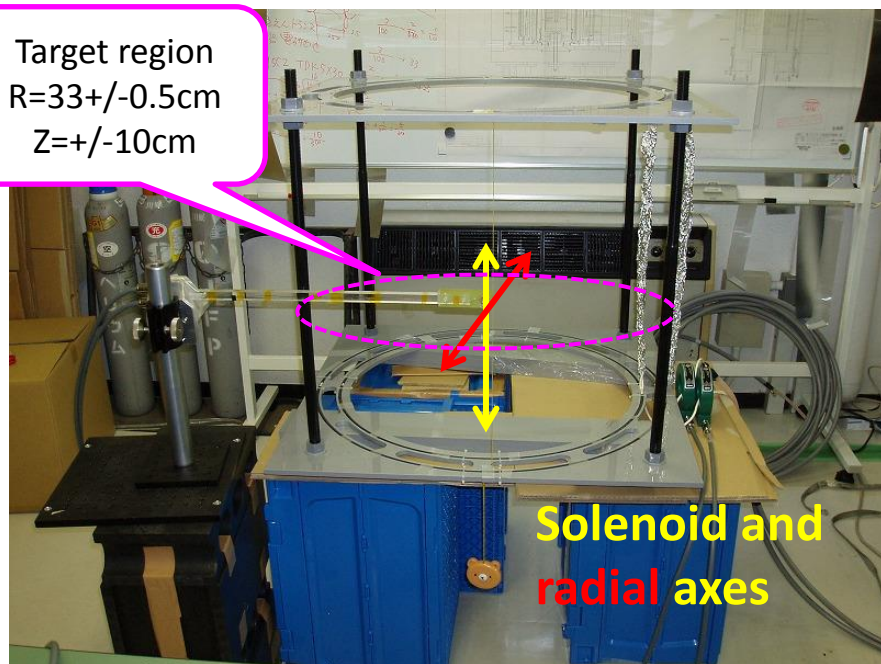
フェライトコアを  
高電流ラインに  
まきつけて EMC  
ノイズを軽減

# 磁場の空間分布測定 $B_{\text{kick}}(z,r)$

磁場の仕様 ;

- 1.5ガウス程度
- 径方向  $33\text{cm} \pm 5\text{mm}$  で均一度1%  
(ソレノイド軸に沿って  $\pm 10\text{cm}$ )

Target region  
 $R=33\pm 0.5\text{cm}$   
 $Z=\pm 10\text{cm}$



- ピックアップコイル付きプローブはソレノイド軸に沿った $z$ 方向、と径方向に移動できる、
- 写真からの明らかなように、1% 均一度を評価するには厳しいセットアップだが、 $30.5 < R < 35.5\text{cm}$  along  $0 < z < 10\text{cm}$ の領域で均一度 5%を確認している。

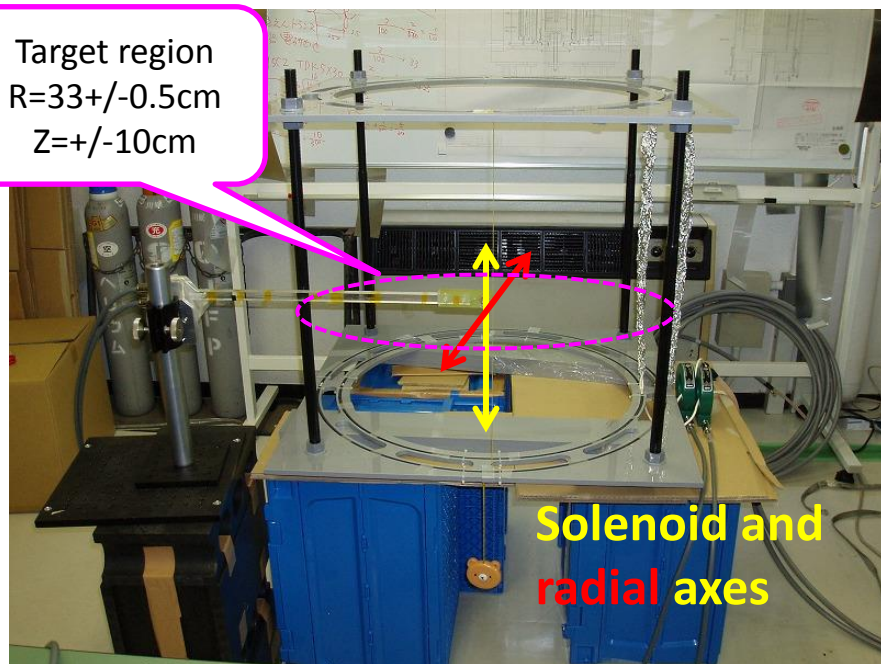


# 磁場の空間分布測定 $B_{\text{kick}}(z,r)$

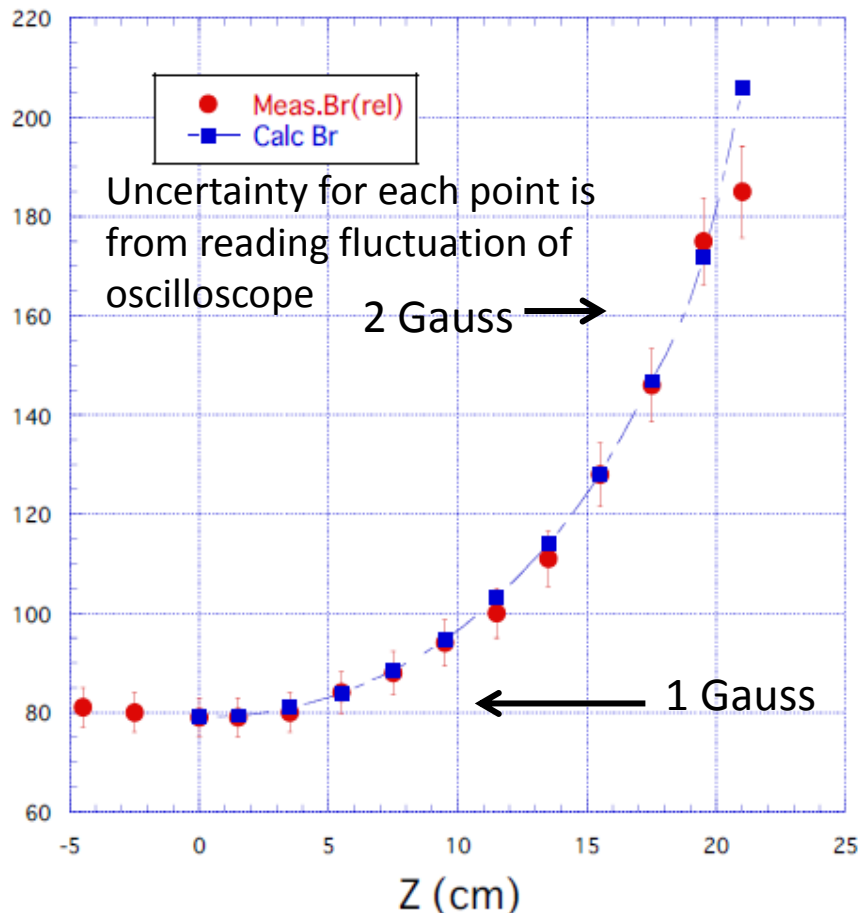
磁場の仕様 ;

- 1.5ガウス程度
- 径方向  $33\text{cm} \pm 5\text{mm}$  で均一度1%  
(ソレノイド軸に沿って  $\pm 10\text{cm}$ )

Target region  
 $R=33\pm 0.5\text{cm}$   
 $Z=\pm 10\text{cm}$



mV



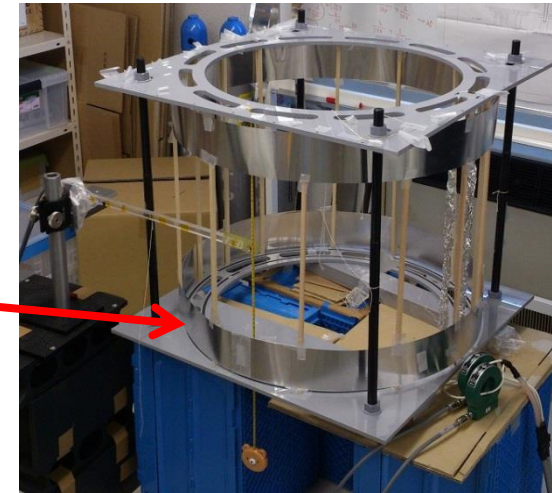
- ピックアップコイル付きプローブはソレノイド軸に沿ったZ方向、と径方向に移動できる、
- 写真からの明らかなように、1% 均一度を評価するには厳しいセットアップだが、 $30.5 < R < 35.5\text{cm}$  along  $0 < z < 10\text{cm}$  の領域で均一度 5%を確認している。

# キッカーテストベンチの今後

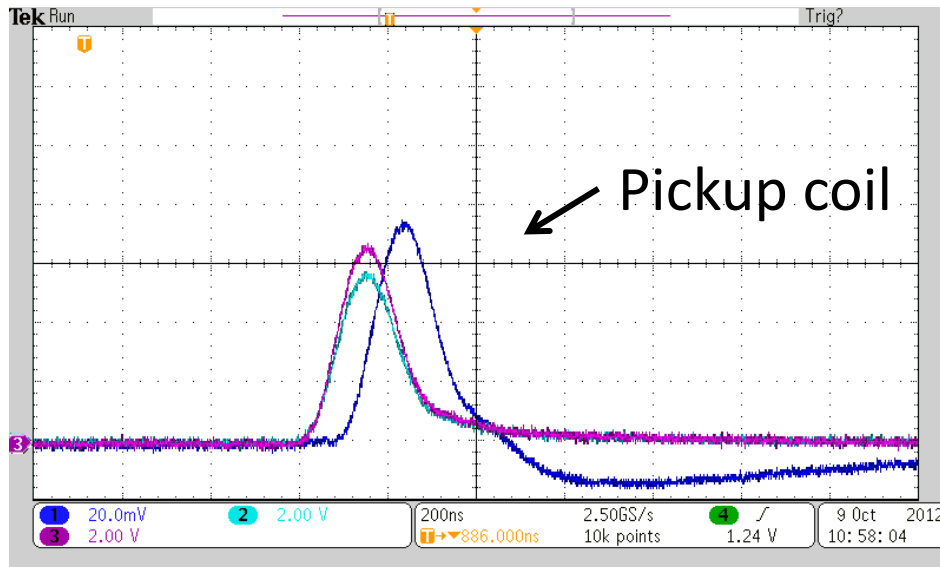
## ◆ パルス幅300nsecを200nsecにできないか？

- ピーク電流を上げる方法がシンプルだが、EMCノイズが増えるし、電源負担が大きいのでダメ。
- コイルインダクタンスを小さくするために、右図のようにアルミ板を取り付けてみた。
  - パルス幅は細くならなかったが、中心付近の磁場強度が上がった

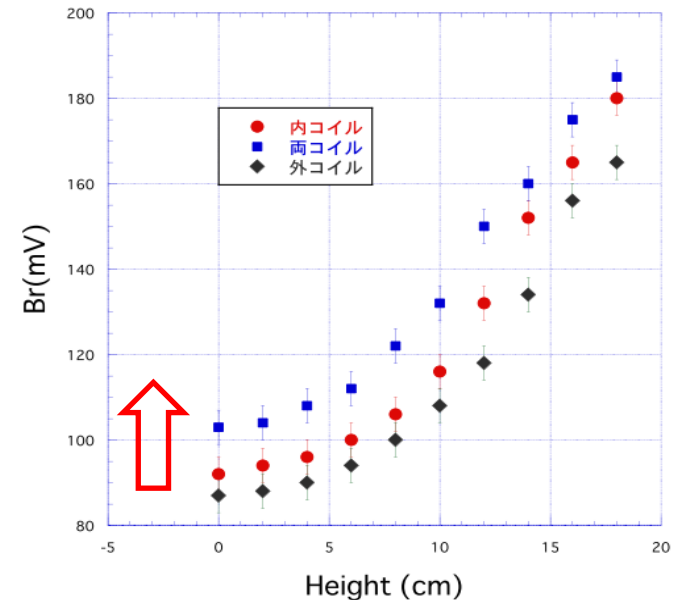
example



## ◆ ビームの広がりを考慮した、キッカー磁場の時間空間分布仕様を決める



10cmアルミの効果

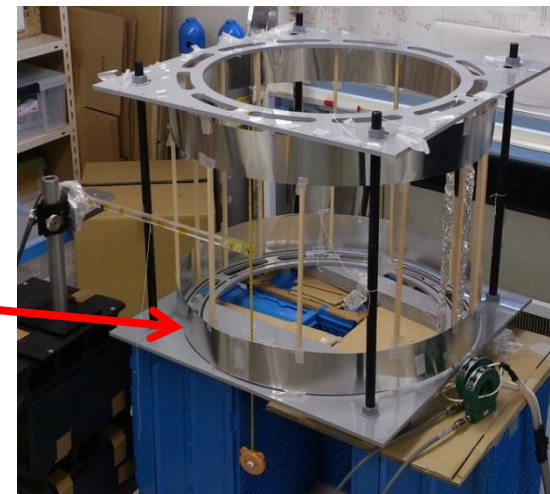


# キッカーテストベンチの今後

## ◆ パルス幅300nsecを200nsecにできないか？

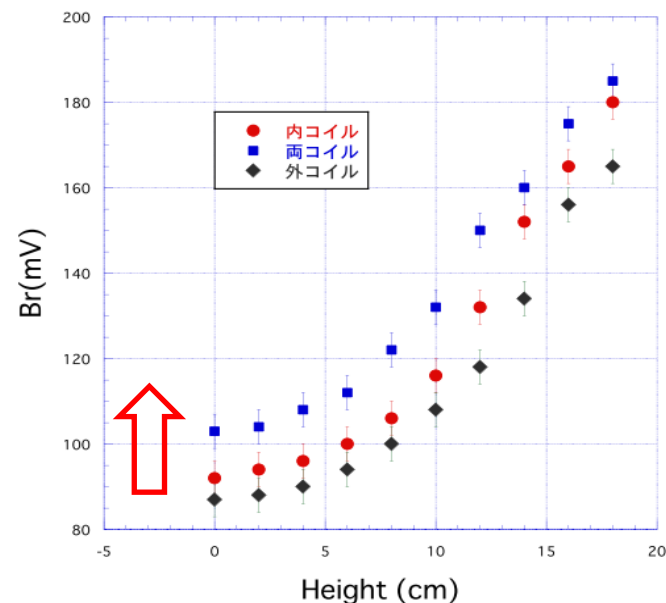
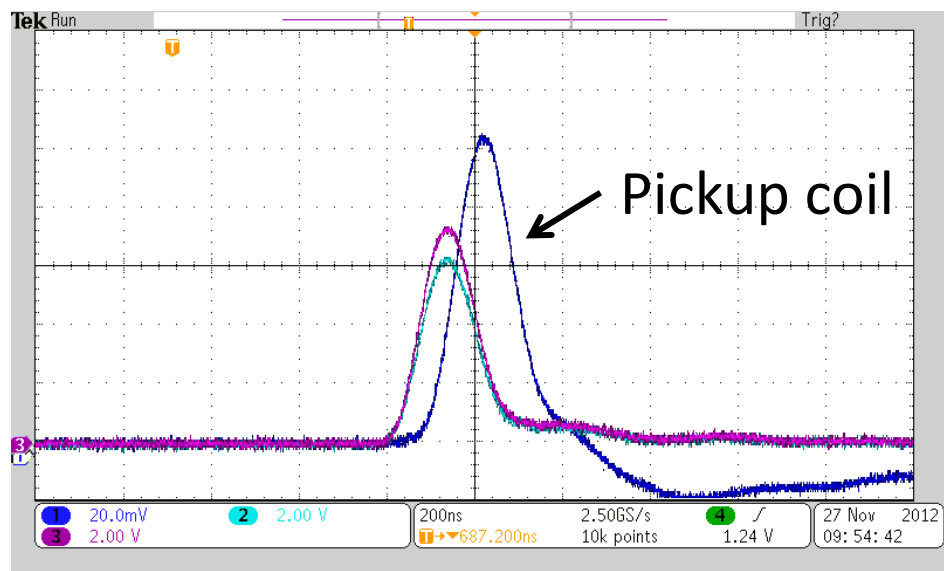
- ピーク電流を上げる方法がシンプルだが、EMCノイズが増えるし、電源負担が大きいのでダメ。
- コイルインダクタンスを小さくするために、右図のようにアルミ板を取り付けてみた。
  - パルス幅は細くならなかったが、中心付近の磁場強度が上がった

example



10 cmアルミの効果

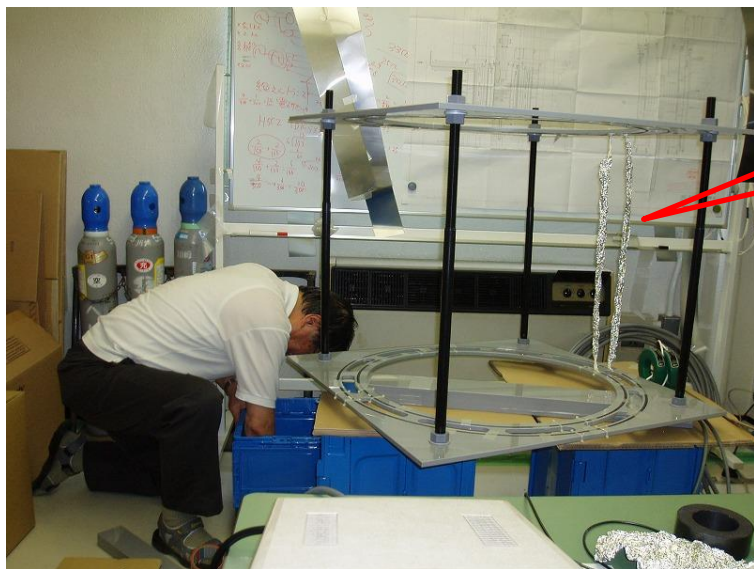
## ◆ ビームの広がりを考慮した、キッカー磁場の時間空間分布仕様を決める





# 実作業は中山さんが主に行いました

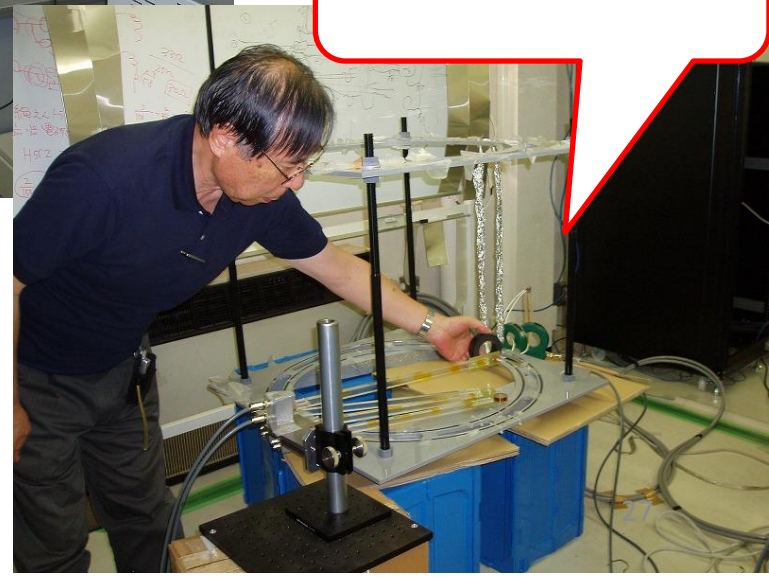
キッカーコイル組立



ピックアップ  
コイル試作



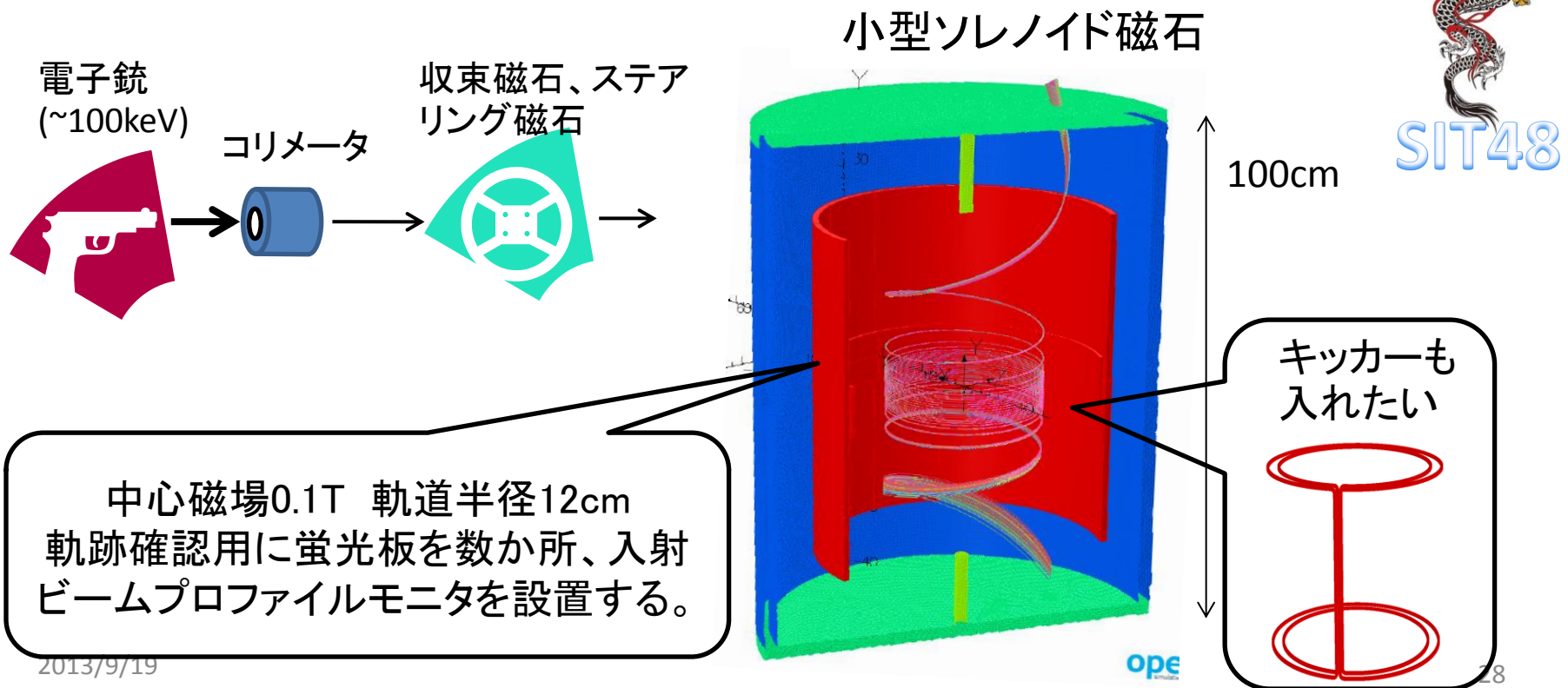
磁場測定





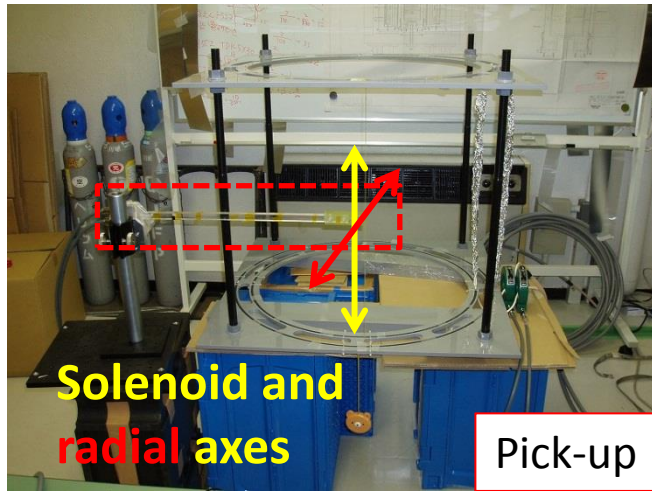
# まとめと今後

- ✓ 3次元らせん軌道入射の概念設計を行った。
- ✓ キッカーテストベンチを構築し、磁場測定を行い、空間時間分布を確認した。
- ビームの広がりを考慮した、キッカー磁場の時間空間分布仕様を決める。
- 入射実証試験を行うため、電子銃を用いてスケールダウンしたテストベンチを構築し、キッカー装置を組み込む。
- コラボレーター募集中！

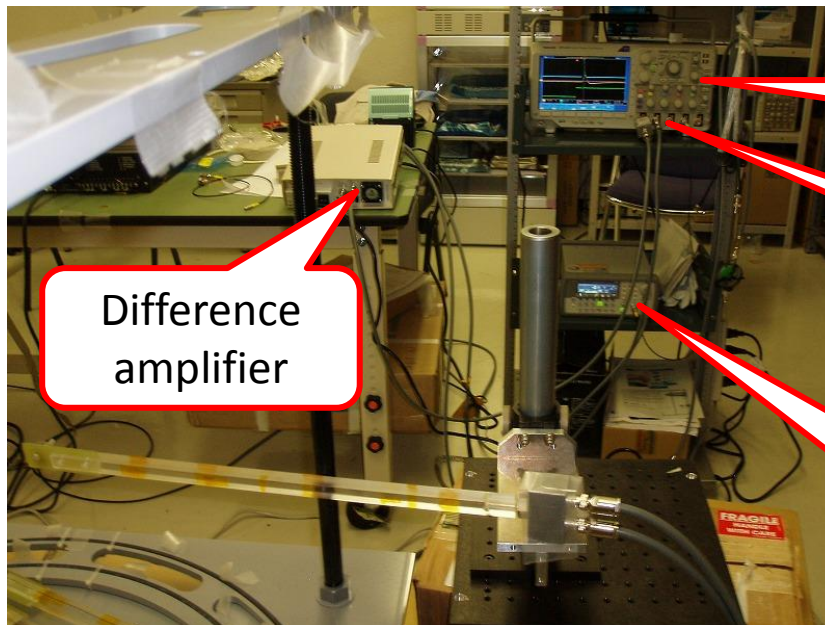
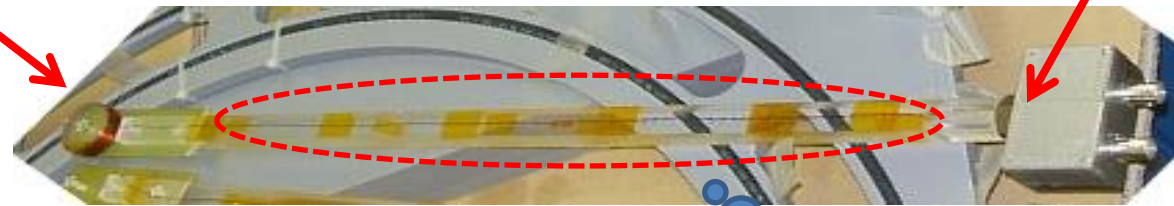


# backup

# パルス磁場測定セットアップ



1. Pickup coil (we try several types)
  - Area  $R=5, 10$  and  $15\text{mm}$
  - $30\sim 100$  turns
2. Find better parameter of analog integrator (R-C)
3. Noise reduction
  - Dumping resistance
  - difference amplifier



oscilloscope

R-C  
integrator

Trigger  
(Function  
generator)

- Arm picks up background EMC noise.
- Therefore, we use difference amplifier.