

# J-PARCMRアップグレードのための 速い取り出し用新高磁場セプタム電磁石

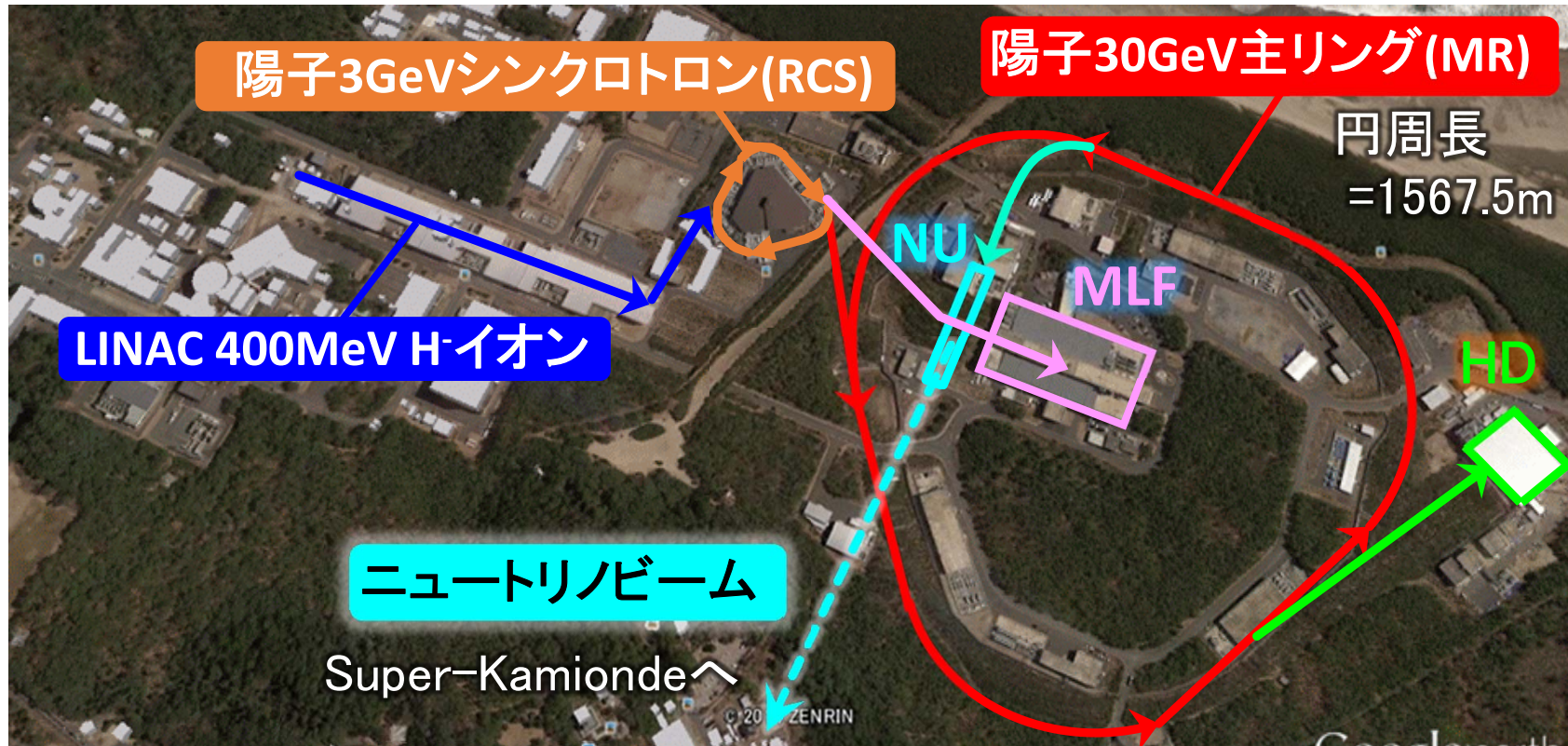
**芝田達伸(KEK)**

石井恒次、松本教之、杉本拓也、松本浩、Fan Kuanjun  
KEK、HUST

2019年8月1日(木)

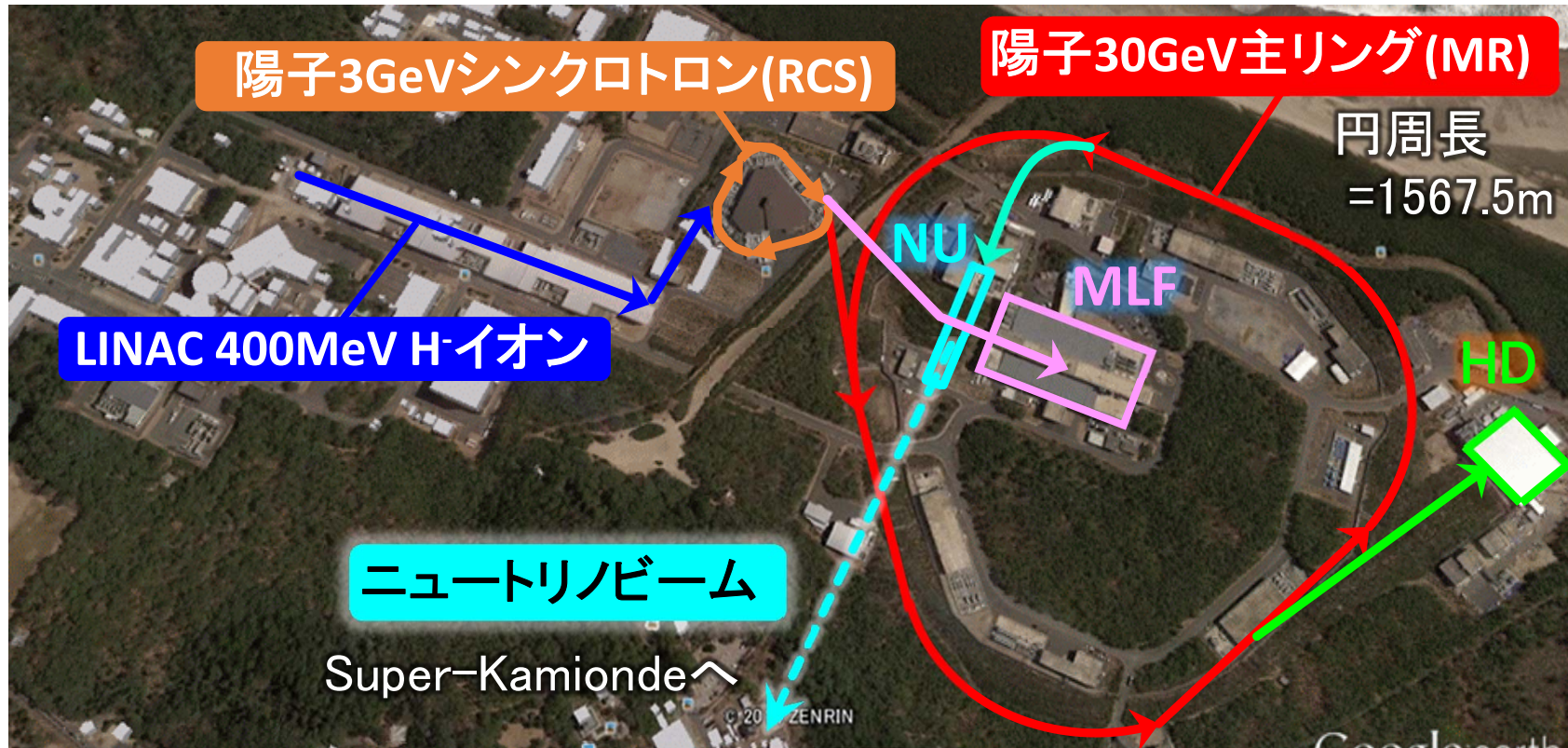
電磁石と電源② THOH05

# J-PARC = Japan-Proton Accelerator Research Complex 2



MR内のバンチを1周分( $\sim 5 \mu$ 秒)の間にNUに送る  
= 速い取り出し

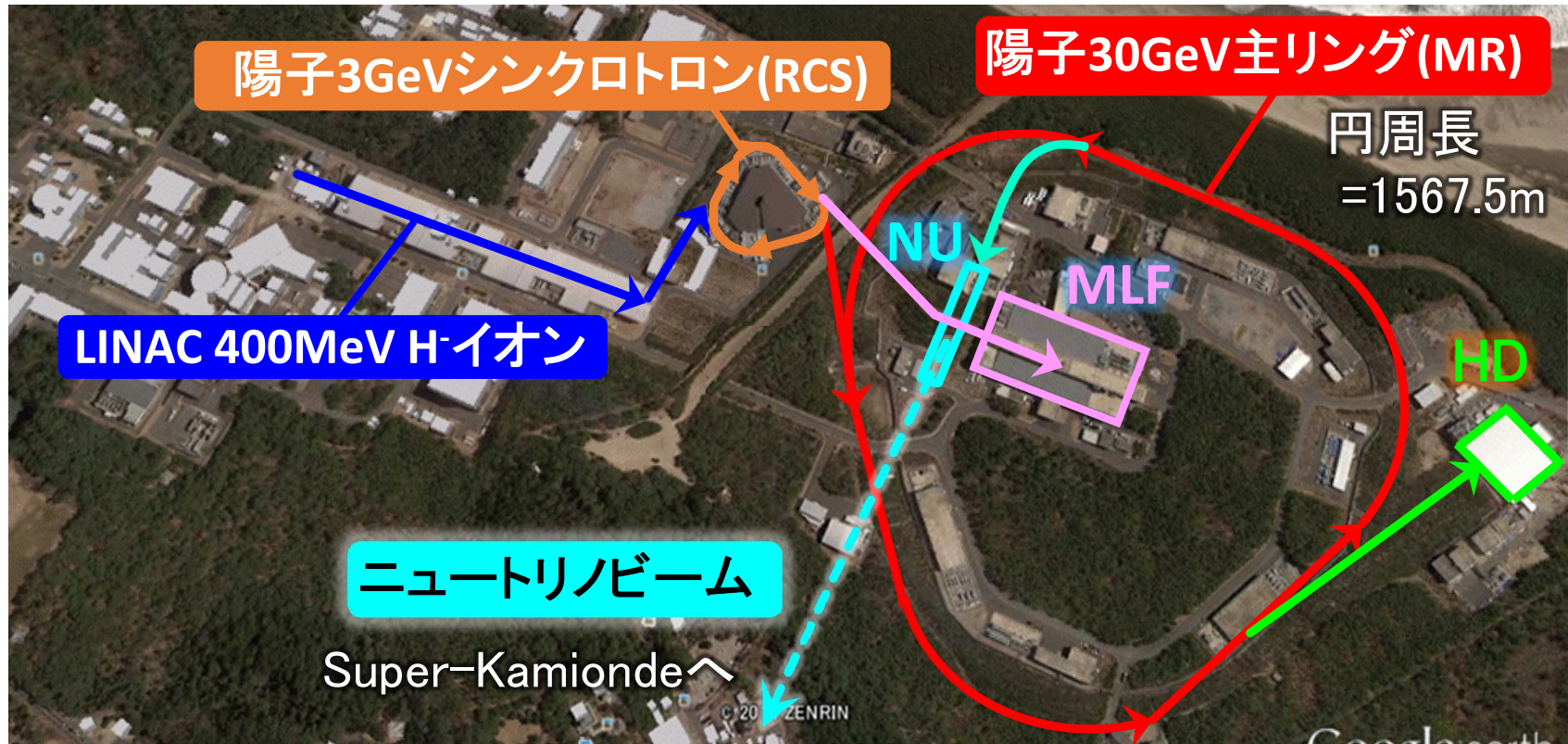
# J-PARC = Japan-Proton Accelerator Research Complex 3



NUへの供給パワー 最高 約500kW → >700kWに増強

MRの高繰り返し化が必要 周期2.48秒 → 1.3秒

# J-PARC = Japan-Proton Accelerator Research Complex



> 700kW → 1.3MW (周期1.16秒)

# MR用出射電磁石



## NU用出射電磁石

>700kWのためにアップグレード中 2021年完了目標

# アップグレード中のNU用出射電磁石

ニュートリノ/アポートラインへ取り出す

キッカー電磁石  
曲げ角(計)6.1 mrad

低磁場セプタム電磁石  
曲げ角(計)8.7 mrad

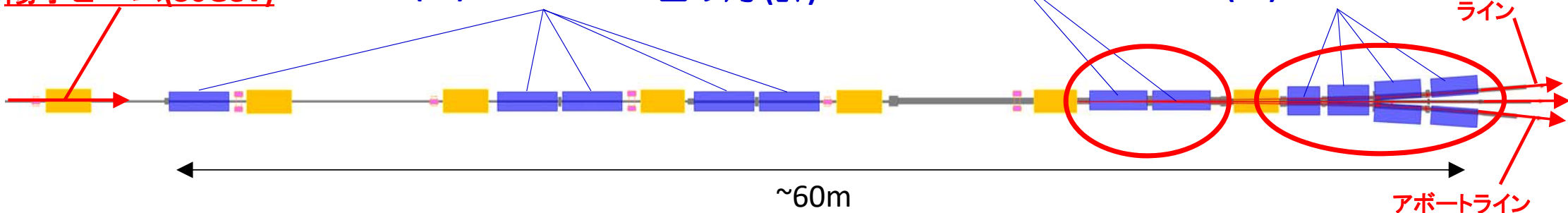
高磁場セプタム電磁石  
曲げ角(計) 63.6mrad

陽子ビーム(30GeV)

ニュートリノ  
ライン

アポートライン

~60m



キッカー電磁石



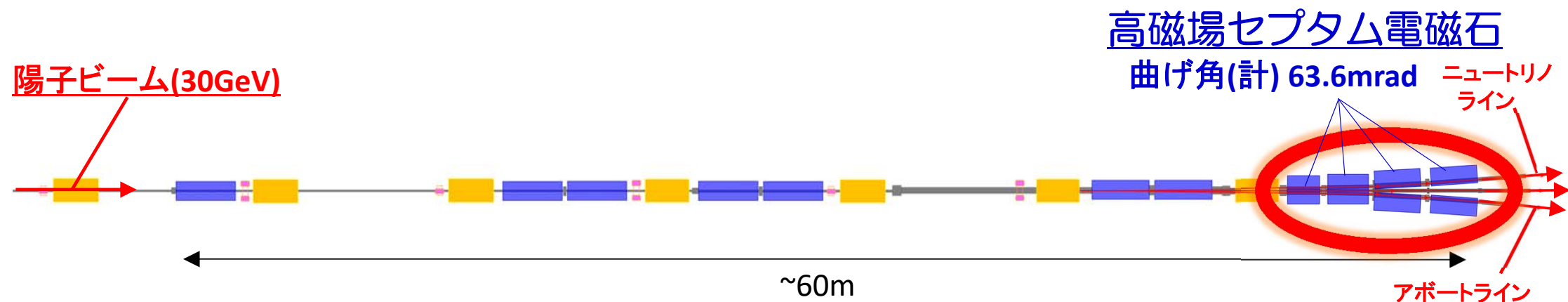
低磁場セプタム



高磁場セプタム

# アップグレード中のNU用出射電磁石

7



今回の報告  
= 高磁場セプタム



# 今回の報告内容

**3台の新高磁場セプタム電磁石を製作**

**その内の1台の性能評価**

**1.3秒、1.16秒高繰り返し試験**

**磁場測定**

**取り出しライン上の磁極内磁場**

**周回ライン上の漏れ磁場**



# 高磁場セプタム電磁石(現行機)

9

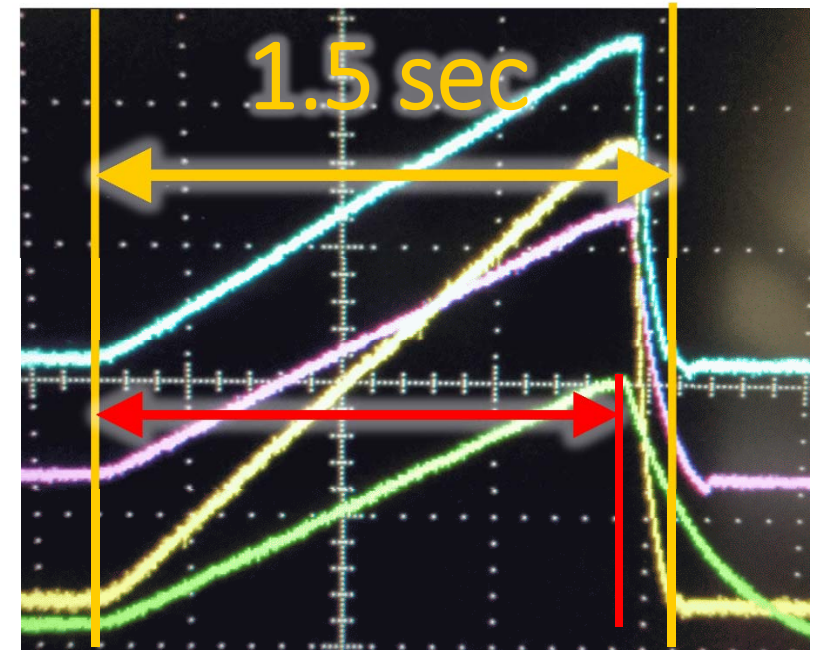
## 4台の常伝導電磁石

#1 #2 #3 #4



電流型セプタム電磁石  
発生磁場  $\sim 1$  Tesla  
出力電流 = パターン制御

## 出力電流波形



立上時間=1.4秒  
FT電流値  
= 2000~3000A

## 課題と対策

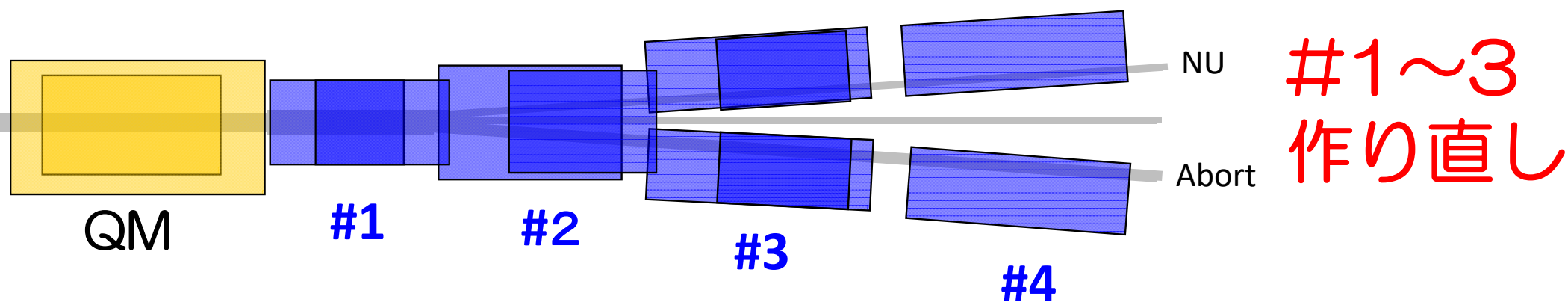
高繰り返しによるビームダクト表面の渦電流発熱

ダクト素材を現在のSUSからセラミックスに変更

大強度に伴うビームハローのビームロスが深刻化

ビームダクトの大口径化と低放射性化素材の使用

上流部QMの大型化に伴うセプタム電磁石の全長変更



# 新高磁場セプトラム電磁石

## 2015年製作

新#1



両極性型

新#2



両極性型

新#3



片極性2対で1台

2018年秋 新#1の試験運転と性能評価

# 新高磁場セプタム電磁石 #1 の試験運転

12

## 電磁石の仕様

両極性磁場 1つの磁極で互いに逆の2つの磁場

最大磁場 0.99 Tesla ( 3850A )

N/A側取り出しビームダクト セラミックス製

周回ビームダクト 純チタン製

低放射化, 低ガス放出

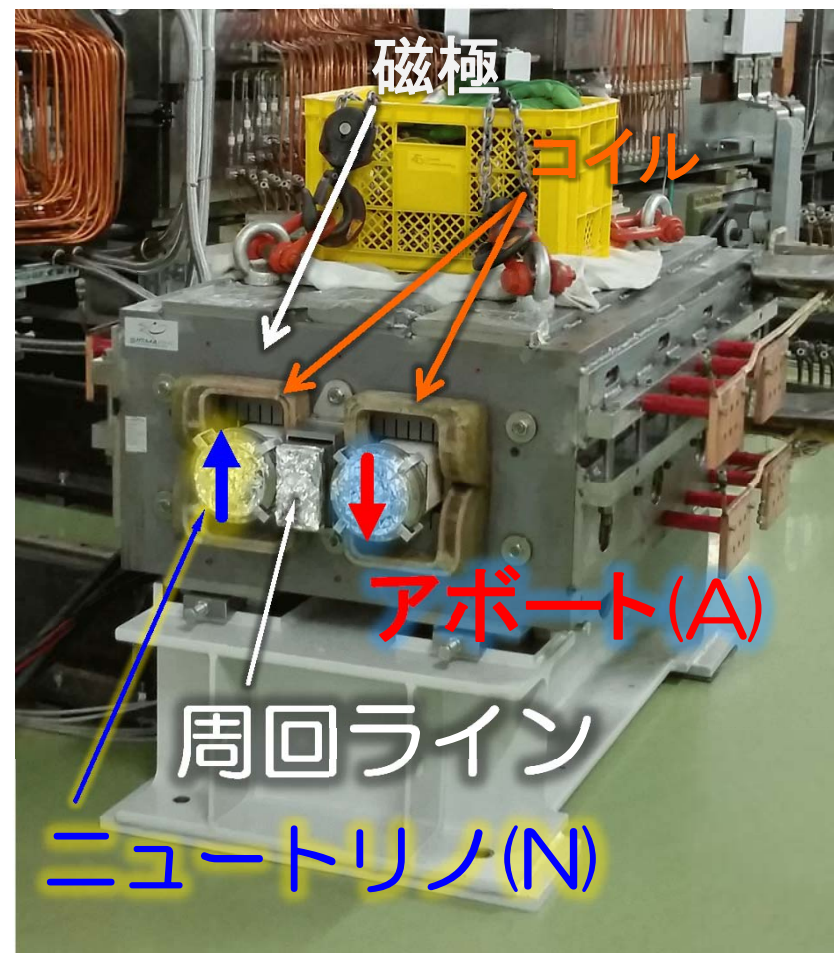
## 試験場所

MRトンネル内NU取り出し部

現行機のすぐ横

## 使用電源

現行機用の電源



# 高繰り返し試験

## 繰り返し周期

2.48秒 現在の運転周期

1.28秒 >700kW出力  
に必要な運転周期

1.16秒 >1.3MW出力  
に必要な運転周期

## 立上時間

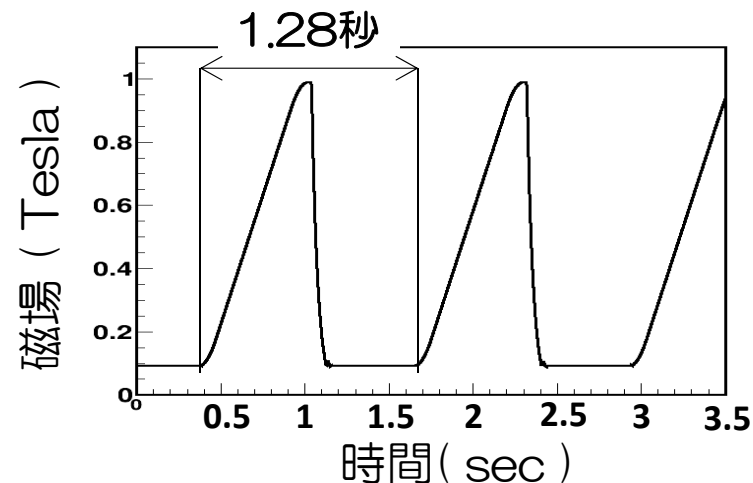
1.40秒 ( 2.48秒周期時 )

0.65秒 ( 1.28秒周期時 )

0.58秒 ( 1.16秒周期時 )

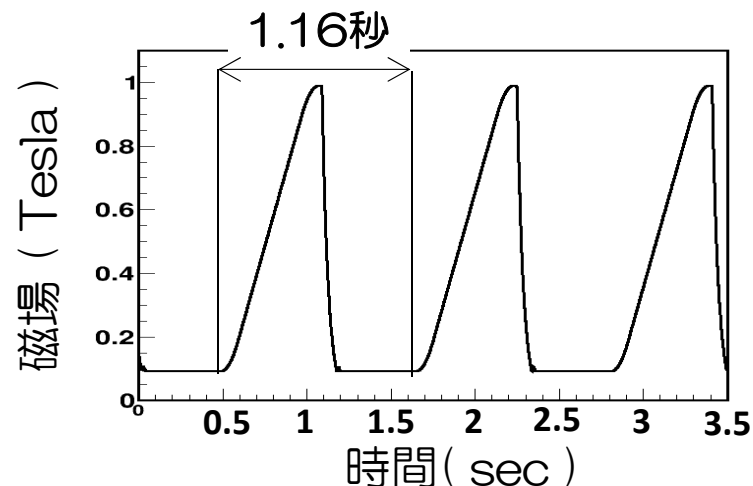
## 磁場波形 →

周期 1.28秒  
電流値 3850 A  
(最大電流値)



## 磁場波形 →

周期 1.16秒  
電流値 3850 A



結果 電源、電磁石、両方問題なし(特に発熱)

# 磁極内磁場測定 電流vs磁場の線形性

14

## 磁場測定セットアップ

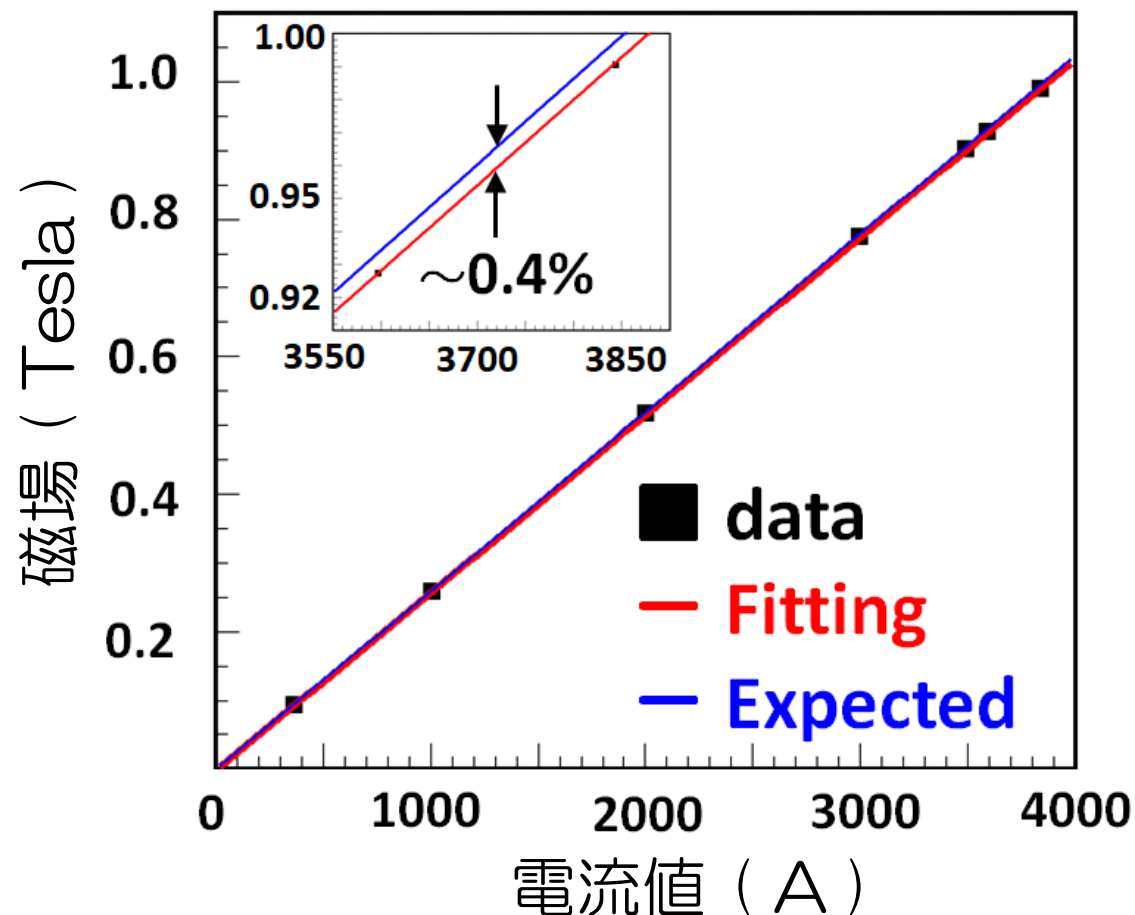
磁場センサーはホール素子

F.W.BEL製 8030型

ビーム軸方向に移動させて  
磁場分布を測定

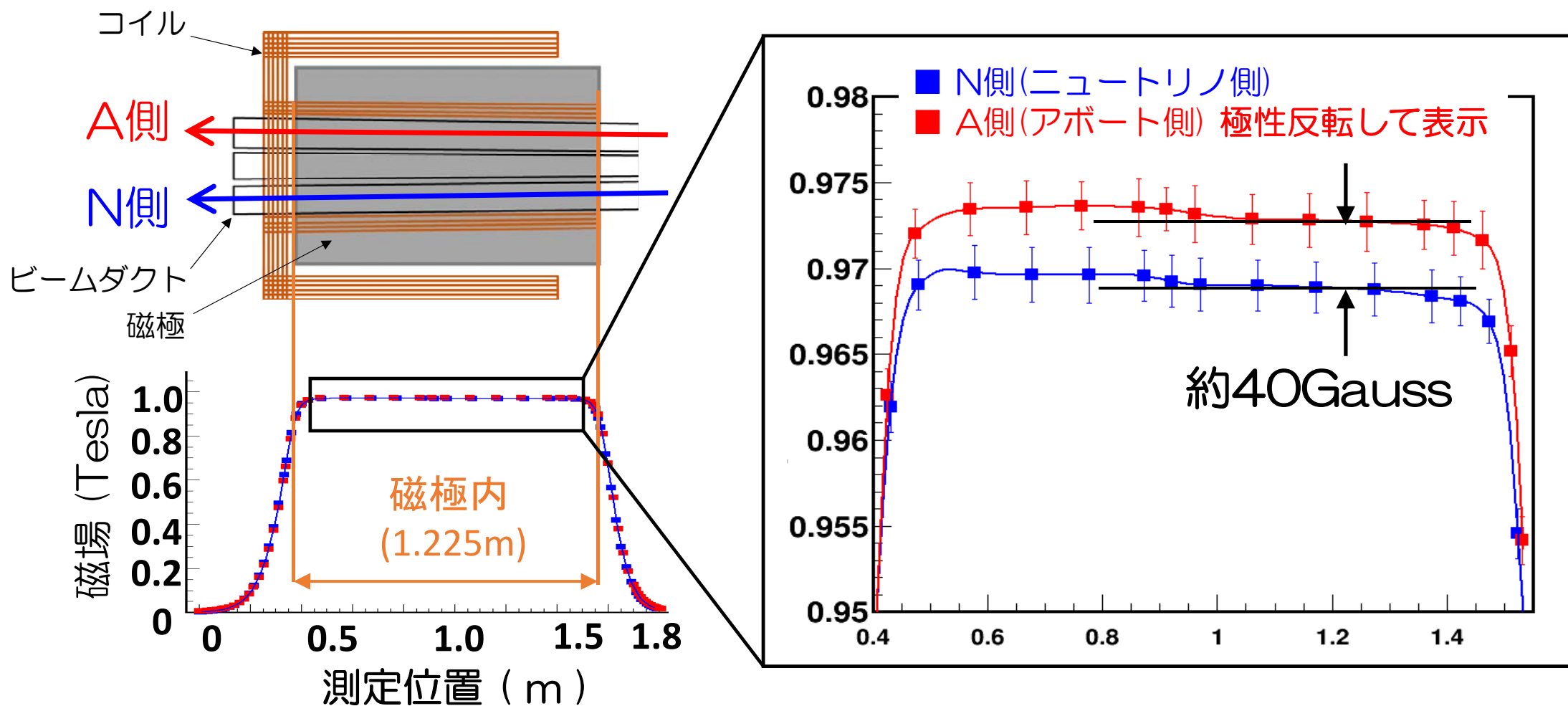


## 電流値と磁場の線形性



結果 線形性は良好. 但し期待値より0.4%低い

# ビーム方向に沿った磁極内磁場分布



結果 約40Gaussの差あり. N側が低く、A側が高い

# 磁極内磁場の非対称性の原因

## 問題のおさらい

NU側 +9,696 Gauss  
Abort側 -9,736 Gauss

差は40Gauss

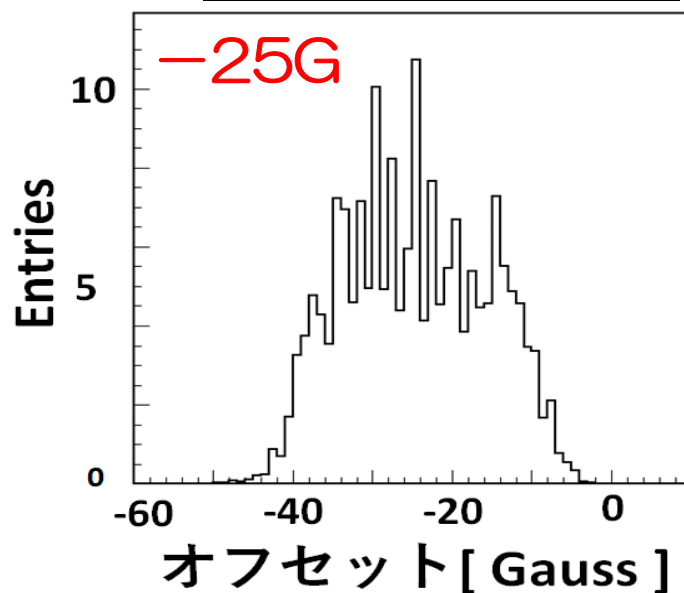
## 原因は何の違い？

- × 磁極間距離
- × 磁極の形状
- × ビームダクト
- △ コイルの  
インダクタンス
- × ホール素子の  
極性依存

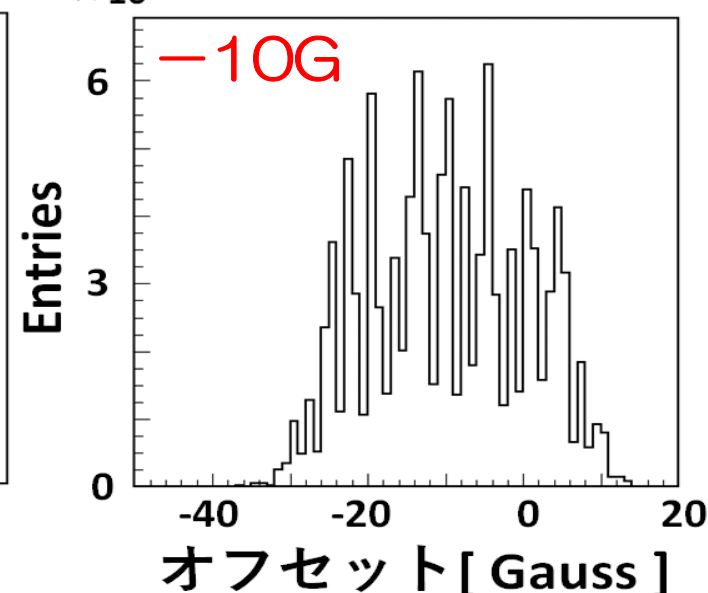
## ホール素子+ADCのオフセット電圧

ゼロ補正をしても残るオフセット電圧  
通電中はFB磁場がある

× 10<sup>3</sup> 60パルス分の記録



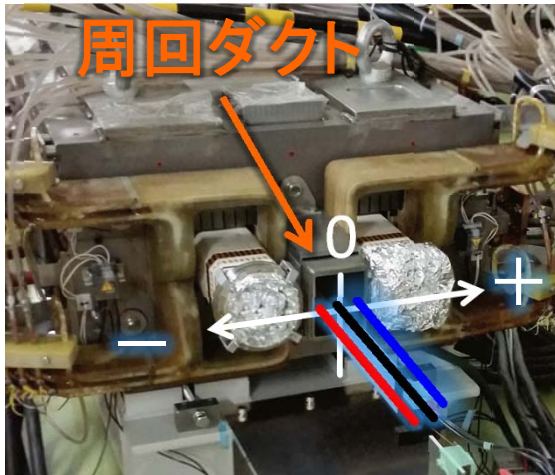
× 10<sup>3</sup> 37パルス分の記録



結論 負極のオフセットによる差が原因

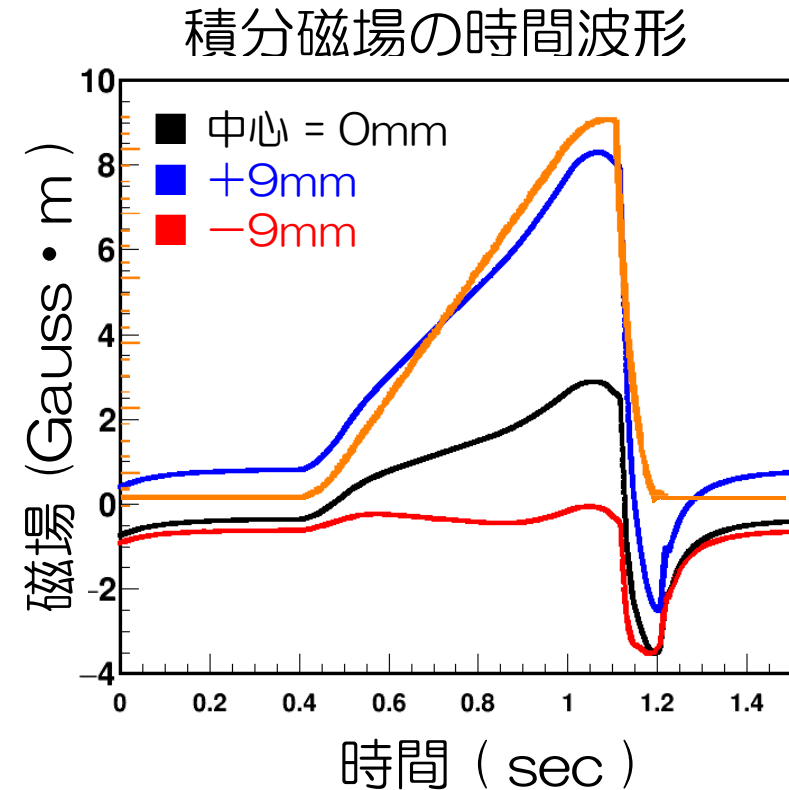
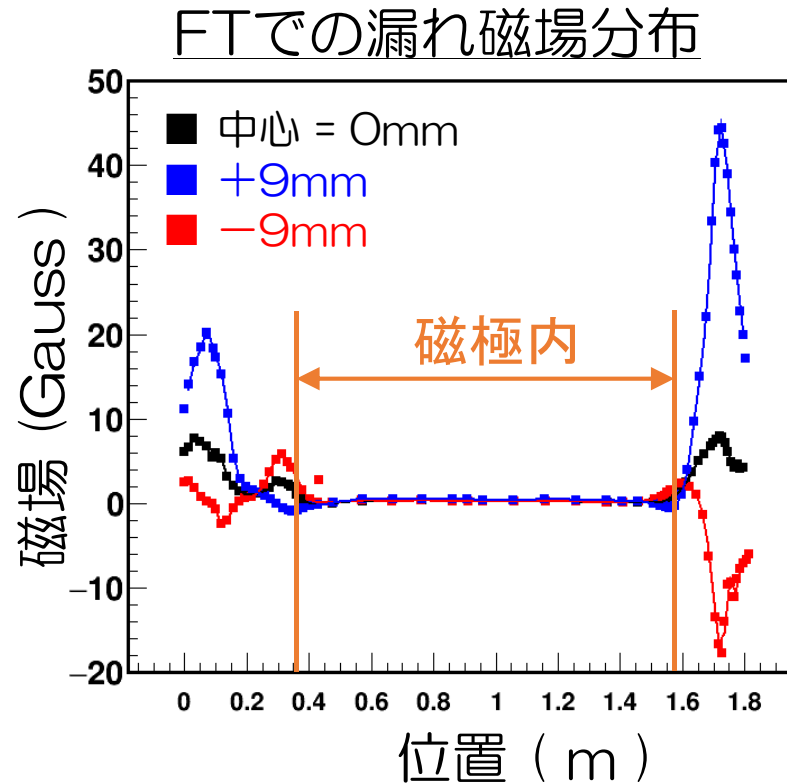


# 周回ビームライン内への漏れ磁場



横方向の測定範囲

- 中心 = 0mm
- +9mm (N側)
- -9mm (A側)



積分磁場の設計値  $\sim 10 \text{ Gauss} \cdot \text{m}$

**結果1** 積分磁場は全て  $10 \text{ Gauss} \cdot \text{m}$ . しかし磁極端部の磁場を下げたい

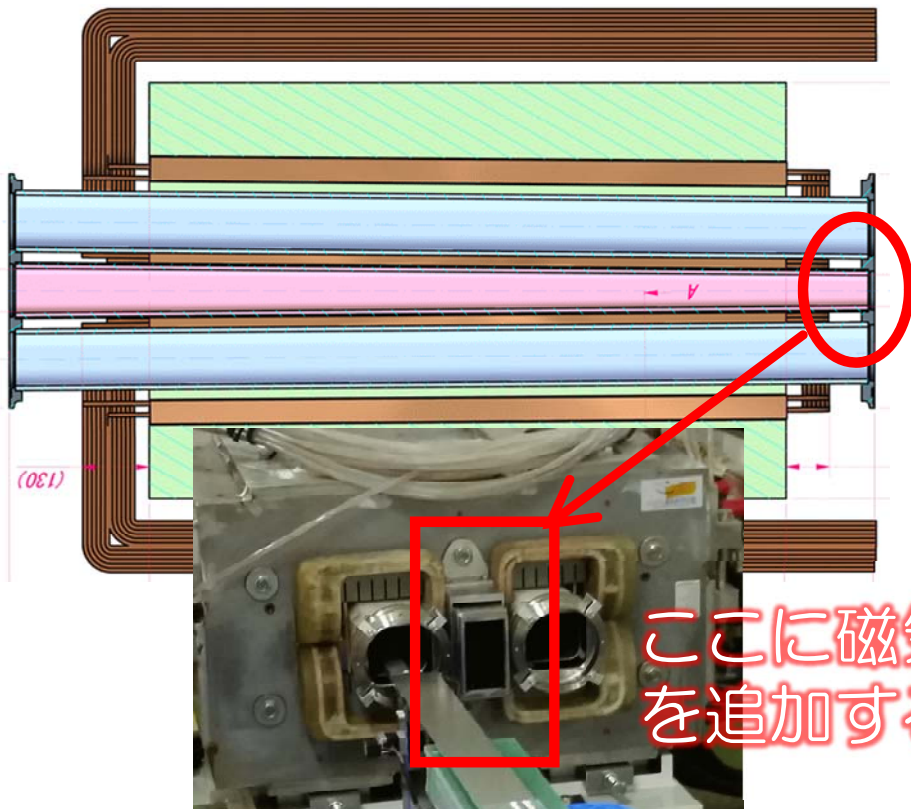
**結果2** 漏れ磁場分布が  $\pm 9 \text{ mm}$  で非対称

# 漏れ磁場軽減対策

磁極端部の漏れ磁場を更に軽減する

磁極端部の磁場

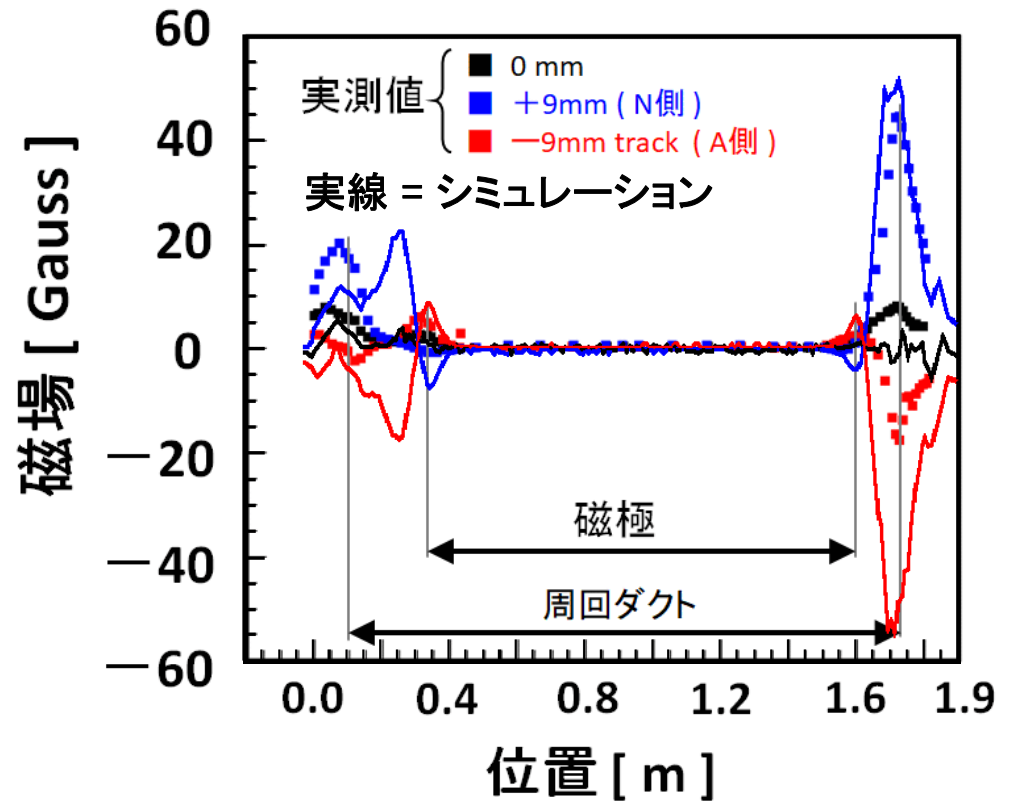
= コイルからの回り込み



ここに磁気遮蔽を追加する

磁場計算による磁気遮蔽の設計

OPEARA 3D(静磁場)で現状計算



磁極端部の再現性が不完全

# まとめと今後

## まとめ

>700kWに向けて

速い取り出し用 新高磁場セプタム電磁石を3台製作

## 新高磁場セプタム電磁石#1の試験実施

結果1 高繰り返し運転の確認. **1.3MWの条件を満たす**

結果2 磁極内磁場は十分出ている事を確認した

結果3 漏れ磁場はおおよそ設計通り

横方向に大きな非対称性あり

## 今後

磁極内磁場 **左右非対称性の解消**

漏れ磁場 **横方向非対称性の解決と極端部の漏れ磁場軽減**