

# 永久磁石ベース偏向磁石のSPring-8 入射輸送ラインでの実ビーム性能検証

青木 毅<sup>A)</sup>, 谷内 努<sup>A)</sup>, 松原伸一<sup>A)</sup>, 柳田謙一<sup>A)</sup>

高野史郎<sup>A, B)</sup>, 深見健司<sup>A, B)</sup>, 渡部貴宏<sup>A, B)</sup>

<sup>A)</sup> 高輝度光科学研究センター

<sup>B)</sup> 理化学研究所 放射光科学研究センター

# はじめに ～本偏向磁石開発の経緯～

## 永久磁石のメリット

- ・省エネ（電気代、SPring-8は年間1.8億円）
  - ・省メンテナンス（電源、水）
  - ・トラブルによる停止がない（電源、水）
  - ・冷却水循環による振動がない
- etc.

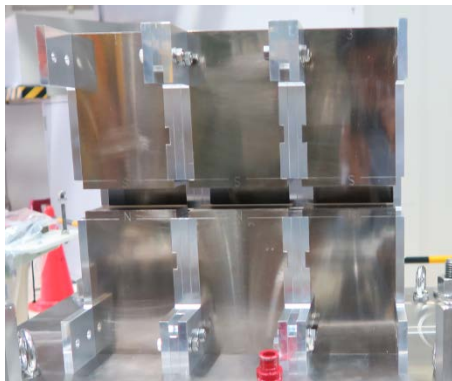
## 永久磁石の課題

- ・磁場性能（平坦度は大丈夫？）
  - ・磁場調整（調整範囲、精度は大丈夫？）
  - ・永久磁石の温度依存性（ $-0.1\%/K$ 程度）
  - ・減磁（IDでは放射線減磁の問題）
  - ・製作費用（電磁石+電源よりも高額では？）
  - ・使用実績の少なさ（なんとなく不安）
- etc.

# SPring-8における永久磁石ベース偏向磁石の開発、実証

- ✓ 鉄とのハイブリッド構造による磁場平坦化
- ✓ Outer/inner platesによる、滑らかな磁場調整
- ✓ 整磁合金による温度依存性補償
- ✓ サマリウム・コバルト磁石の採用による減磁対策
- ✓ 効率的な磁気回路、製造工程管理によるコスト削減

Mini-LGB



Normal bend



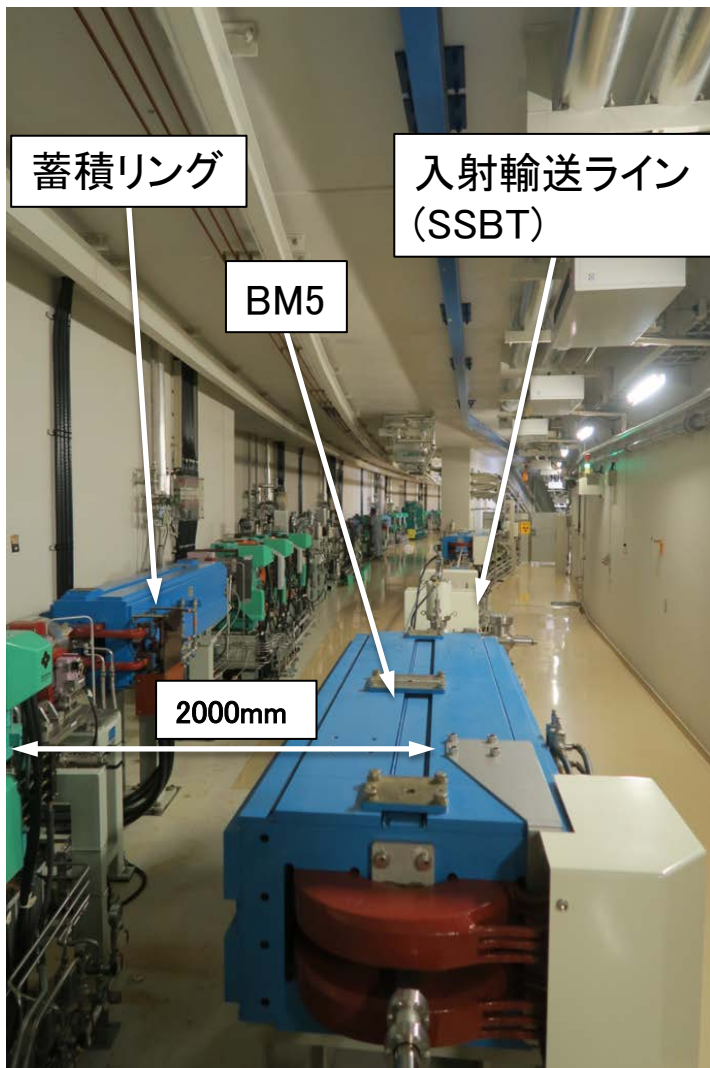
Longitudinal gradient bending (LGB) magnet



→ 残された主な課題は実機による性能検証(本日の話題)

# 実証試験の対象磁石の選別

## 蓄積リングトンネル内



## BM5の選択理由

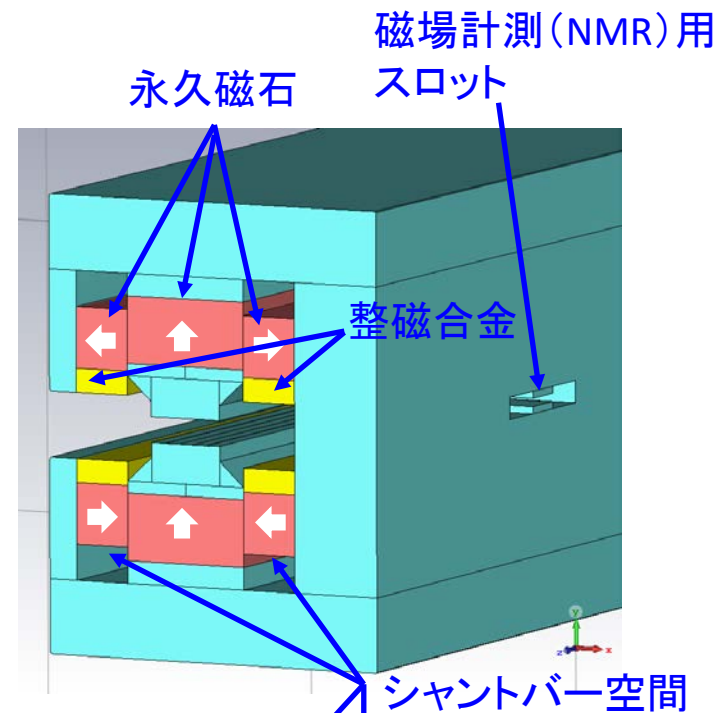
- ビーム入射輸送ライン  
→磁場が変動しても光軸ドリフトなし  
(実験ユーザーに影響なし)
- リング入射部直前で入射軌道フィードバック  
補正を実施
- 交換作業の利便性
- 蓄積リングトンネル内のため、温度環境、  
放射線環境が本体に近い

# 磁気回路設計

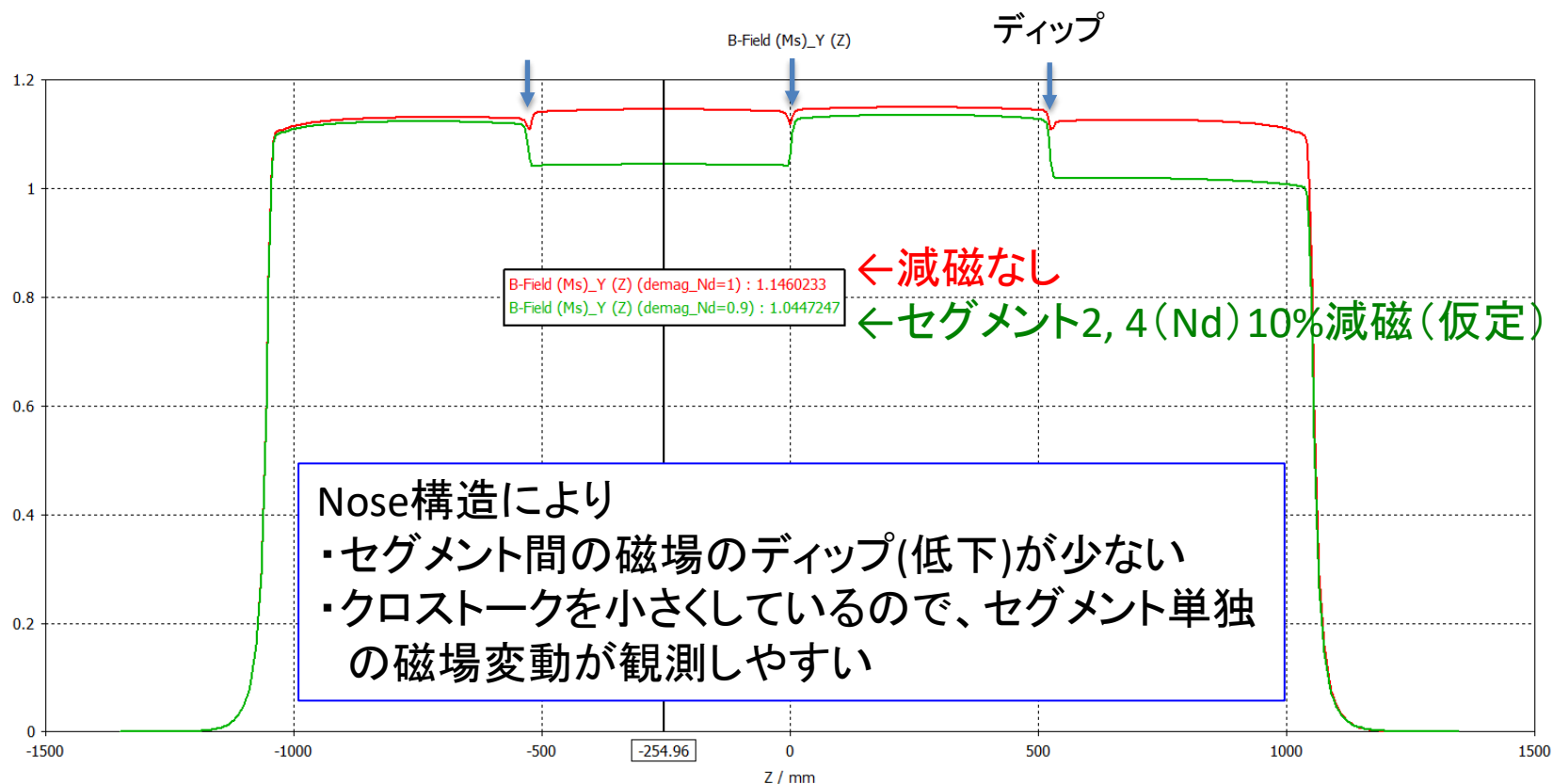
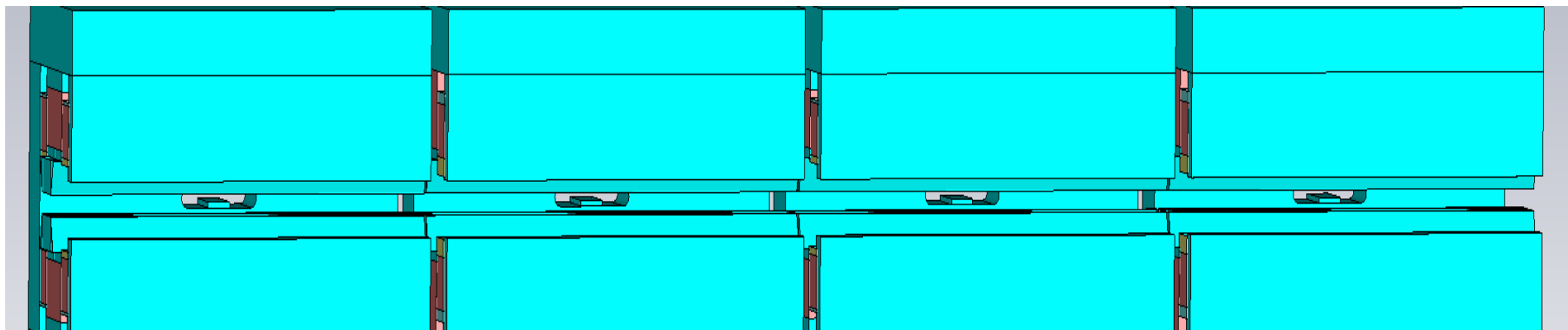
- 4セグメント化
  - Nose構造: 磁場クロストーク低減
  - 2種類の永久磁石 (Nd-F-B,  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ )
  - 3セグメントで6GeV (SP8-II) に対応
- 整磁合金による磁場の温度補償
  - $< \pm 5 \times 10^{-5}$  [1/K]
- シャントバーによる初期磁場調整
  - 最大: -6%
  - 現場ではステアリング増設で角度補正
- 材質: 磁極 SUY, ヨーク SS400

## PM-BM5の仕様

中心磁場	1.11 T
BL積	2.31 Tm
磁極長	~2100 mm (Sector型)
セグメント数	4 ( $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ , Nd-Fe-B 各2台)
磁極Gap	17mm
良磁場領域	$\pm 12\text{mm}$
$P_c$ (パーミアンス係数)	2~5



# Nose構造によるセグメント間の接続、クロストーク低減

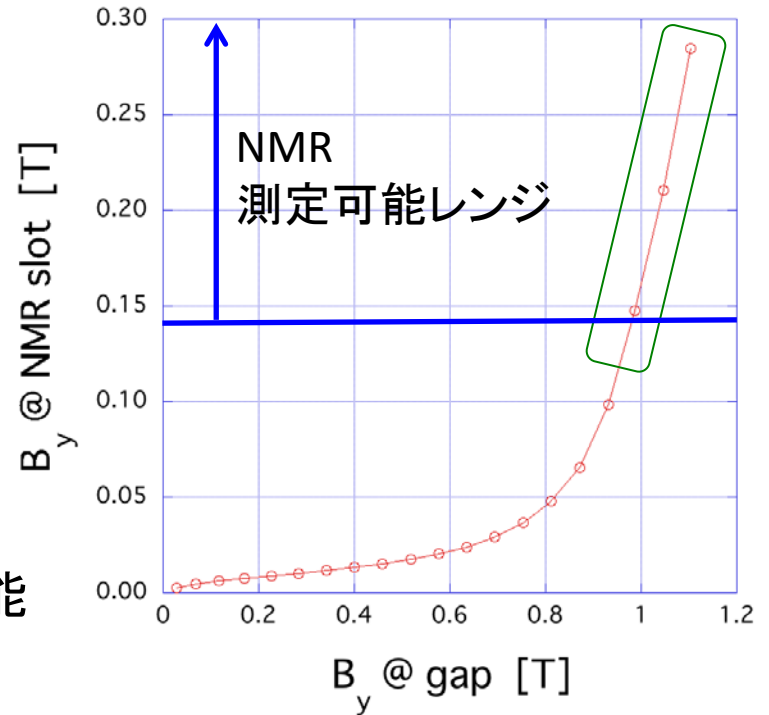
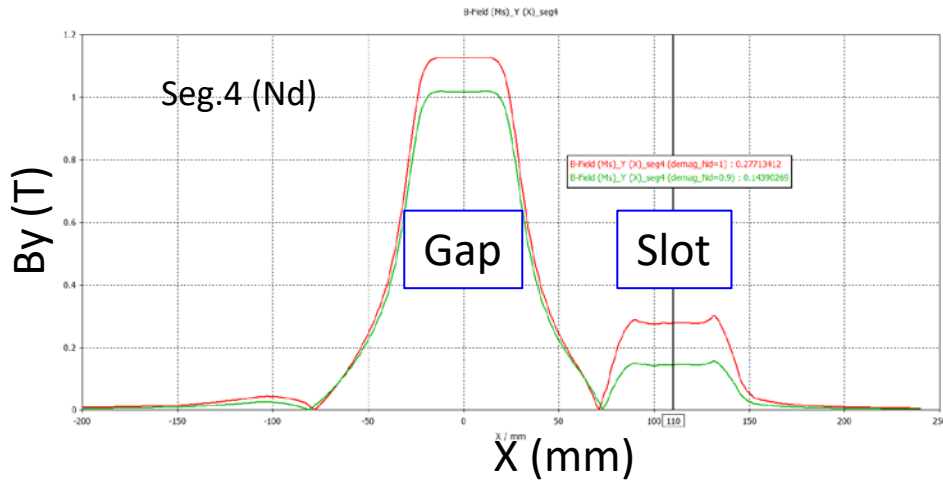


# ヨーク部NMR磁場計測用スロット

## モニタ用スロット設計

リターンヨークにNMR用スロット(プローブ挿入窓)

スロットの磁極形状 (W:30mm, D:60mm, H:6mm)



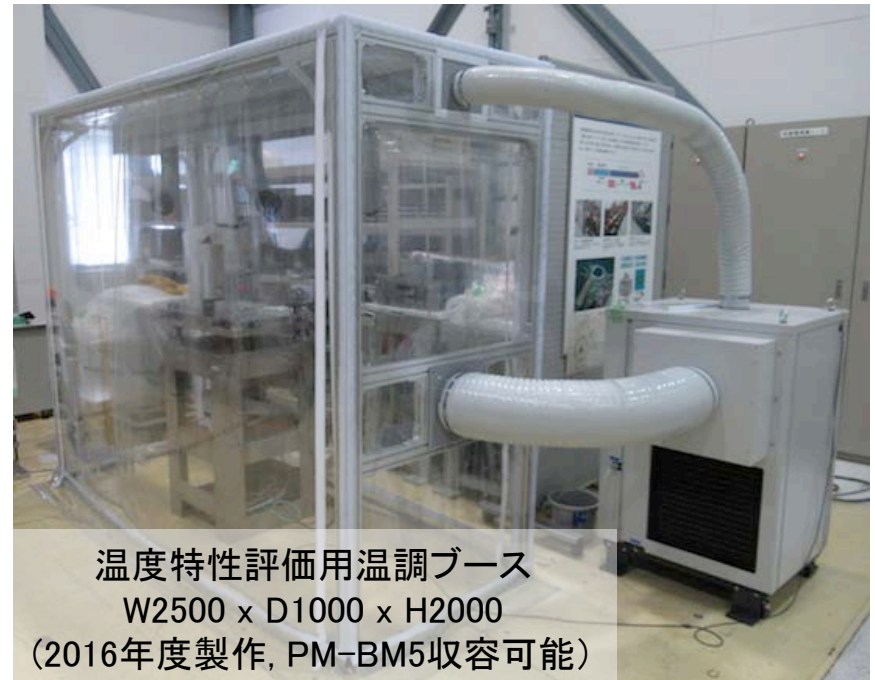
磁極ギャップの磁場変化を高感度で観測可能  
ギャップでの変化率の約2.5倍の感度

# 4連結後の磁場温度係数測定

- 温度設定範囲 18~32°C
- 温度上昇(下降)レート 0.5°C/時

セグメント	温度係数 [1/K] 26~28°Cでfitting up down 平均
#1 (SmCo)	$+1.5 \times 10^{-5}$
#2 (Nd)	$-2.8 \times 10^{-5}$
#3 (SmCo)	$+7.0 \times 10^{-6}$
#4 (Nd)	$-8.9 \times 10^{-6}$
#1~#4平均	$-3.7 \times 10^{-6}$

仕様値以内 ( $< \pm 5 \times 10^{-5}$  [1/K])



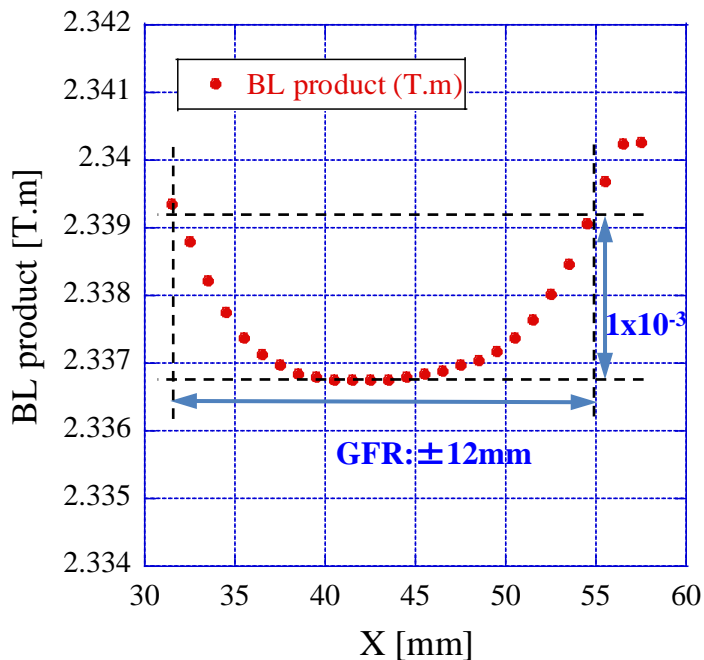
温度特性評価用温調ブース  
W2500 x D1000 x H2000  
(2016年度製作, PM-BM5収容可能)



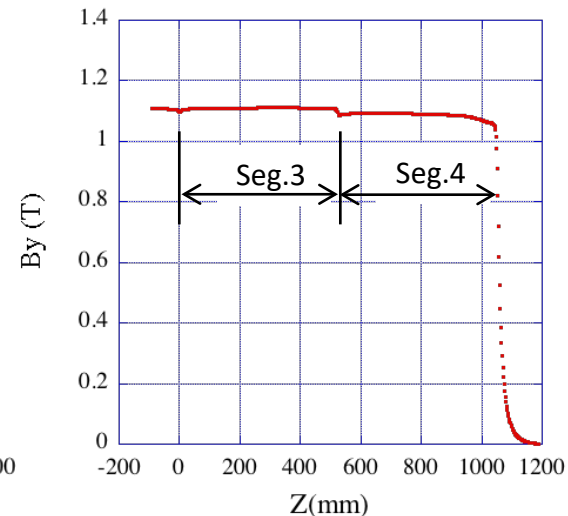
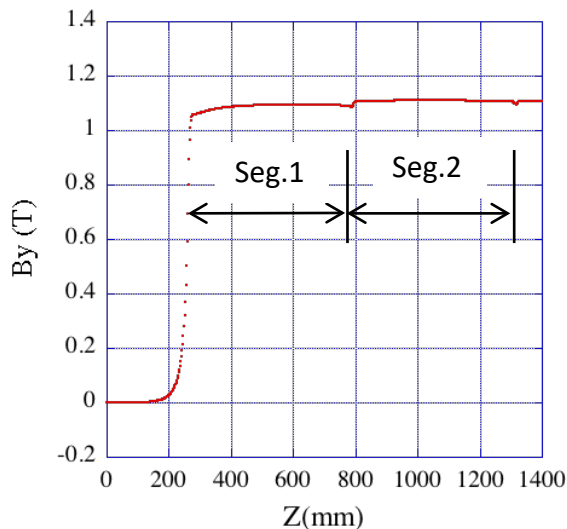
# 3次元磁場測定結果(ホール素子)

※ ホール素子はNMRで較正

## BL積による良磁場領域



## 磁場分布(BL積, 良磁場領域)の確認

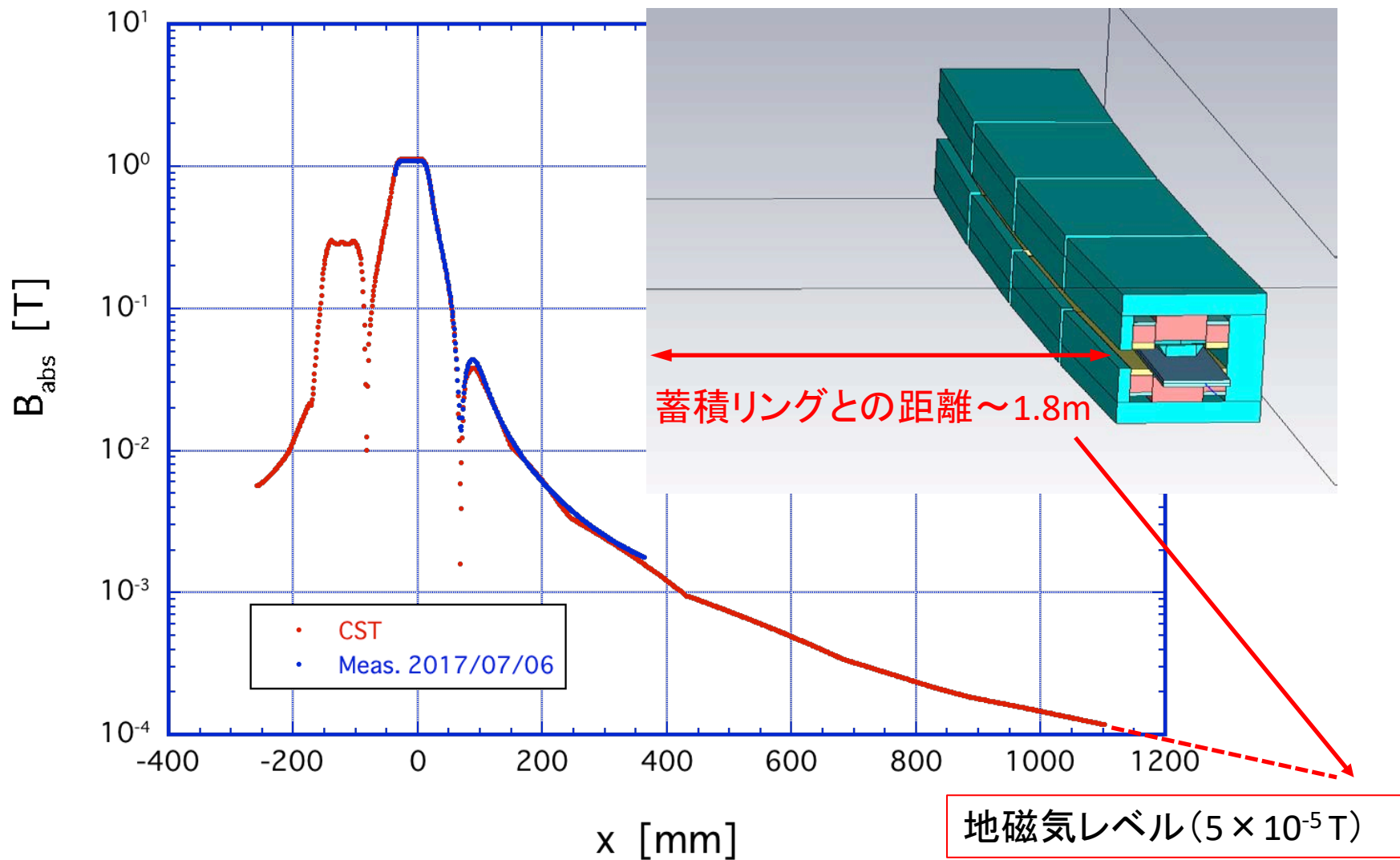


仕様値:  $< 1 \times 10^{-3} @ \pm 12 \text{mm}$   
を満たす

BL積:  $2.341 \text{ T} \cdot \text{m}$

- 仕様値  $2.31 \text{ T} \cdot \text{m}$  よりも **1.34%** 高い  
(単体磁場測定 → 組み立て時のズレ)
- 調整可能だが、増設したステアリング電磁石で十分補正できることを確認し、このままインストール

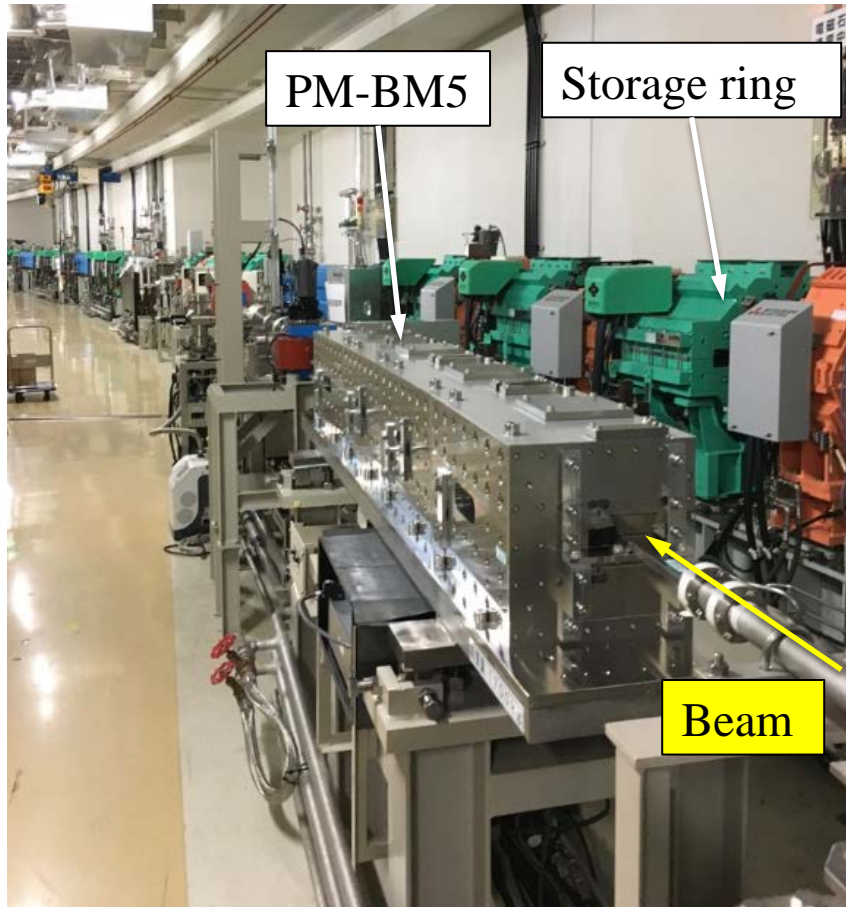
# PM-BM5 transverse方向漏れ磁場の影響



蓄積リングへビーム入射後の周回軌道への影響は確認されず

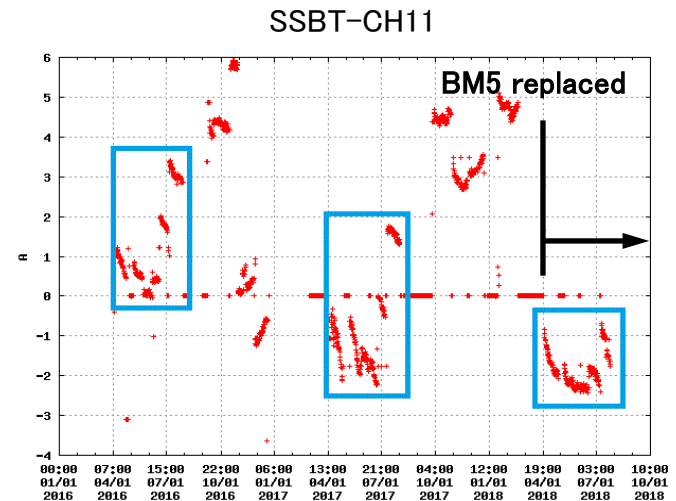
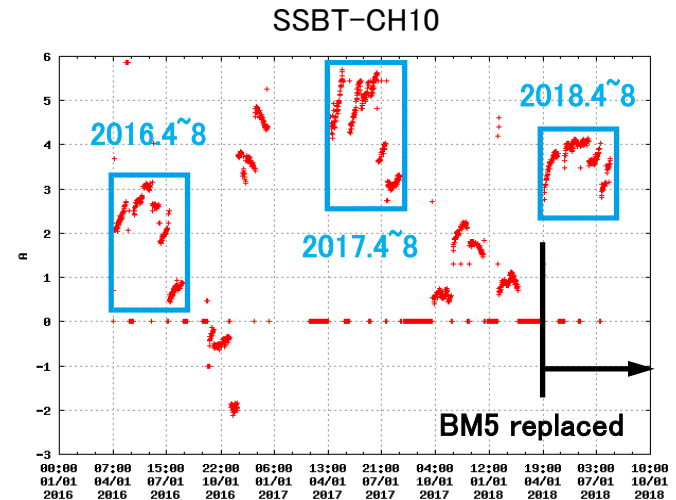
# 設置後の運転状況

- 偏向角+0.7%増分の補正パラメータを適用  
約30分の調整で正常なビーム入射を確認
- 電磁石時と同じ入射効率(～95%)を再現
- リング周回軌道への影響無し  
(漏れ磁場は地磁気以下)



- 入射軌道の変動の状況  
フィードバック補正用ステアリング  
電流値の変化

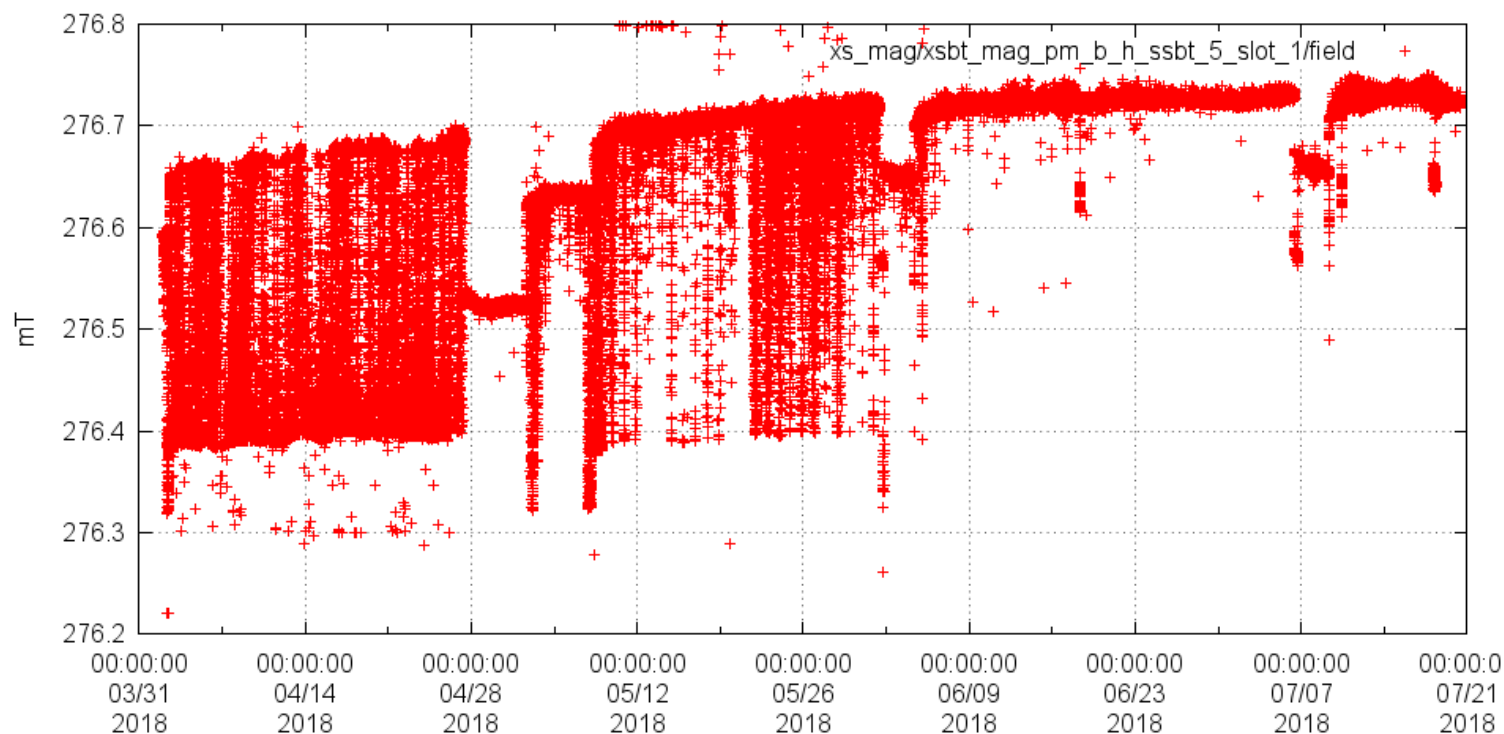
過去2年と比較して変動幅の増加はなし



# スロット部NMR磁場測定試験

2018年4月に実機導入以降、今日に至るまで問題なく利用運転中

一方、NMRによる磁場測定は、途中から測定値にふらつき  
→ スロット部の磁場均一度不足か？（停止期間に調査予定）



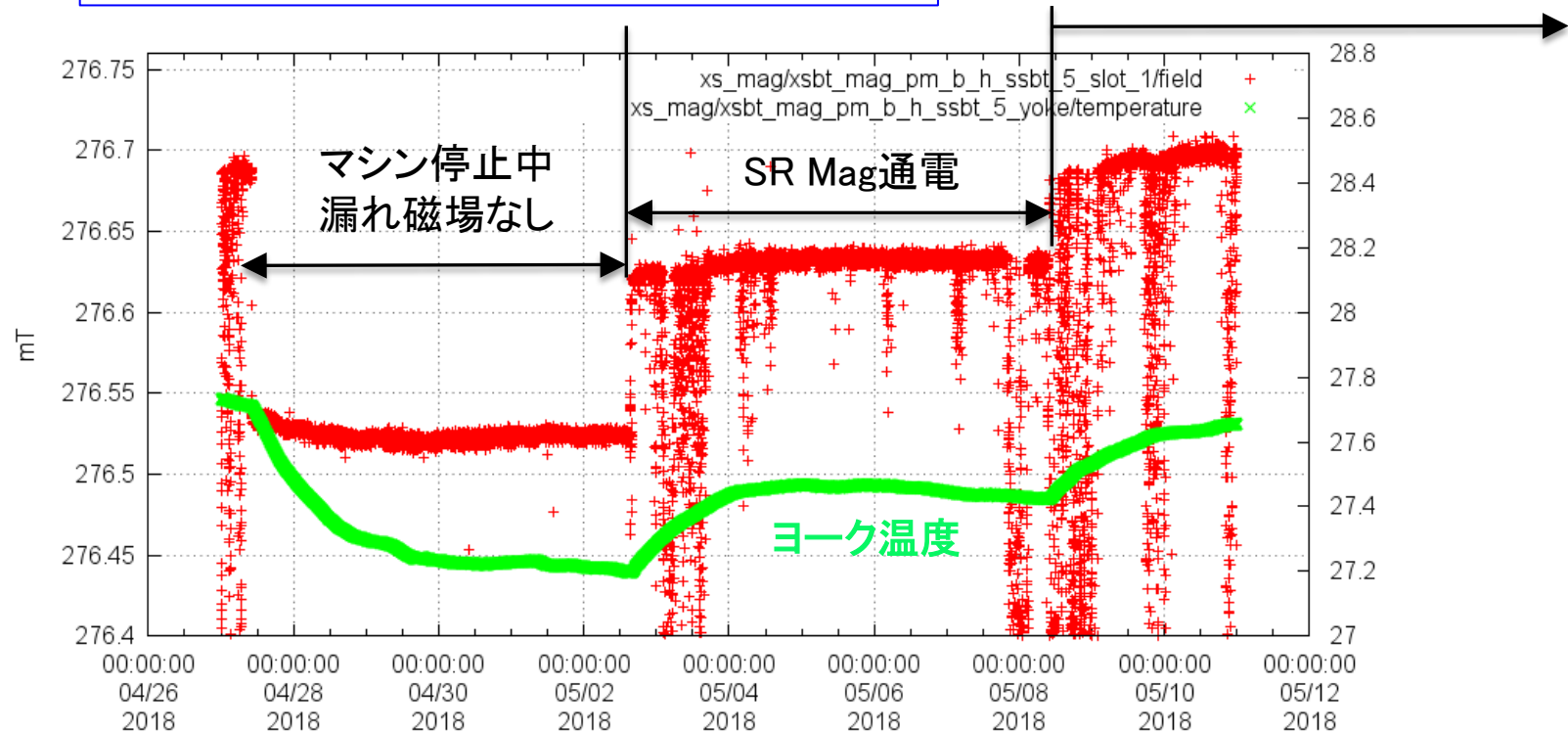
NMR磁場測定スロットの測定結果(セグメント1)

# スロット部NMR磁場測定 ～周囲の磁石からの漏れ磁場の影響～

観測の結果、周囲の電磁石からの漏れ磁場がヨークに周り込む現象を確認(おそらく、電磁石時も同様だった)

BM5の精密磁場測定は、周囲の状況が一定の状態で行うことが肝要  
(例: 周辺磁石OFF時)

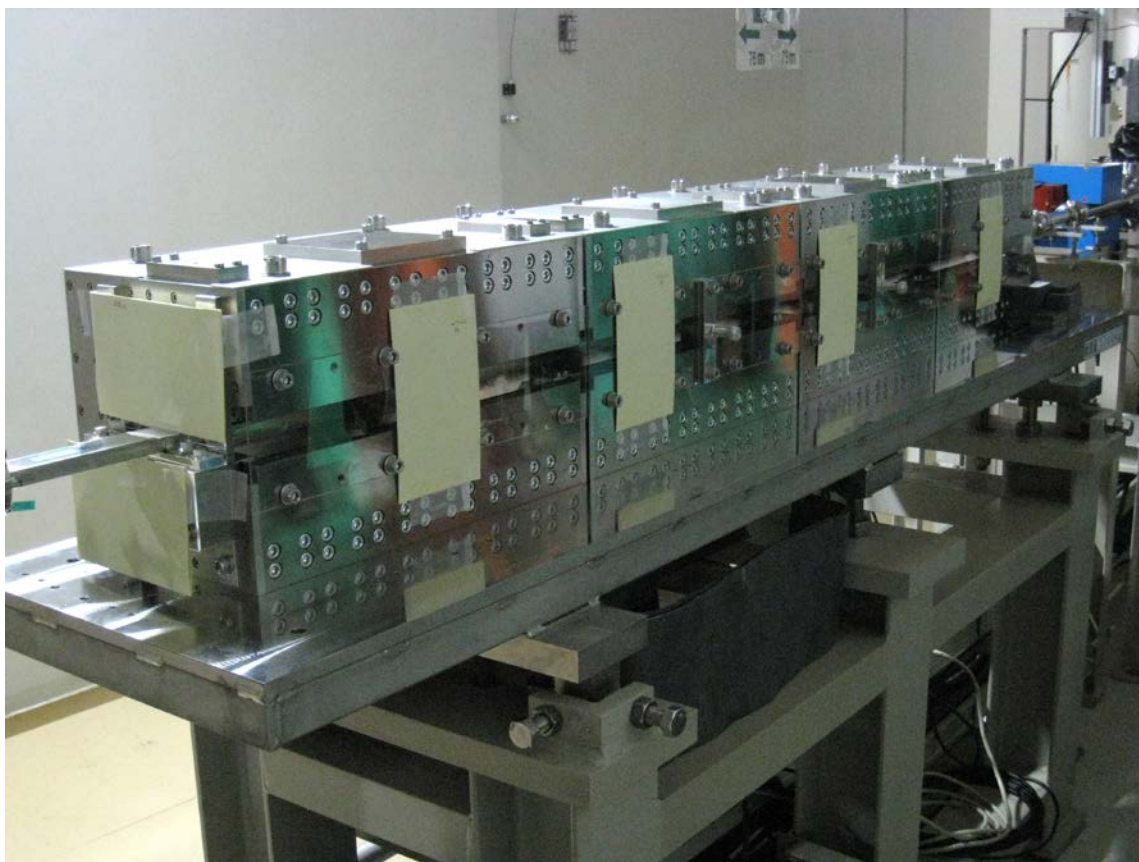
SSBT Mag通電  
ビーム運転開始



NMR磁場測定スロットの測定結果(セグメント1)

# 放射線測定

- 永久磁石の放射線減磁の評価はPM-BM5設置目的の一つ
- ガフクロミックフィルム (EBT3) にて照射線量を測定中
- 今後はRadFETを用いた線量測定も実施予定



# まとめと今後の予定

- 永久磁石ベース偏向磁石を実機において実証すべく、  
検証機 (PM-BM5) を製作
  - ✓ 不測の事態があっても利用実験への影響を最小限に留める場所の選定、  
補正機能 (既設フィードバック + 増設ステアリング磁石) の装備
  - ✓ 2種類の永久磁石を使用 (ネオジム、サマコバ)
  - ✓ LGBを視野に入れた4セグメント分割構造: 6GeV (SPring-8-II) にも対応可能
  - ✓ ヨーク・スロット部のNMRにより磁極磁場の変化を観測
- 蓄積リング収納部入射輸送ラインに設置・運用
  - ✓ 2018年3月旧電磁石と交換 → 2018年4月利用運転開始
  - ✓ 元の偏向角+0.7%の軌道補正パラメータにて正常入射を確認
  - ✓ 以降、現在 (2018年8月) まで正常なトップアップ入射を継続中
- 今後の予定
  - ヨーク・スロット部のNMRによる計測セットアップの再調整
  - 長期運転による永久磁石の減磁について詳細な評価を実施  
RadFETによる線量測定を実施予定