

Magnet System for the SPring-8-II Storage Ring

K. Fukami[#], T. Aoki, N. Azumi, M. Kawase, C. Kondo, S. Takano, M. Tajima, T. Taniuchi,
T. Fujita, T. Masuda, S. Matsubara, H. Yamaguchi, and T. Watanabe
JASRI, RIKEN SPring-8 Center

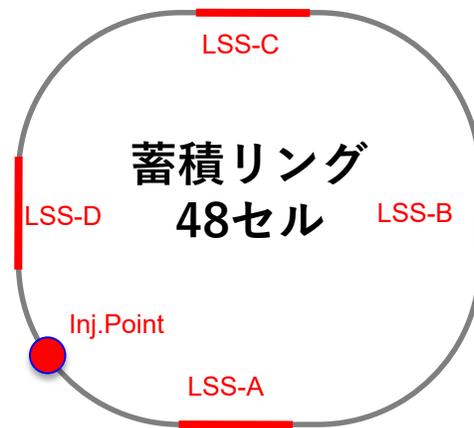
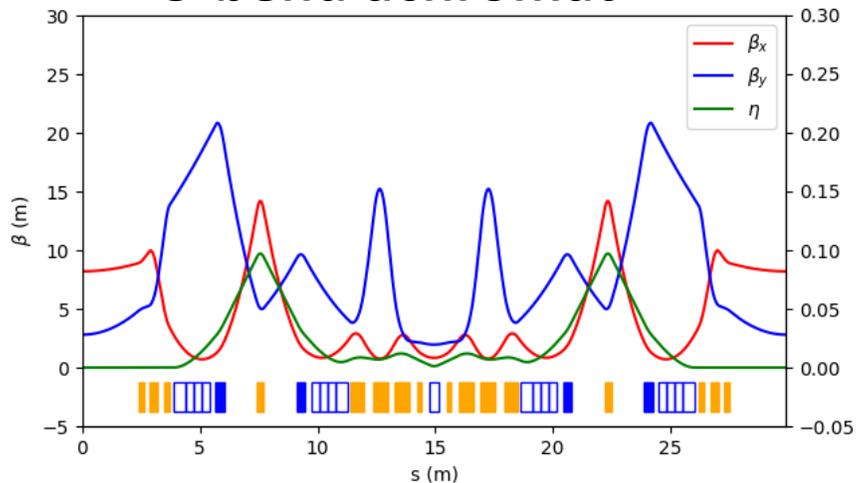
1. Introduction
2. Magnet Design
3. Alignment Scheme
4. Other Developments
5. Summary

1. Introduction



Major Parameters	SPring-8-II	SPring-8
Energy (GeV)	6	8
Stored current (mA)	200	100
Circumference (m)	1435.43	1435.95
Effective emittance (pmrad)	< 100 (with DWs)	2,400

5-bend achromat



ノーマルセル	34
入射部セル	2
長直線(LSS)セル	4
マッチングセル	8

・本日はノーマルセルの磁石
について報告する

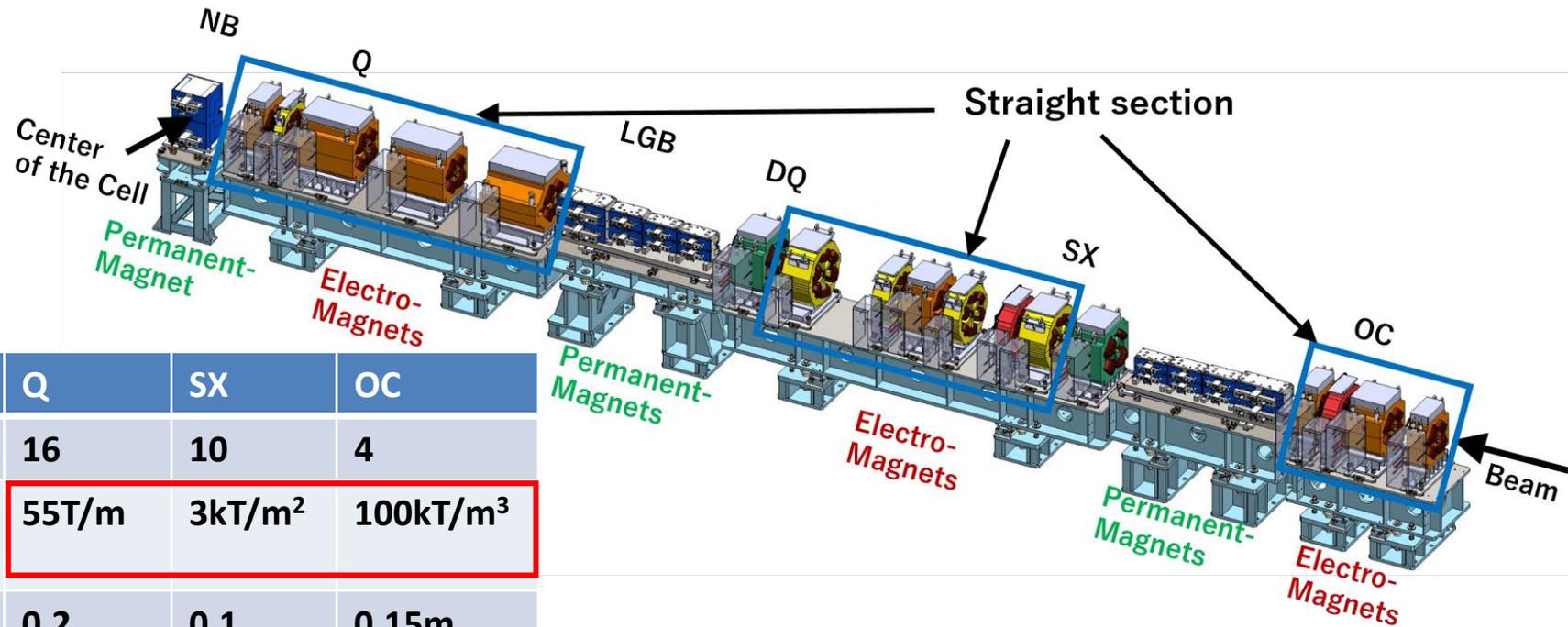
[1] T. Watanabe *et al.*, 本学会中において詳細を報告済 (WEPO702)

1. Introduction

ノーマルセル磁石配置

- 偏向部の LGB*、NB* に永久磁石採用（電力削減、故障率低減）
- DQ*、四極(Q)、六極(SX)、八極(OC)は電磁石採用（高磁場勾配、高パッキング）

* LGB : Longitudinal Gradient Bending magnet、NB : Normal Bending magnet
 DQ : Dipole-Quadrupole combined function magnet



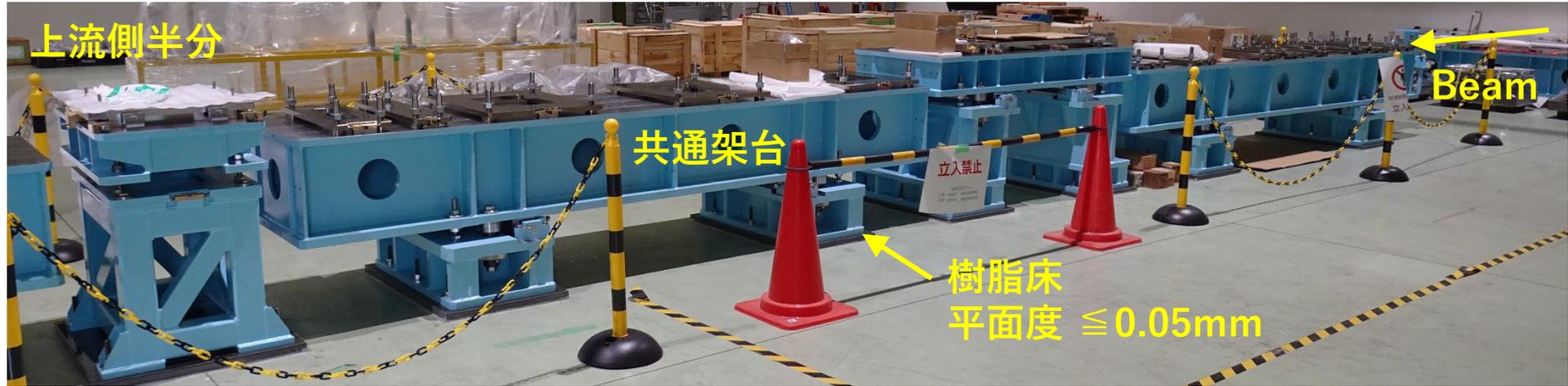
磁石の仕様、セル当たりの台数

	LGB	NB	DQ	Q	SX	OC
Number	4	1	4	16	10	4
Maximum field	0.62T	0.95T	0.26T-23.8T/m	55T/m	3kT/m ²	100kT/m ³
Effective length	1.55m	0.38m	0.35m	0.2 -0.65m	0.1 -0.3m	0.15m
Gap/Bore diameter	25mm	25mm	22mm	34mm	42mm	50mm

ノーマルセル上流側半分
 下流側半分は、セル中央に対し
 線対称配置

2. Magnet Design

先行ノーマルセル構築



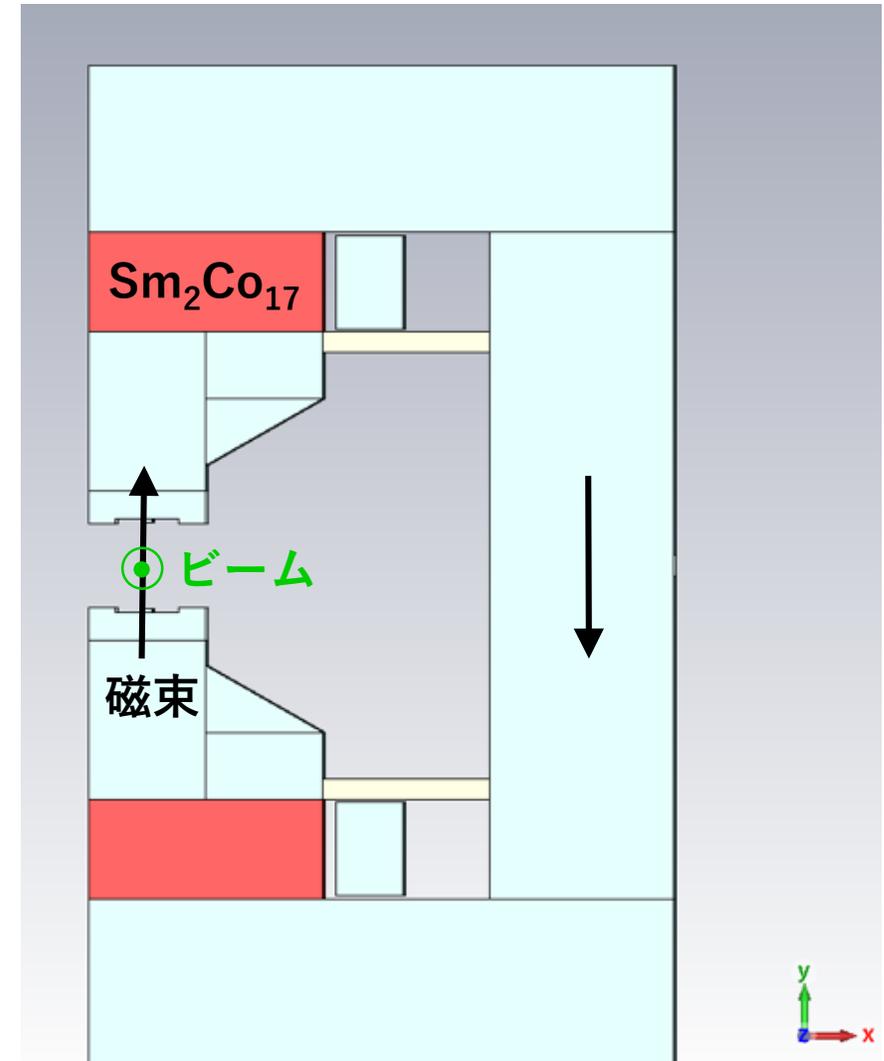
2. Magnet Design (Permanent Magnet)

永久磁石共通仕様

- 放射線による減磁の抑制
耐放射線性の高い $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ を採用
永久磁石がビームから隠れる磁気回路採用
- 温度依存性の補償
ヨーク内に Fe-Ni 合金を設置
合金の厚さを最適化
- ギャップ内磁束密度の調整
ヨーク内に Movable Tuning Plate を設置
Plate 位置調整でギャップ内磁束密度を変更

[2] T. Watanabe *et al.*, PRAB, 20, 072401 (2017).

[3] T. Taniuchi *et al.*, PRAB, 23, 012401 (2020).



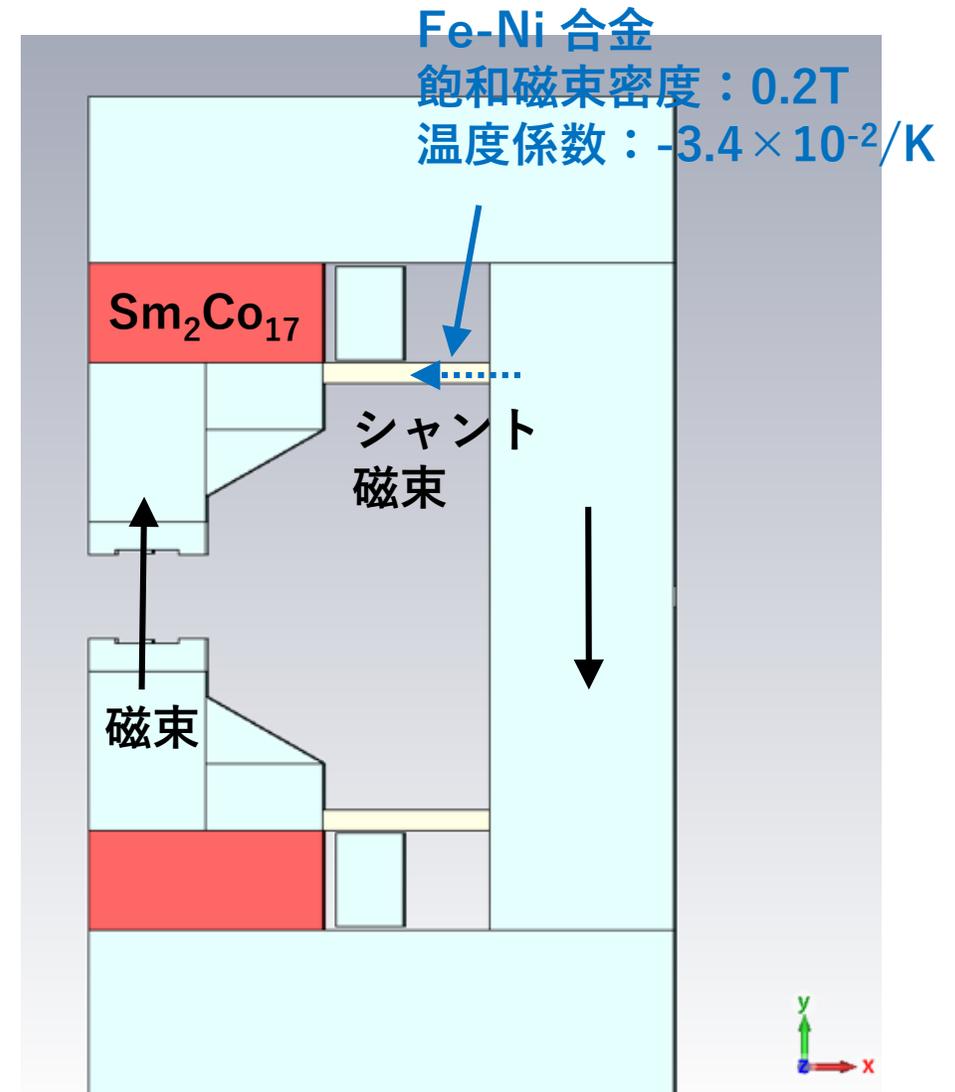
2. Magnet Design (Permanent Magnet)

永久磁石共通仕様

- 放射線による減磁の抑制
耐放射線性の高い $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ を採用
永久磁石がビームから隠れる磁気回路採用
- 温度依存性の補償
ヨーク内に Fe-Ni 合金を設置
合金の厚さを最適化
- ギャップ内磁束密度の調整
ヨーク内に Movable Tuning Plate を設置
Plate 位置調整でギャップ内磁束密度を変更

[2] T. Watanabe *et al.*, PRAB, 20, 072401 (2017).

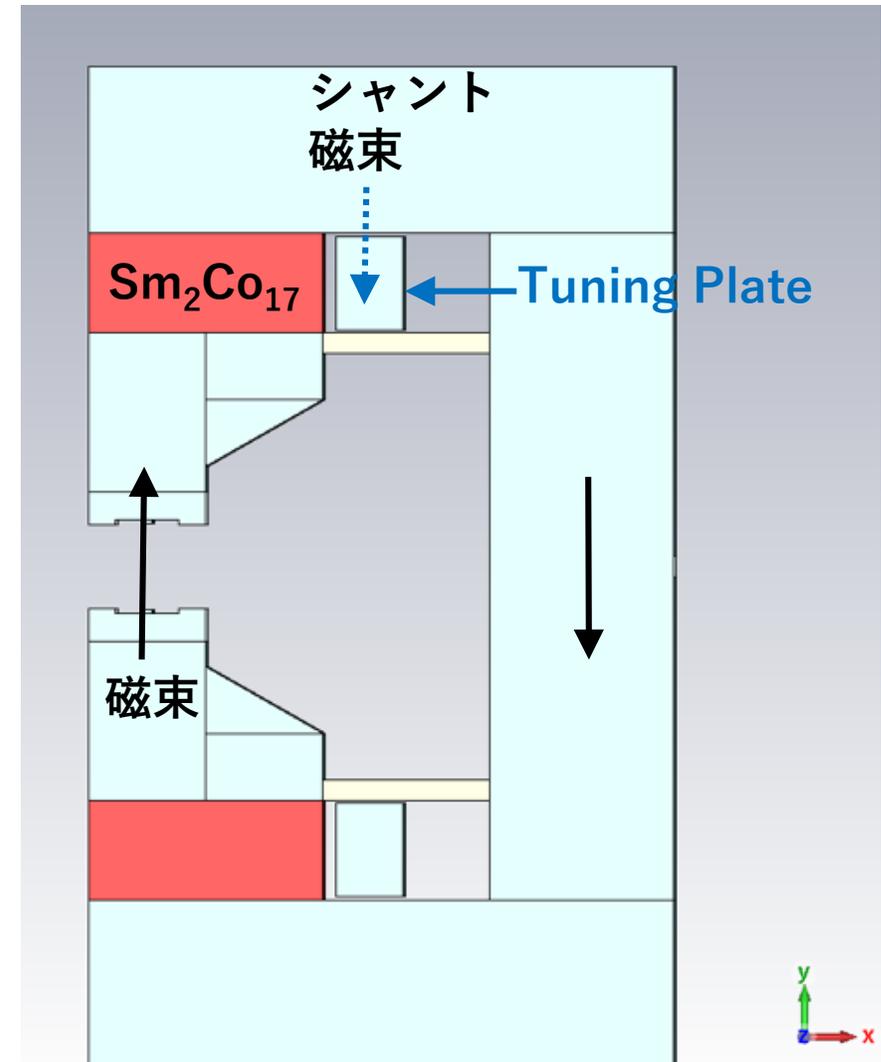
[3] T. Taniuchi *et al.*, PRAB, 23, 012401 (2020).



2. Magnet Design (Permanent Magnet)

永久磁石共通仕様

- 放射線による減磁の抑制
耐放射線性の高い $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ を採用
永久磁石がビームから隠れる磁気回路採用
- 温度依存性の補償
ヨーク内に Fe-Ni 合金を設置
合金の厚さを最適化
- ギャップ内磁束密度の調整
ヨーク内に Movable Tuning Plate を設置
Plate 位置調整でギャップ内磁束密度を変更

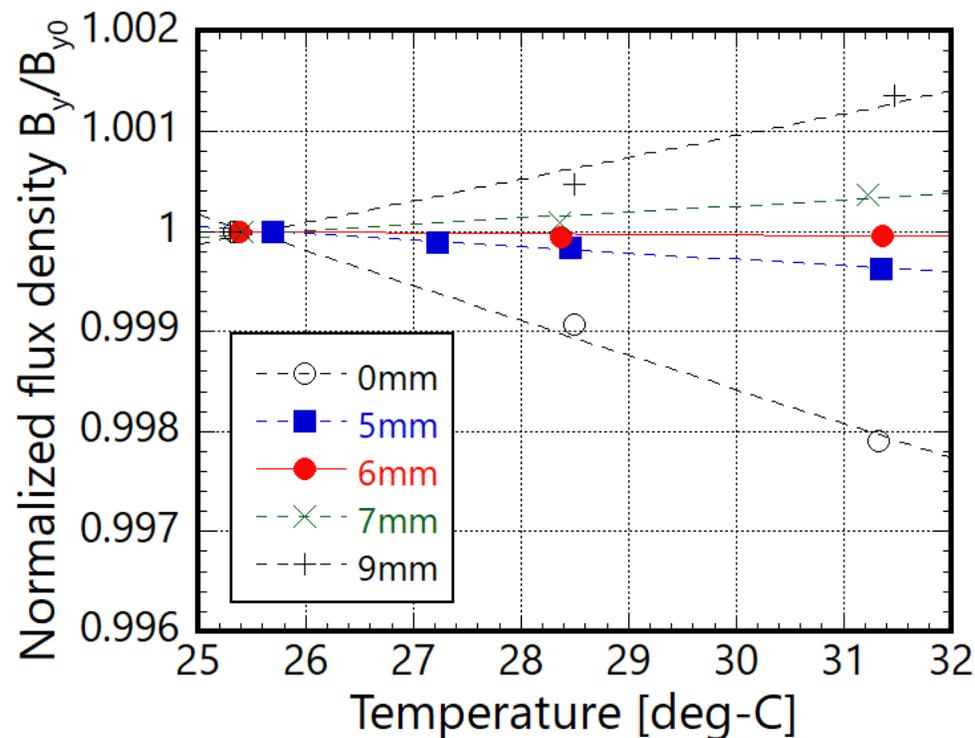


[2] T. Watanabe *et al.*, PRAB, 20, 072401 (2017).

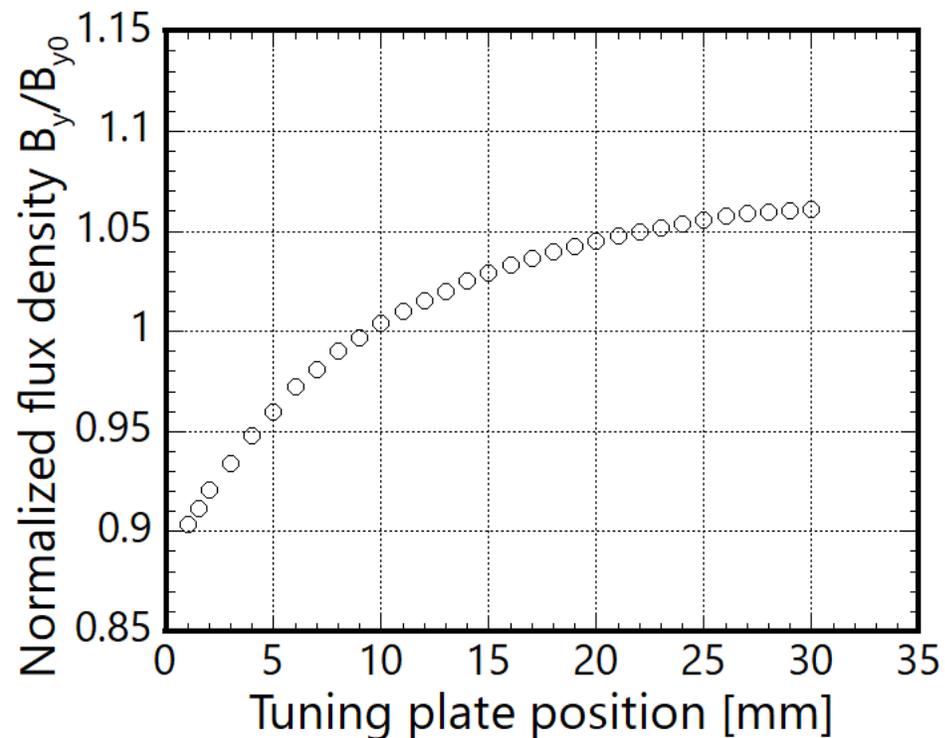
[3] T. Taniuchi *et al.*, PRAB, 23, 012401 (2020).

2. Magnet Design (Permanent Magnet)

ギャップ内磁束密度の温度係数



ギャップ内磁束密度の調整範囲



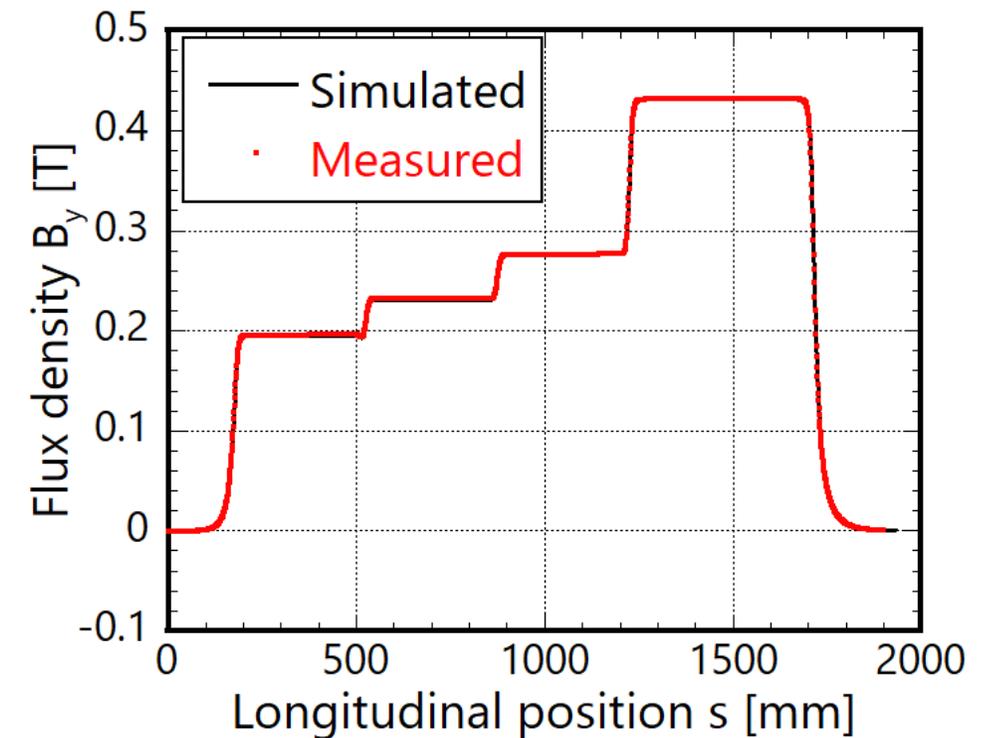
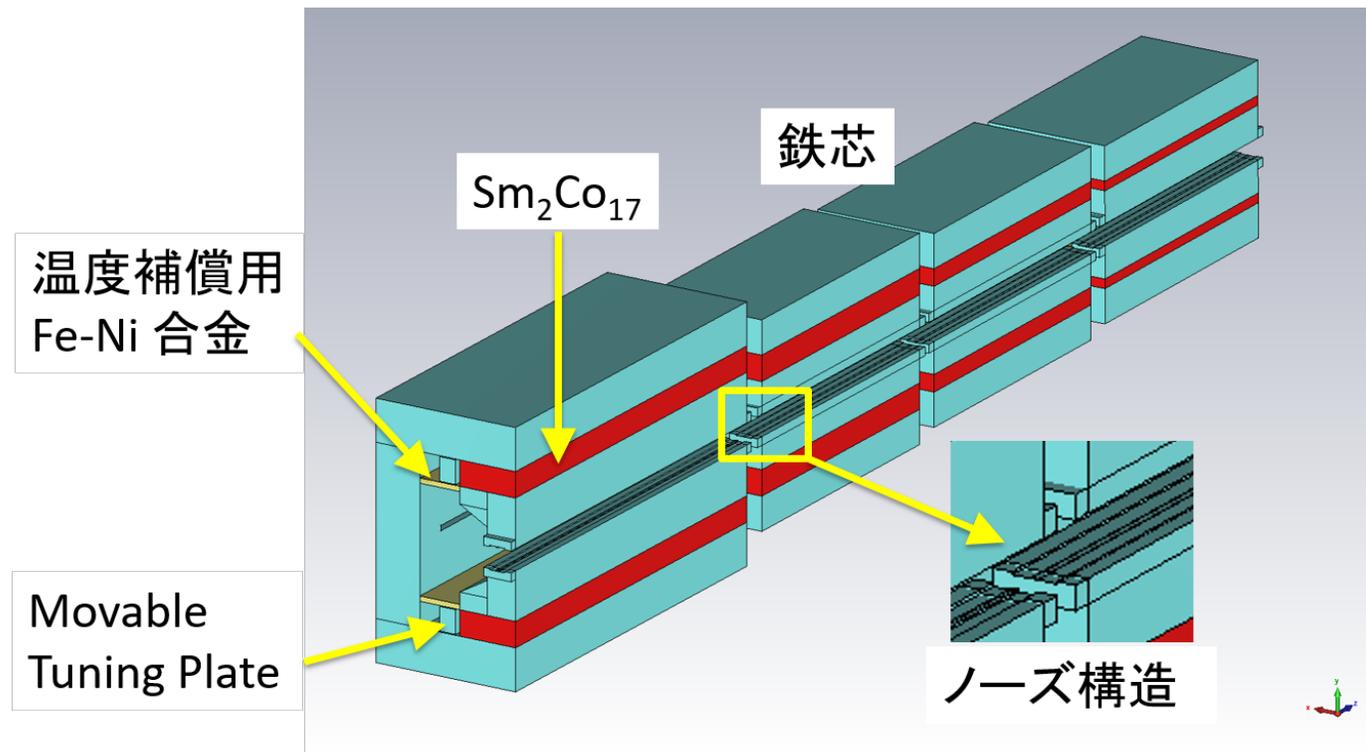
温度係数： $-4 \times 10^{-4}/K \rightarrow \pm 5 \times 10^{-5}/K$ に抑制
 ギャップ内磁場： $-10\% \sim +6\%$ の範囲で調整可能

[4] T. Taniuchi *et al.*, 本学会において詳細を報告済 (WEP070)

2. Magnet Design (Permanent Magnet)

Longitudinal Gradient Bending magnet (LGB)

ギャップ内磁束密度の異なる 4 セグメントをビーム軸方向に並べて階段状磁場を形成
 → ノーズ構造により、階段間の磁束密度をスムーズに接続

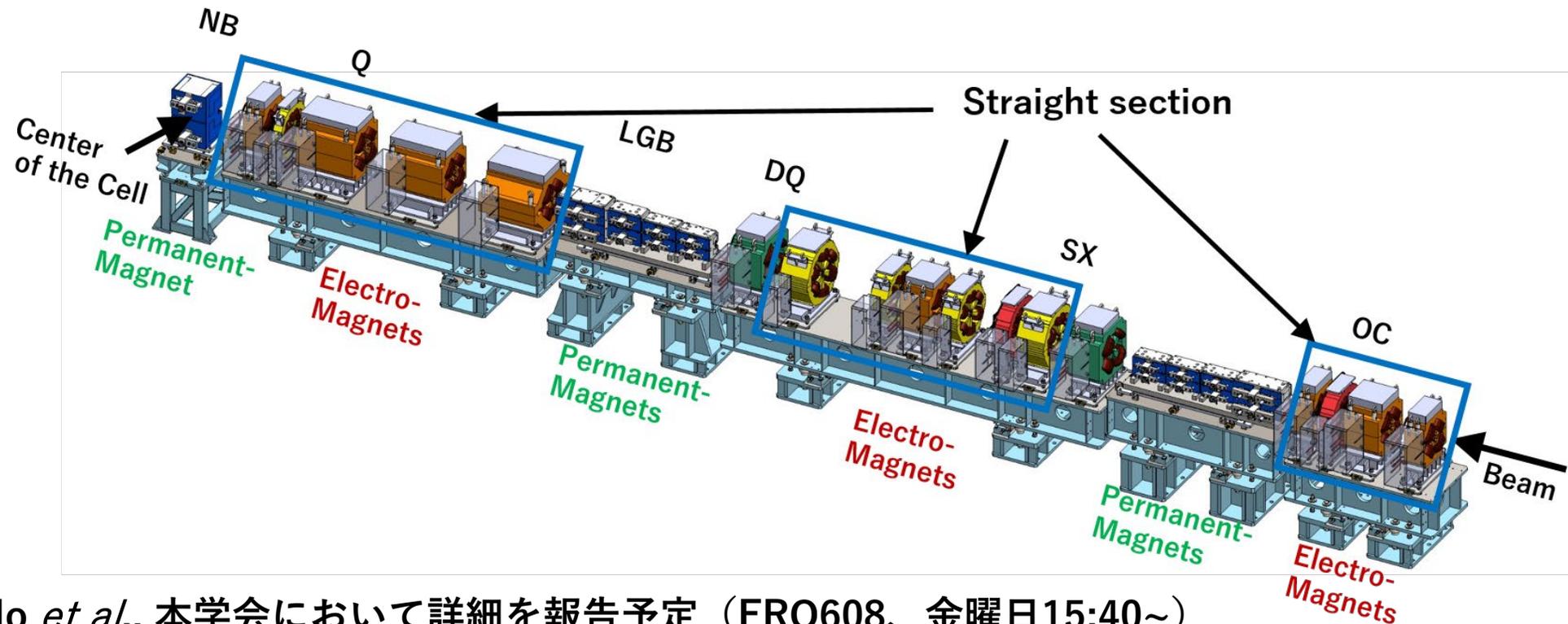


[4] T. Taniuchi *et al.*, 本学会において詳細を報告済 (WEP070)

2. Magnet Design (Electro-Magnet)

電磁石共通仕様

- 0.5mm 厚の電磁鋼板を積層して鉄芯形成 → ステアリング磁場高速設定に対応
- ヨーク底面に磁石位置調整機構を設置
- 各セルで線対称位置に設置される電磁石は直列に接続、さらに全ノーマルセルで直列に接続して1台の電源で励磁[5]。



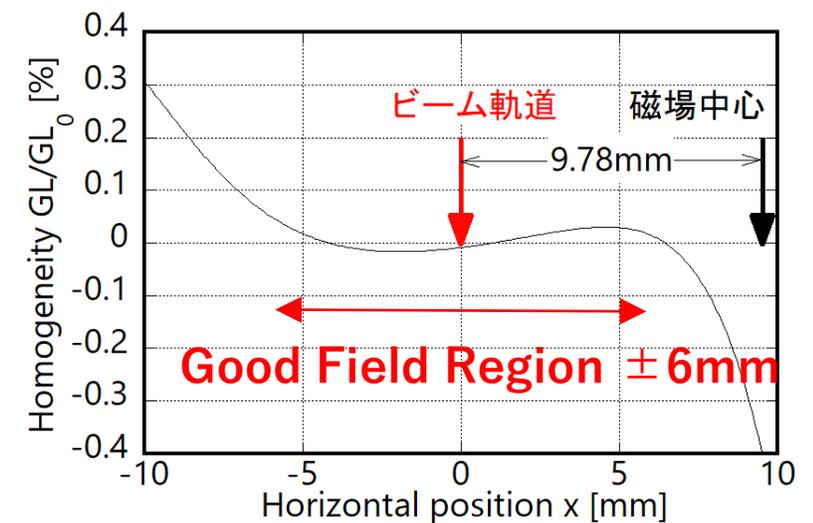
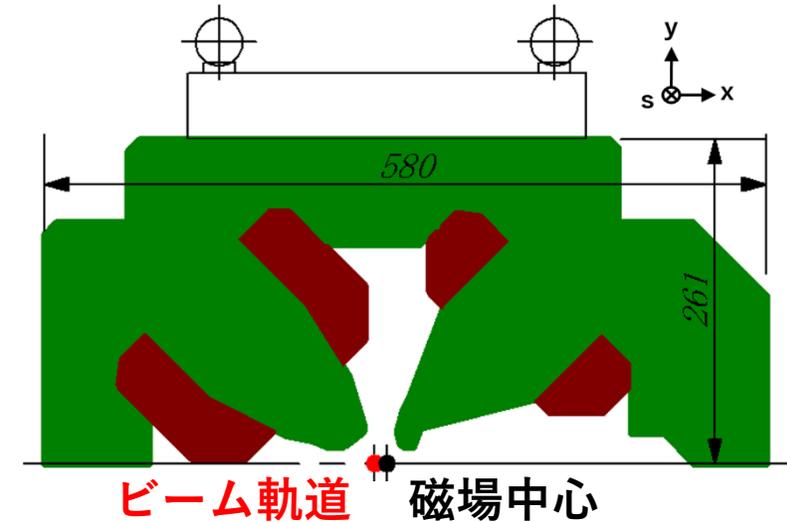
[5] C. Kondo *et al.*, 本学会において詳細を報告予定 (FRO608、金曜日15:40~)

2. Magnet Design (Electro-Magnet)

Dipole-Quadrupole combined function magnet (DQ)

- 四極成分／二極成分の割合が比較的高い
 - 四極状磁極形状採用
 - 磁場中心からオフセットした位置にビームを通す
- ビーム位置での四極成分均一度の改善
 - 左右非対称磁極採用
- 製作、磁場測定、アライメントの簡便化
 - ビーム軌道に沿った形状ではなく、直線形状採用

	DQ
Number/cell	4
Maximum field	0.26T-23.8T/m
Effective length	0.35m
Gap/Bore dia.	22mm
Type	Electromagnet

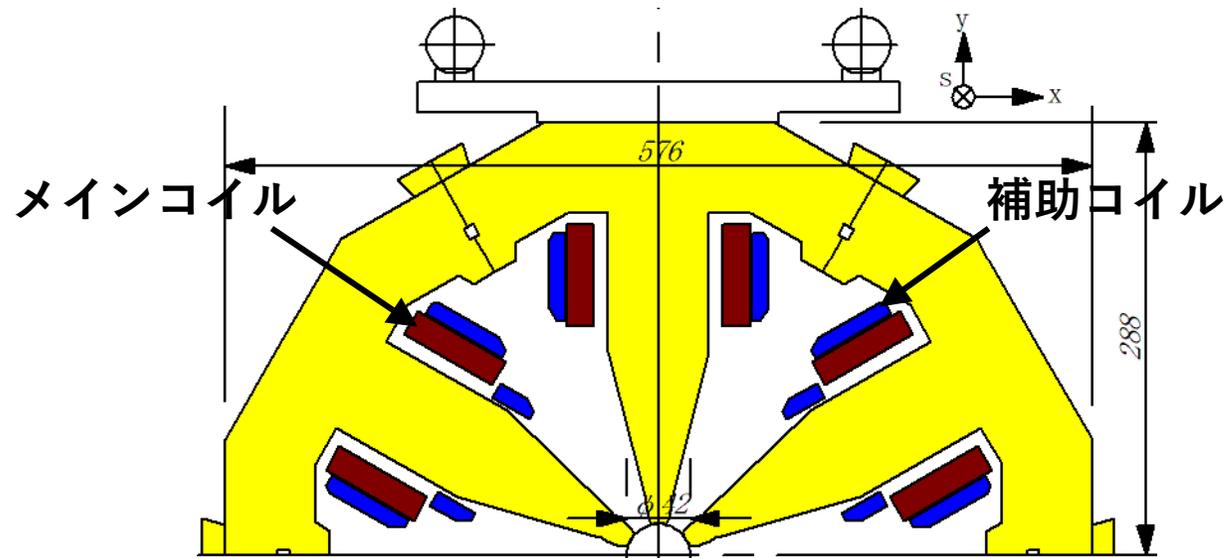


上側鉄芯断面図(上), 四極成分均一度(下)

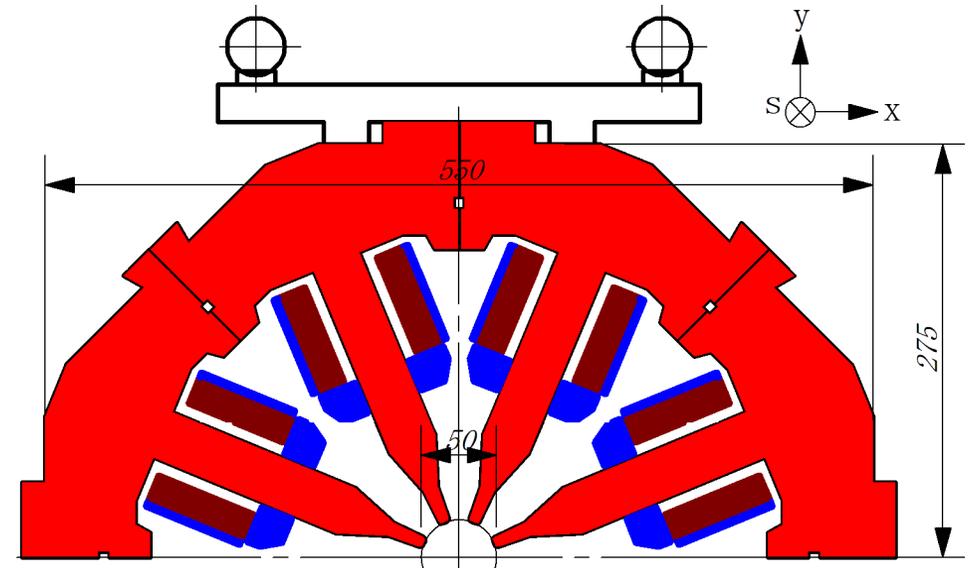
2. Magnet Design (Electro-Magnet)

Multipole magnet (Q, SX, OC)

- 高磁場勾配(Q:55T/m, SX:3kT/m², OC:100kT/m³)を達成するため、狭いボア径
- 過度なパッキングを避けるため、単独ステアリング排除
 - SX, OC に補助コイル設置、同時に水平、垂直方向ステアリング磁場を発生
(SX : 6 台/セル、0.15~0.45mrad、OC : 2 台/セル、0.20mrad)
 - OC は補助コイルの接続方向変更でスキュー四極磁場に切替え可能
(2 台/セル、0.20mrad or 43.5mT)



典型的六極電磁石の上側鉄芯断面図

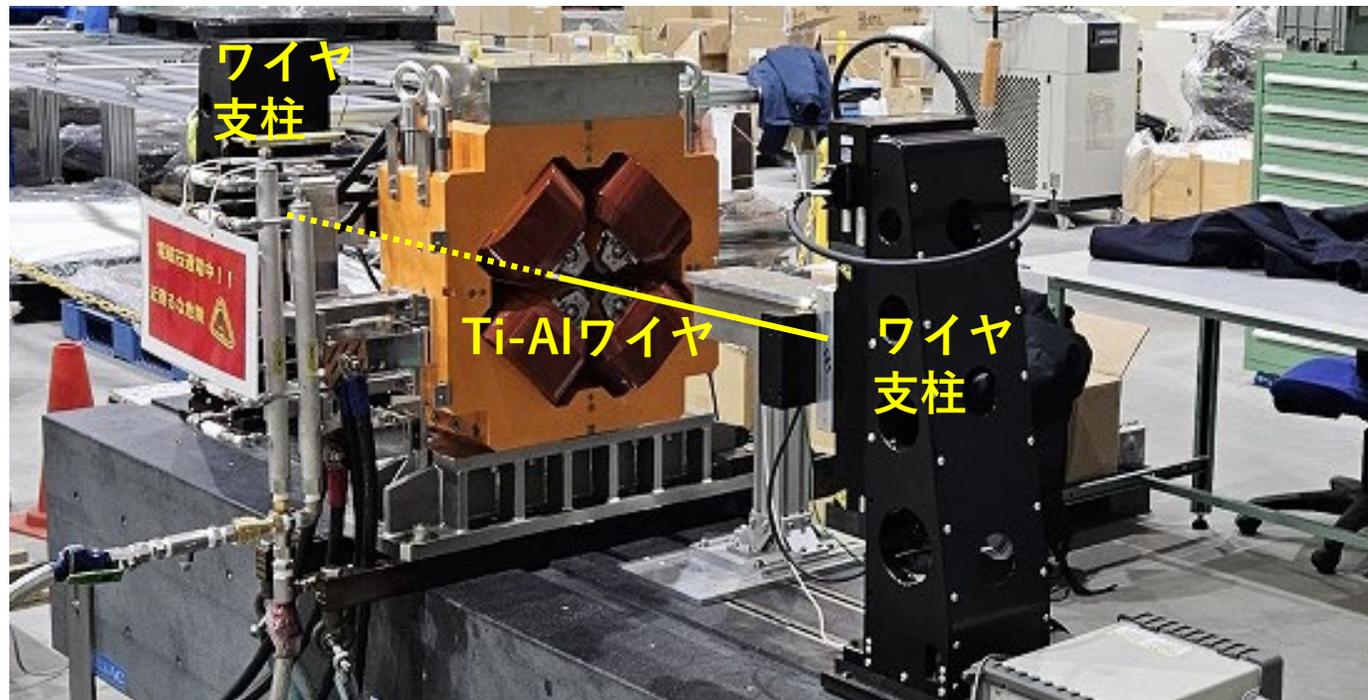


典型的八極電磁石の上側鉄芯断面図

2. Magnet Design (SSW)

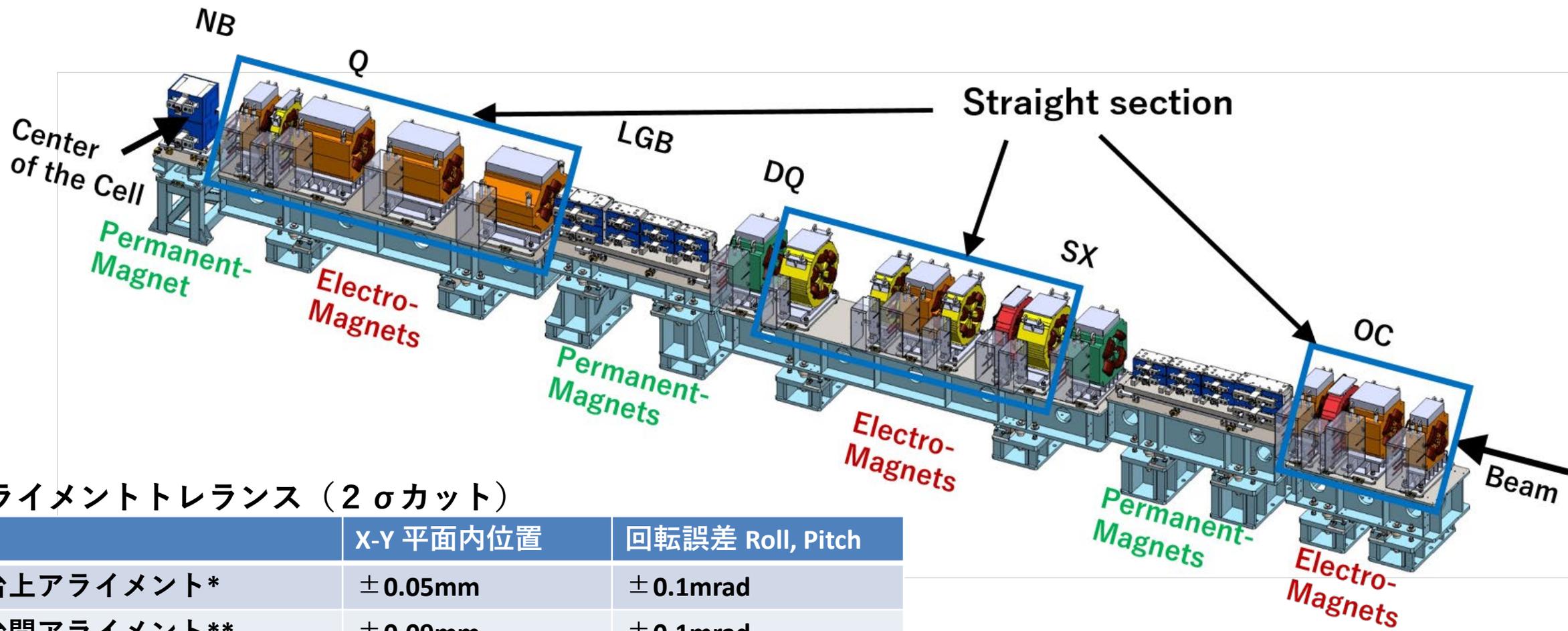
Single Stretched Wire (SSW)[6]

- DQ, Q, SX, OC の積分磁場勾配、励磁特性、多極成分は SSW で測定
 - 狭いボアの磁石にも対応可能
- 軸方向に張ったワイヤを磁場中で移動、誘導起電力から積分磁束密度分布を評価
- 積分磁場勾配の個体差仕様($< \pm 0.4\%$)、G.F.R.内の均一度仕様($< \pm 0.1\%$)を確認



[6] G. Le Bec *et al.*, PRAB, 15, 012401 (2012).

3. Alignment Scheme



アライメントトレランス (2σカット)

	x-y 平面内位置	回転誤差 Roll, Pitch
架台上アライメント*	±0.05mm	±0.1mrad
架台間アライメント**	±0.09mm	±0.1mrad

* 直線部のアライメント (OC は除く)

** 偏向部を挟むアライメント

3. Alignment Scheme

架台上アライメントの目標精度

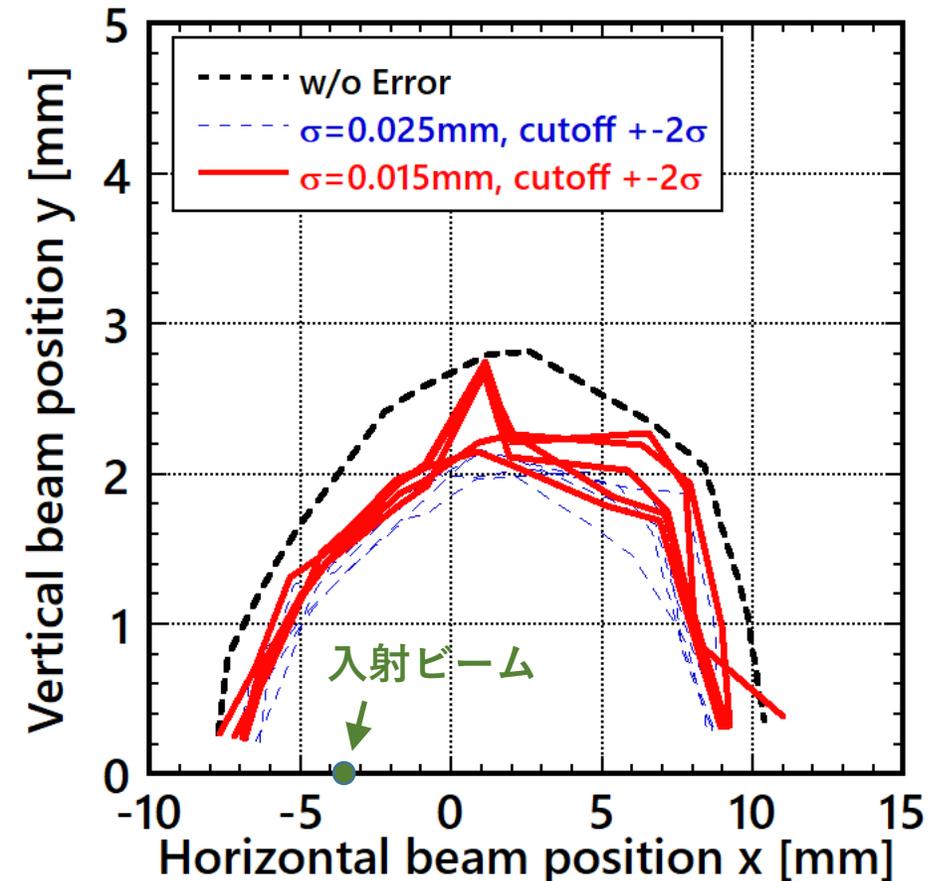
ダイナミックアパーチャ拡大のため、

目標精度は $< \pm 0.01\text{mm}$!

→ Vibrating Wire Method (VWM) を適用

Cf. VWM によるアライメント精度[7]

- ・ 磁場中心測定再現性： $\sigma < 0.1\ \mu\text{m}$
- ・ ワイヤ設置前後の測定再現性： $\sigma < 1.7\ \mu\text{m}$

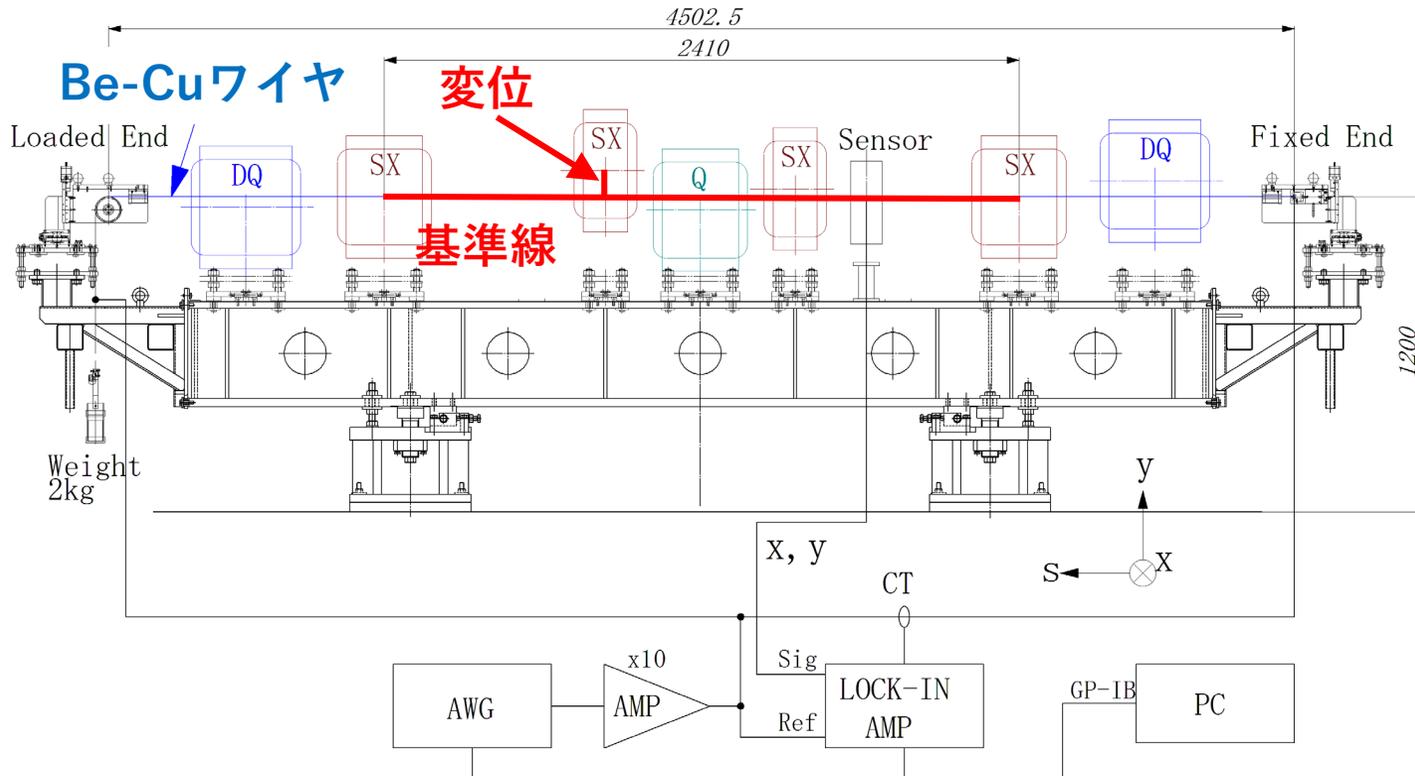


入射点でのダイナミックアパーチャ

3. Alignment Scheme

VWM の原理

- 軸方向に張ったワイヤに共鳴周波数で交流通電し、ワイヤを強制振動
 - アライメント対象磁石だけ励磁し、ワイヤの振幅分布から磁場中心を検出
- 直線部両端磁石の磁場中心を結ぶ直線 ≡ “**基準線**”
- 中間磁石の磁場中心と基準線との差 ≡ “**変位**” 変位を補正するよう磁石位置調整

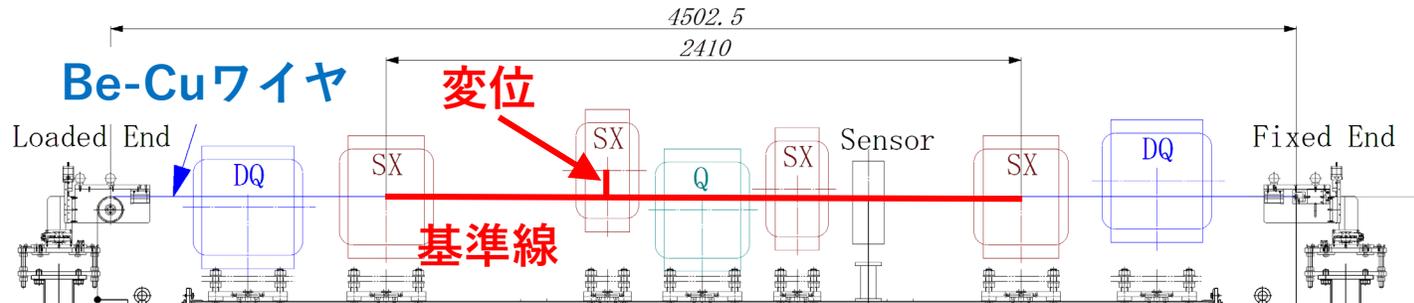


[7] K. Fukami *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 90, 054703 (2019).

3. Alignment Scheme

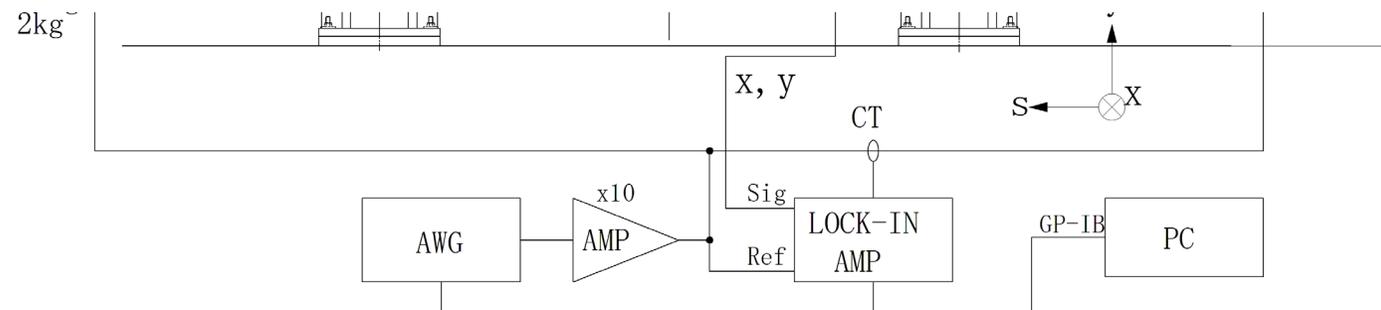
VWM の原理

- 軸方向に張ったワイヤに共鳴周波数で交流通電し、ワイヤを強制振動
 - アライメント対象磁石だけ励磁し、ワイヤの振幅分布から磁場中心を検出
- 直線部両端磁石の磁場中心を結ぶ直線 ≡ “**基準線**”
- 中間磁石の磁場中心と基準線との差 ≡ “**変位**” 変位を補正するよう磁石位置調整



磁場中心を一旦外部の基準点に移す作業は不要

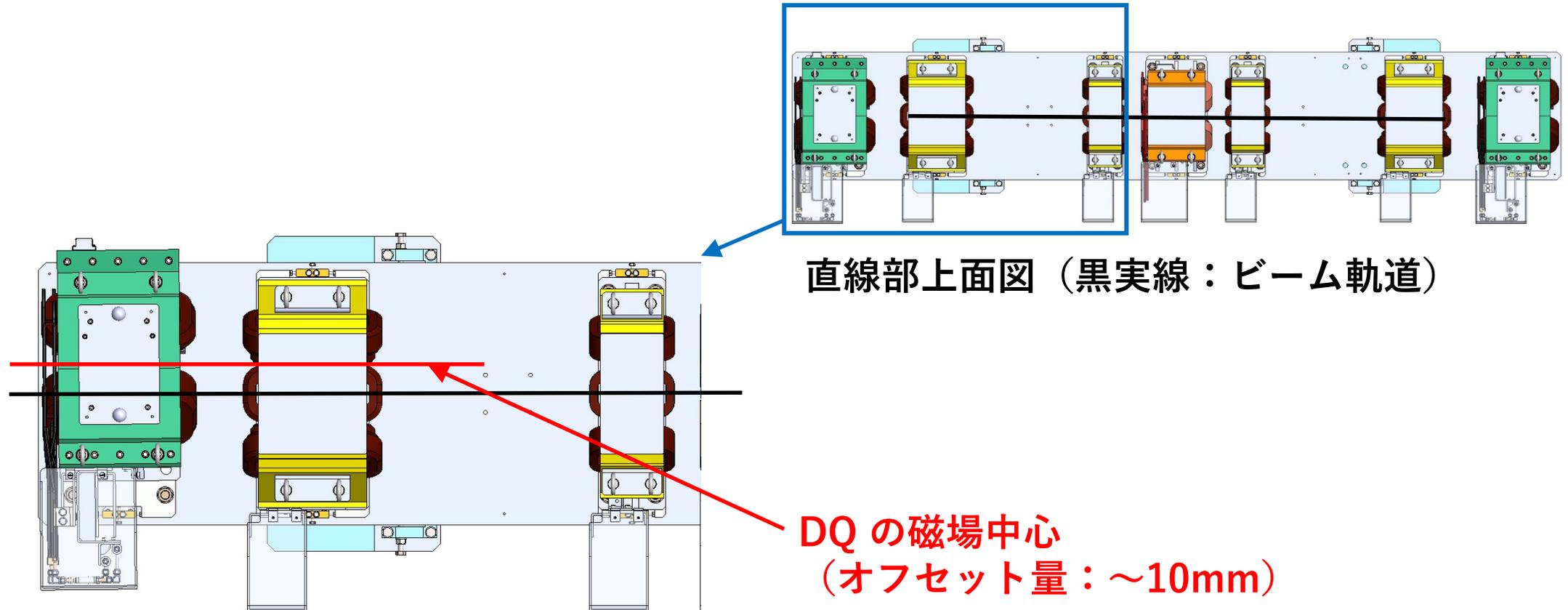
→ “基準点写し” の誤差を排除し、高精度アライメントが可能！



3. Alignment Scheme

DQ 電磁石のアライメント

- 直線部のアライメント終了後、ワイヤを DQ の設計オフセット位置に移動
- DQ の磁場中心がオフセット位置に一致するように、磁石位置を調整

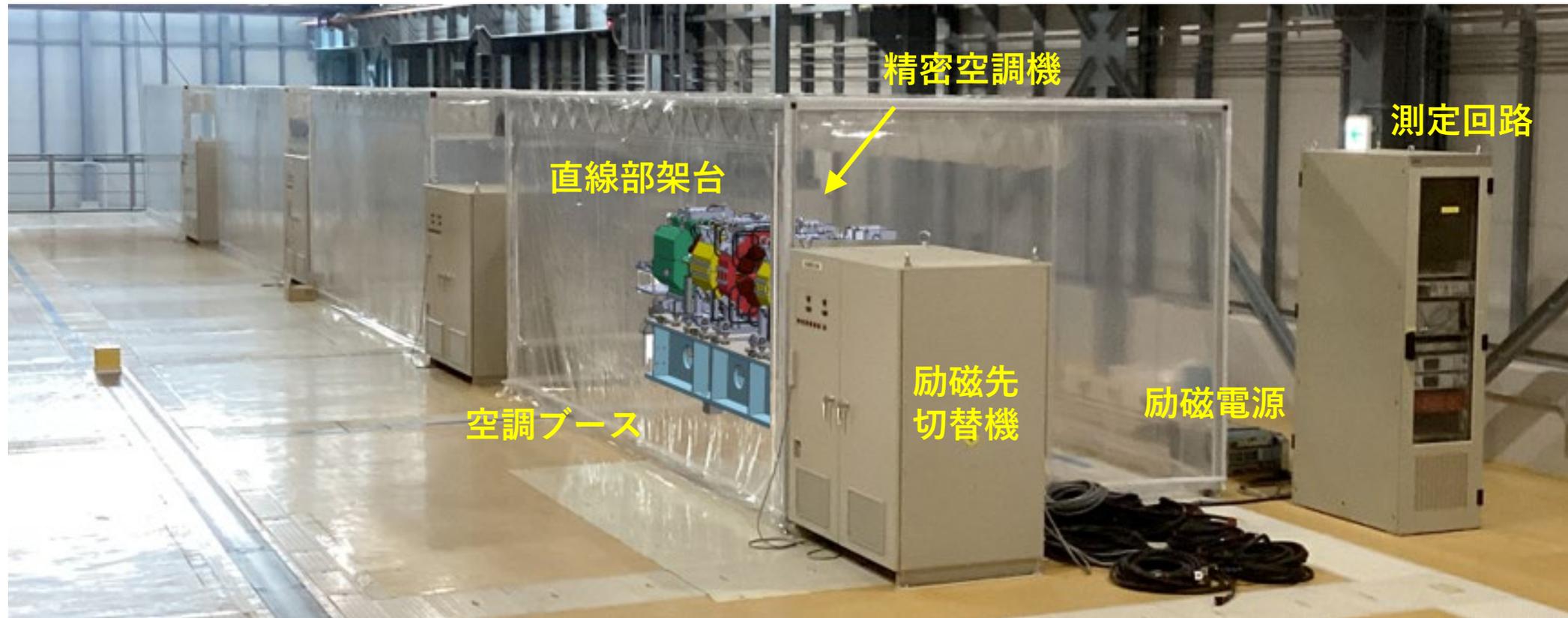


DQ 部（上図ではオフセット、DQ の傾きを設計の 5 倍に拡大表示）

3. Alignment Scheme

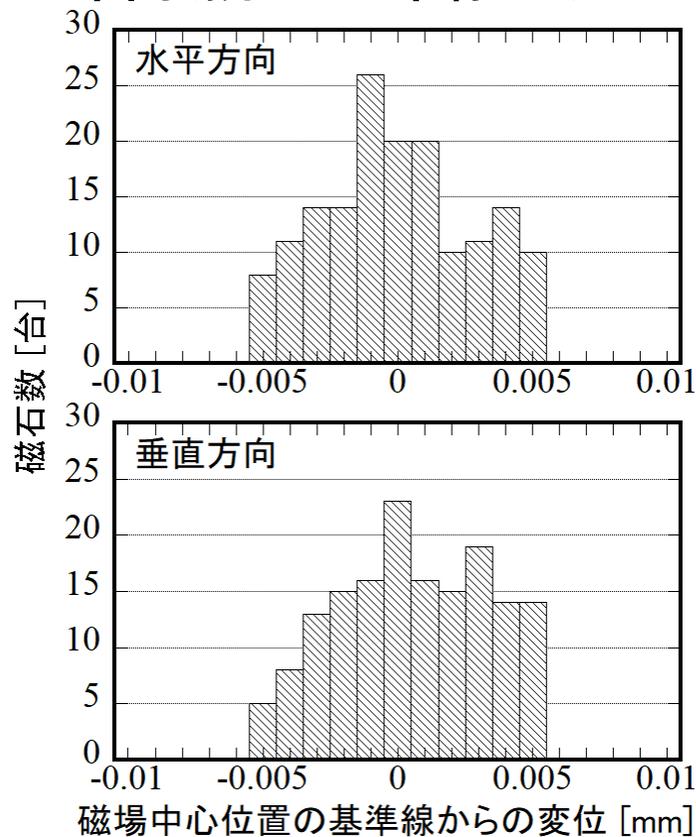
アライメント工程

- トンネル外の空調ブース内（気温 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ で制御）で架台上アライメント実施
- 4ブース並列で作業し、2セル/1か月のペース、2年間で完了予定
- トンネルへの輸送前後での磁石位置の変化はレーザトラッカで監視

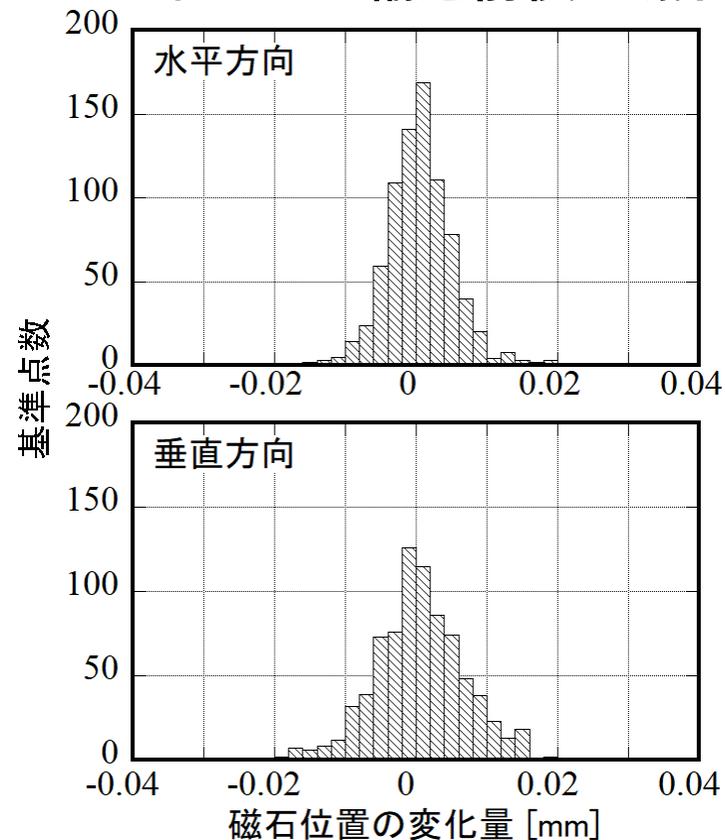


NanoTerasu での実績 [8]

中間磁石の基準線からの“変位”



トンネルへの輸送前後の磁石位置変化



変位：全ての磁石で $\leq \pm 0.005\text{mm}$

磁石位置変化：概ね $\leq \pm 0.02\text{mm}$

4. Other Developments (Transparent Beam Injection)

透明入射の実現

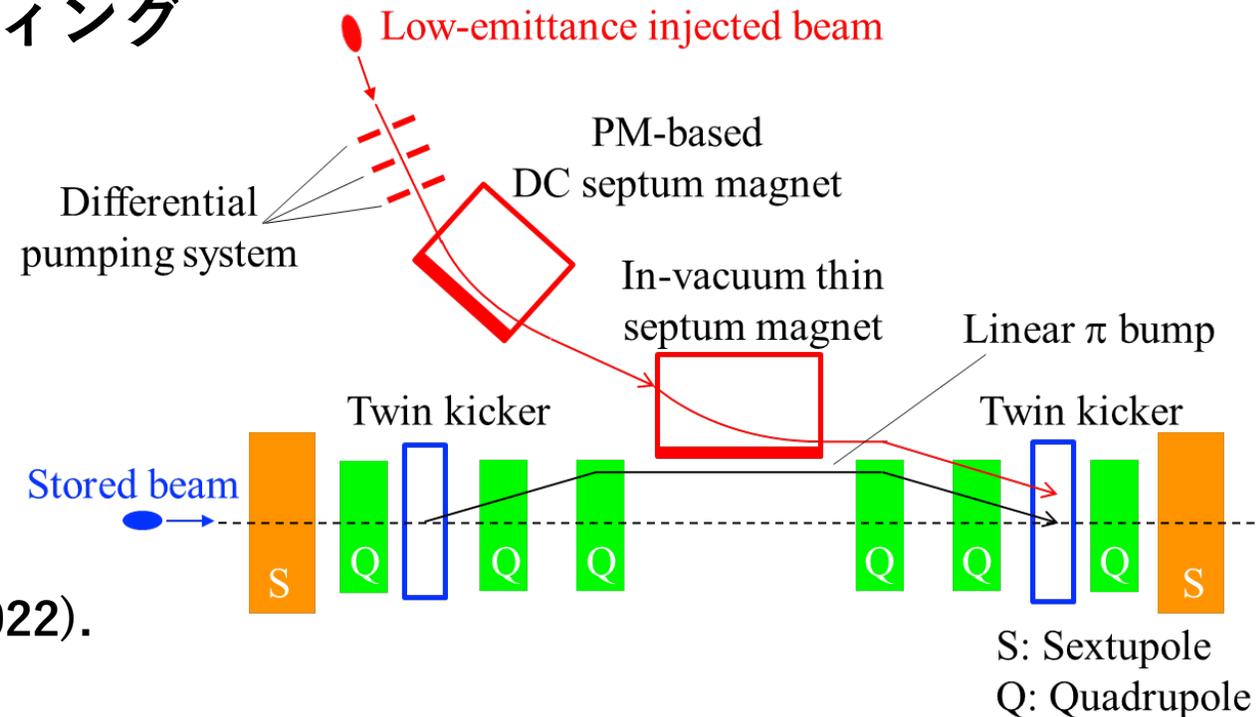
2台のキッカー磁石を位相間隔 π で配置、バンプ軌道を形成してビーム入射

➤ “パルス磁場波形の一致した”キッカー

- 特殊鉄芯ツインキッカー電磁石[9]
- キッカー部チェンバー内部の特殊コーティング

➤ “ビームを振動させない”セプタム

- 真空封止パルスセプタム電磁石[10]
- 永久磁石 DC セプタム[3]



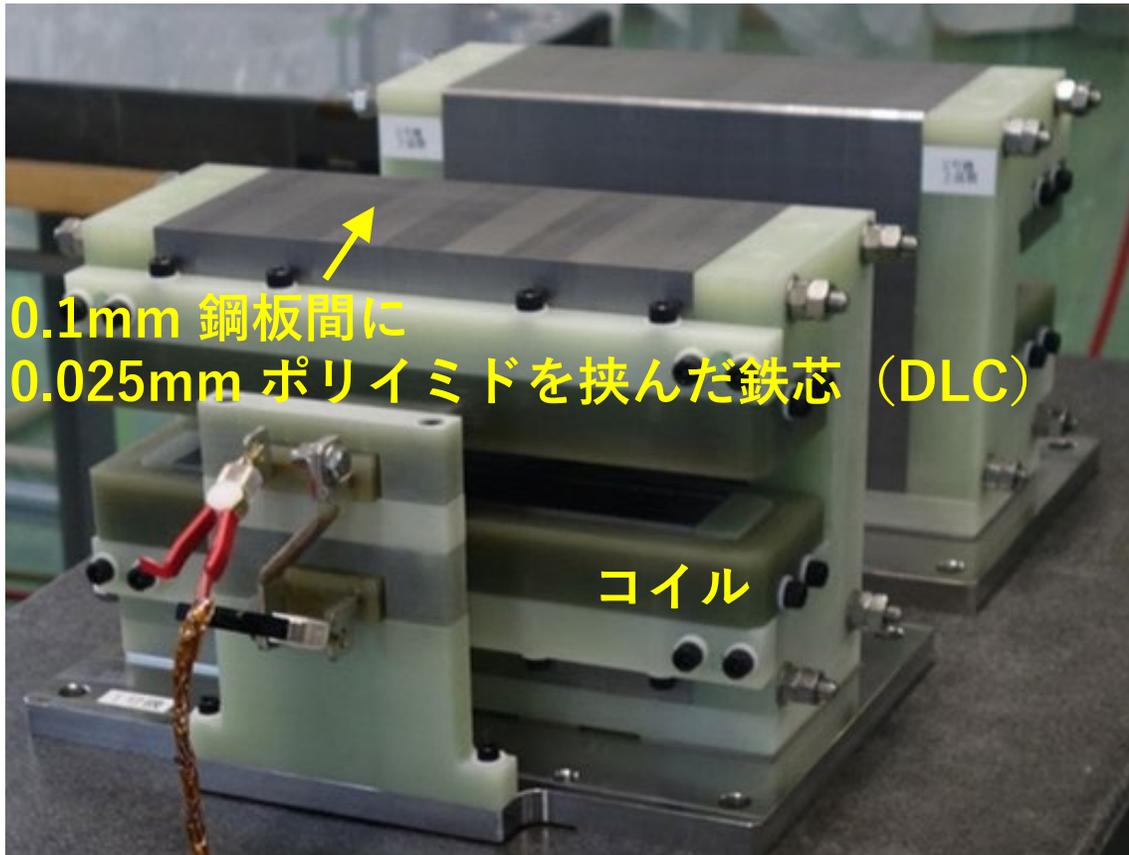
[9] K. Fukami *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 93, 023301 (2022).

[10] S. Takano *et al.*, submitted to PRAB.

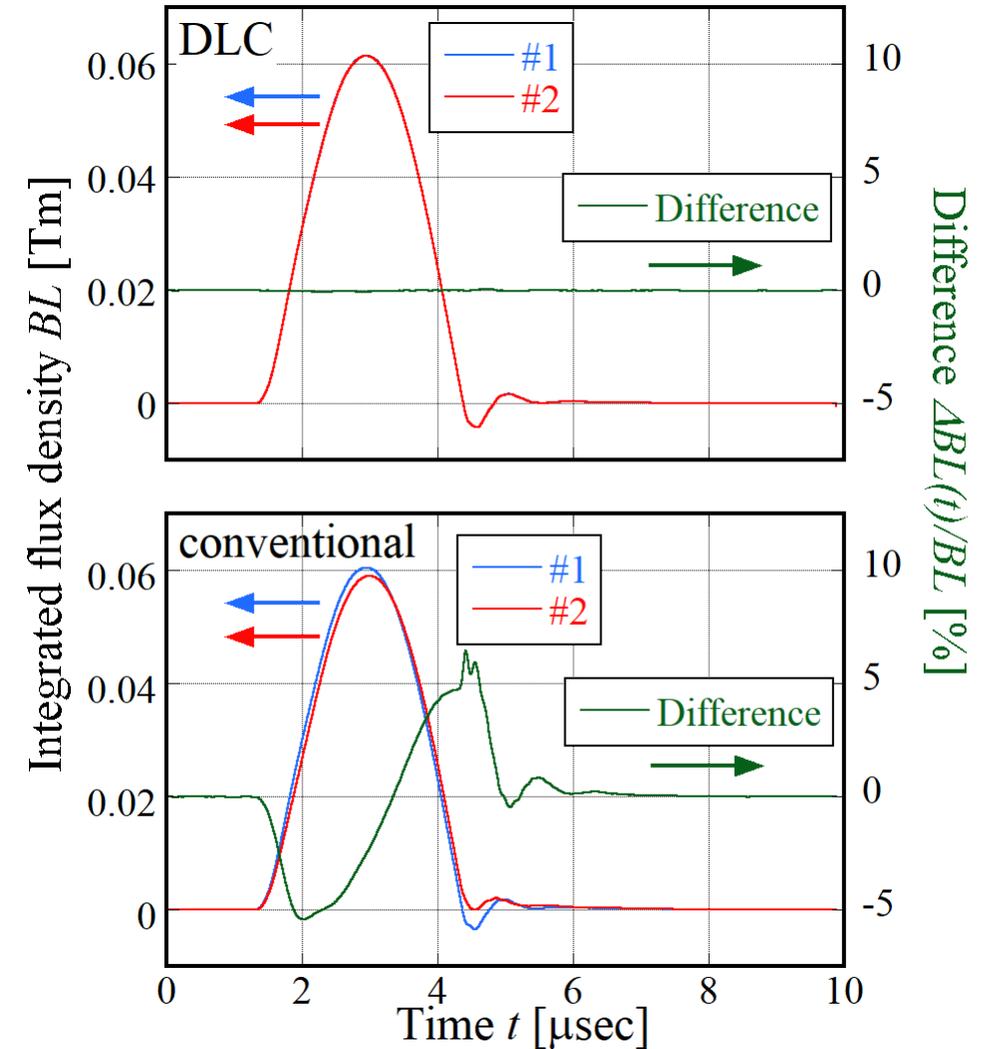
[3] T. Taniuchi *et al.*, PRAB, 23, 012401 (2020).

4. Other Developments (Transparent Beam Injection)

特殊鉄芯ツインキッカー電磁石[9]



Double-layered Lamination Core (DLC)
を用いたツインキッカー試作機

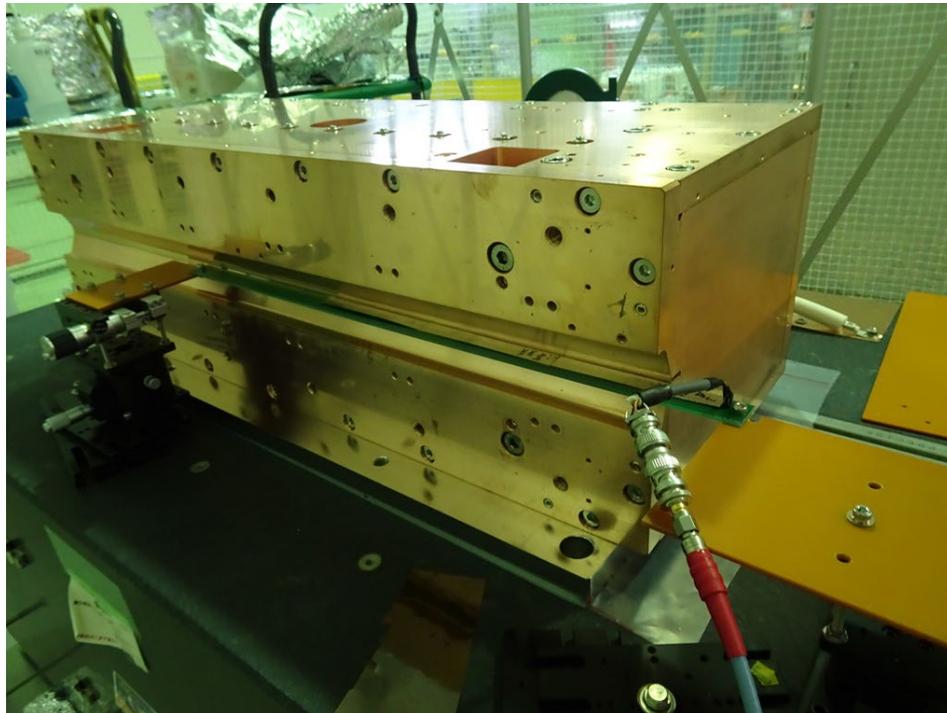


磁場波形全域の差分 < ± 0.06% !

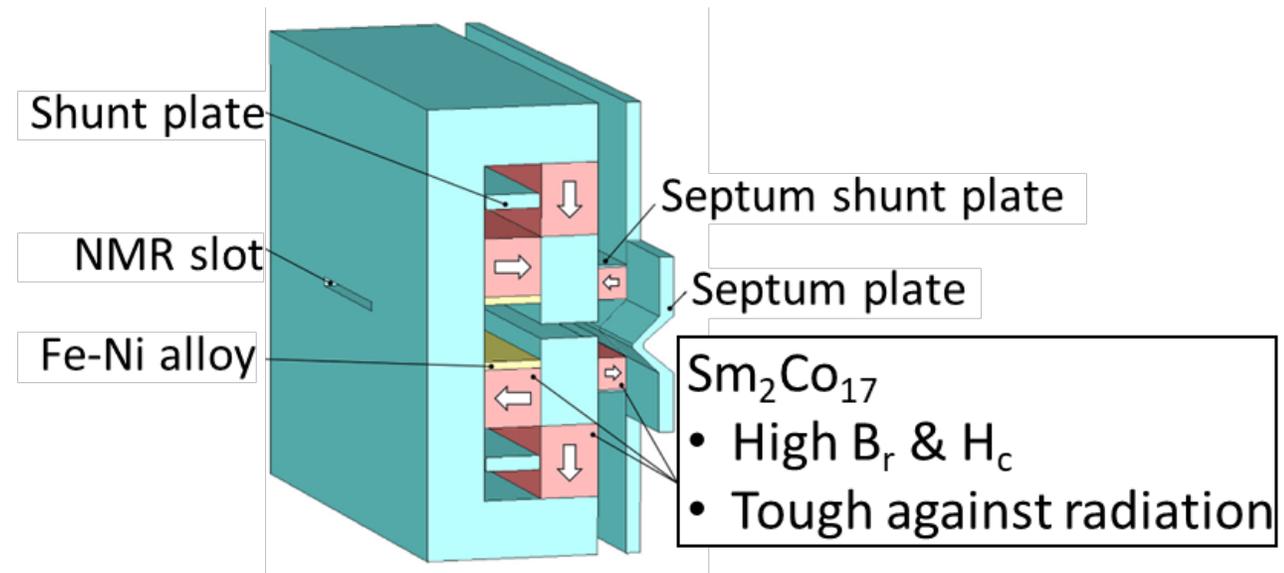
[9] K. Fukami *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 93, 023301 (2022).

4. Other Developments (Transparent Beam Injection)

真空封止パルスセプタム電磁石[10]、永久磁石 DC セプタム[3]



真空封止パルスセプタム試作機を用いた漏洩磁場測定



永久磁石 DC セプタム概念図

[10] S. Takano *et al.*, submitted to PRAB.

[3] T. Taniuchi *et al.*, PRAB, 23, 012401 (2020).

5. Summary

まとめと今後の課題

SPring-8-II 蓄積リング用磁石の仕様を決定し、先行ノーマルセルを構築した。今後、量産機の製作を進めるとともに、入射部、長直線部、及びマッチングセルの特殊磁石についての詳細検討を実施する。

精密設置を含めて加速器建設は 2028 年末まで行い、2029 年初頭からビームコミッションを開始する予定である。