

次世代放射光源のための DCセプタム電磁石開発

山口博史^{*A)}, 谷内努^{A)}, 青木毅^{A)}, 深見健司^{A,B,C)},
渡部貴宏^{A,B,C)}, 高野史郎^{A,B,C)}, 竹村育浩^{D)}

A) 高輝度光科学研究センター (JASRI)

B) 理化学研究所 放射光科学研究センター (RIKEN SPring-8 Center)

C) 量子科学技術研究開発機構 (QST)

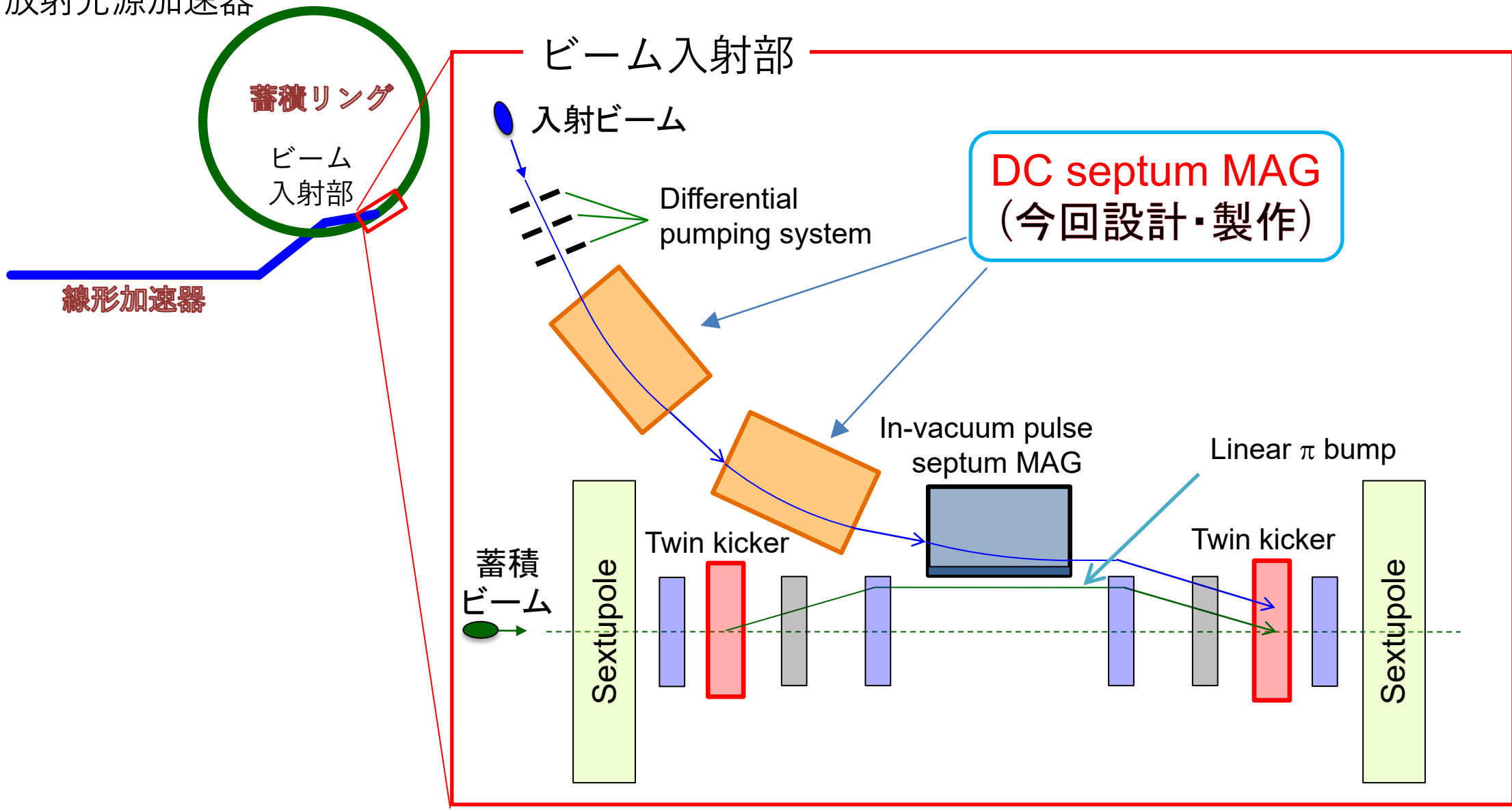
D) スプリングエイトサービス株式会社 (SES)

Outline

1. 次世代放射光源 入射部
 - DCセプタム電磁石 開発仕様
2. DCセプタム電磁石 設計
 - 従来設計の問題点
 - 本DCセプタム設計
3. DCセプタム電磁石 製作
 - 磁場測定結果
4. まとめ

次世代放射光源 入射部

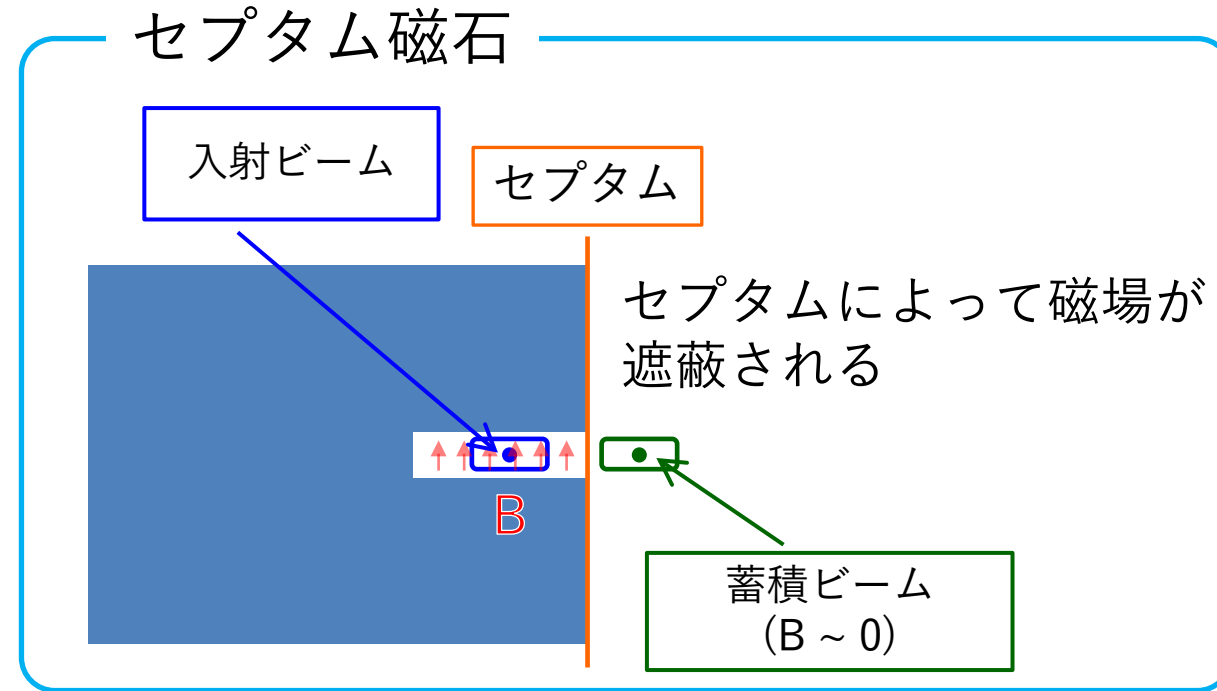
放射光源加速器



DCセプタム磁石の設計・製作を行う

DCセプタム電磁石への要求

- 入射ビームの軌道偏向のための強磁場
- 蓄積ビーム軌道への漏洩磁場の抑制



次世代放射光源での要求：高い利用率 (> 99%)

磁石電源の故障はダウンタイムの主な要因の一つ

- コイルの電流密度増加は、電源、コイルの故障を誘発
- パルス電源よりもDC電源の方が故障が少ない

本講演



2台のDC電源のセプタム磁石で入射ビームを蓄積ビームに近づけ、最終段のパルスセプタム電磁石で蓄積リングに入射する

DCセプタム電磁石 開発仕様

入射ビーム領域

磁場強度

- $B = 1.2$ [T]

有効磁場長

- $L = 0.4$ [m]

磁極間ギャップ高さ

- $h = 10$ [mm]

磁場均一度

- $< 0.1\%$ (サジッター内)

ビームエネルギーは、3 GeVを想定

$B \cdot L$ 積 : $B \cdot L = 0.48$ [T·m]

曲率半径 : $\rho = 8.333$ [m]

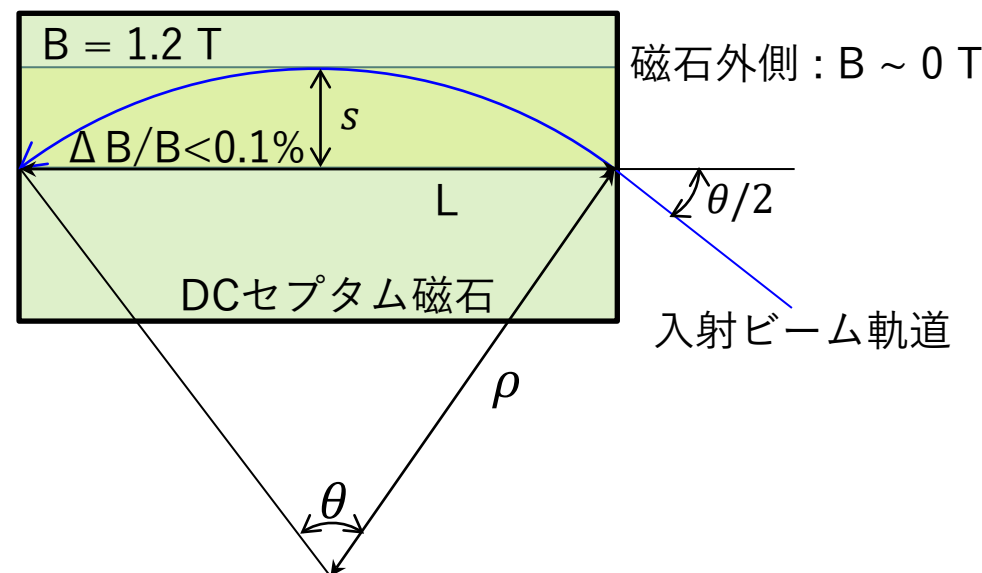
キック角 : $\theta = 48$ [mrad]

サジッター : $s = \rho \left[1 - \cos \frac{\theta}{2} \right]$
~ 2.4 [mm]

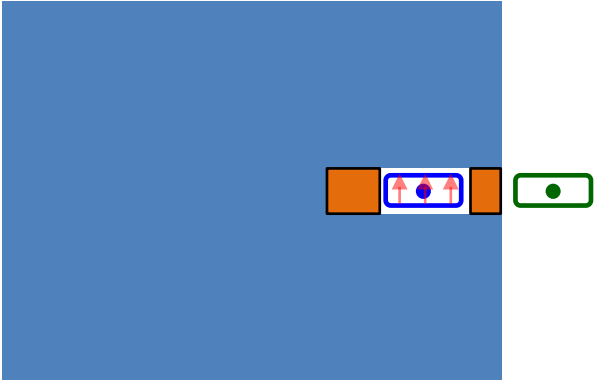
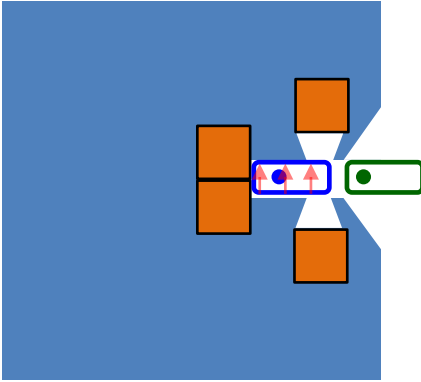
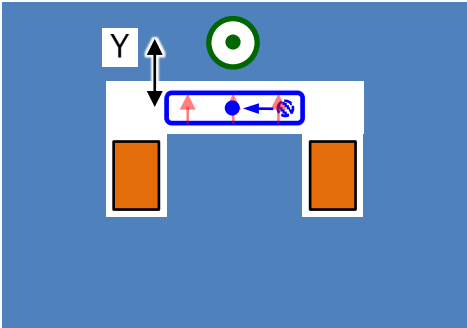


蓄積ビーム領域

- $B \lesssim 5 \times 10^{-5}$ [T] (地磁気レベル)
- 入射ビームとの最短距離は 57 mm



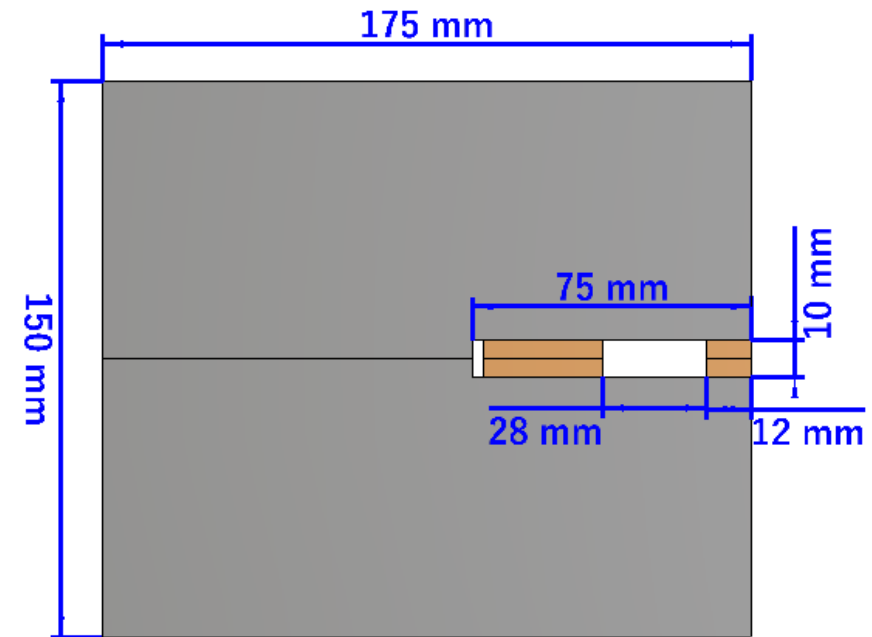
DCセプトラム タイプ・種類

タイプ	Direct-drive	Massless	Lambertson
形状			
特徴	<ul style="list-style-type: none"> コイルがセプトラムも兼ねる SPring-8でも採用 	偏向磁石と四極磁石が隣接する磁極構造 http://accelconf.web.cern.ch/e98/PAPERS/MOP01E.PDF	ヨークの中に開けた穴の中に蓄積ビームを通す https://www.aps.anl.gov/files/APS-sync/Isnotes/files/APS_2012261.pdf
利点	高い磁場均一度	セプトラムがないため磁石の放射化を抑えられる	セプトラムを薄くでき、漏れ磁場も小さい
課題点	コイル断面積が小さくなり消費電力が増加, 冷却が難しくなる	精密な磁極加工が漏れ磁場や磁場均一度に直結	<ul style="list-style-type: none"> 磁場均一度が低い 垂直方向オフセット分(上図「Y」)に相当するキッカー磁石が必要

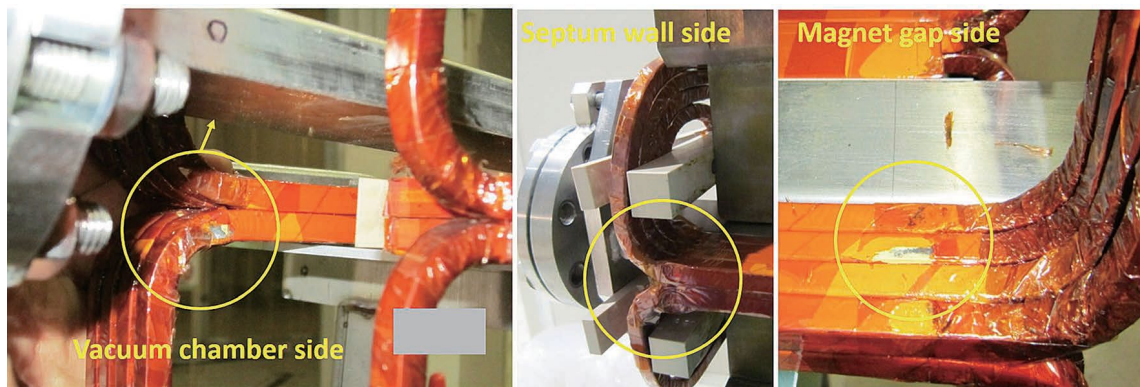
従来設計の問題点

Direct-driveタイプで設計した場合

- コイル電流 : 4780 A
- コイル断面積 : 120 mm²
⇒ コイル電流密度 : 80 A/mm²



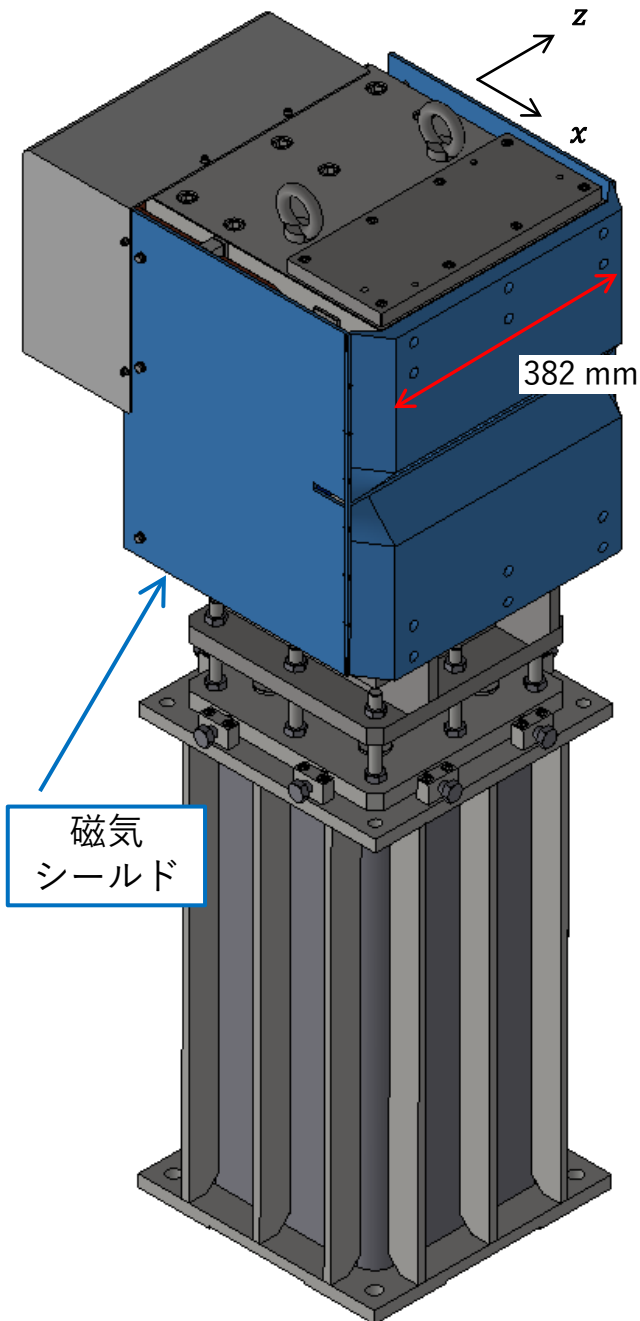
コイル電流密度が高いと故障を起こしやすくなる



- SPring-8 (~70 A/mm²)では、磁石電源の切/入でコイルの熱収縮/熱膨張が生じ、コイル絶縁層が擦れて破れ、地絡が発生
- 磁石電源の消費電力も膨大

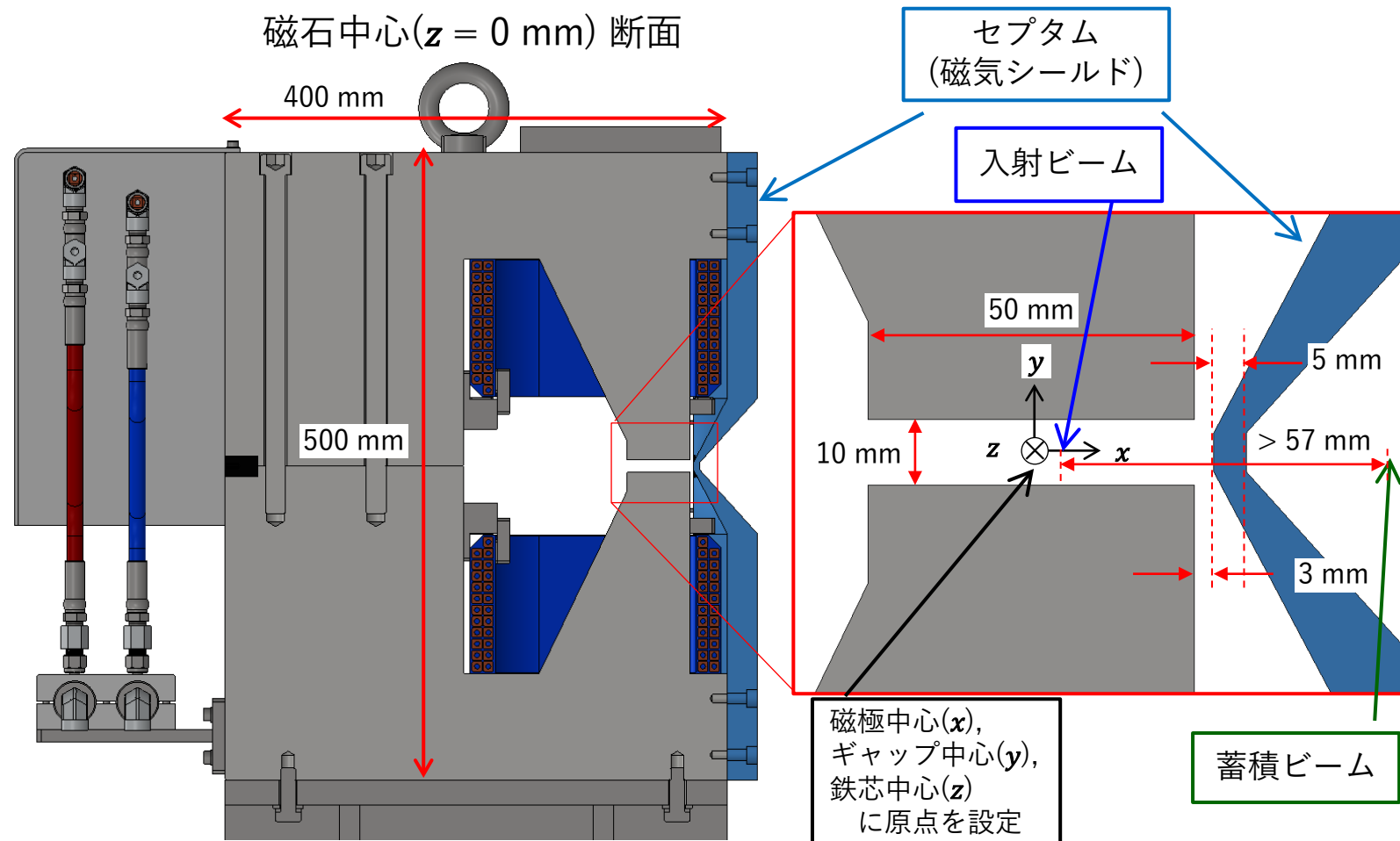
コイル電流密度を < 5 A/mm² に抑えたDCセプタムを開発する

DCセプトラム 設計

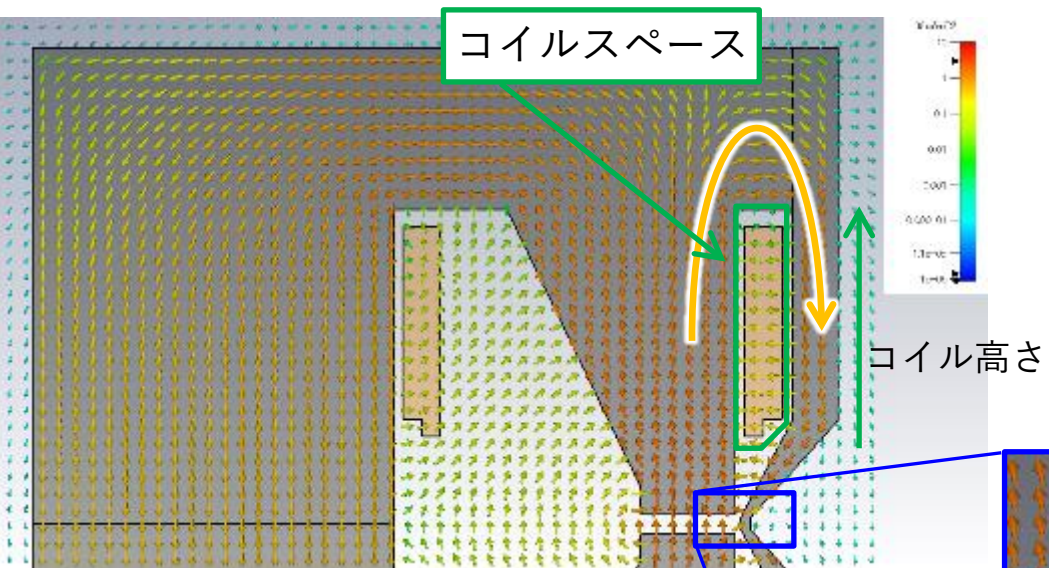


“<”の形状をした磁気シールドを設置

- コイル巻数を 2巻(Direct-driveタイプ) → 23巻に増やして電流密度を下げる

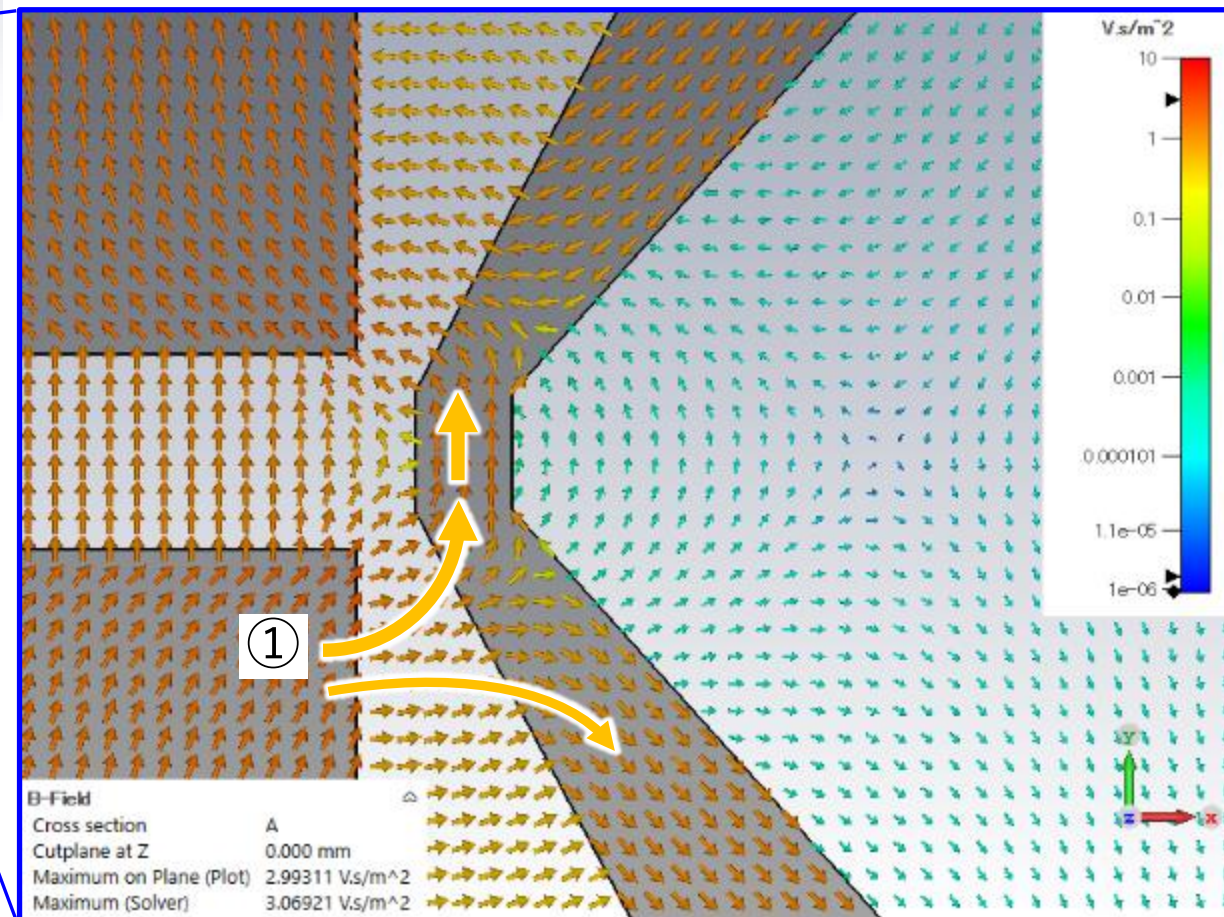


磁気回路の特徴

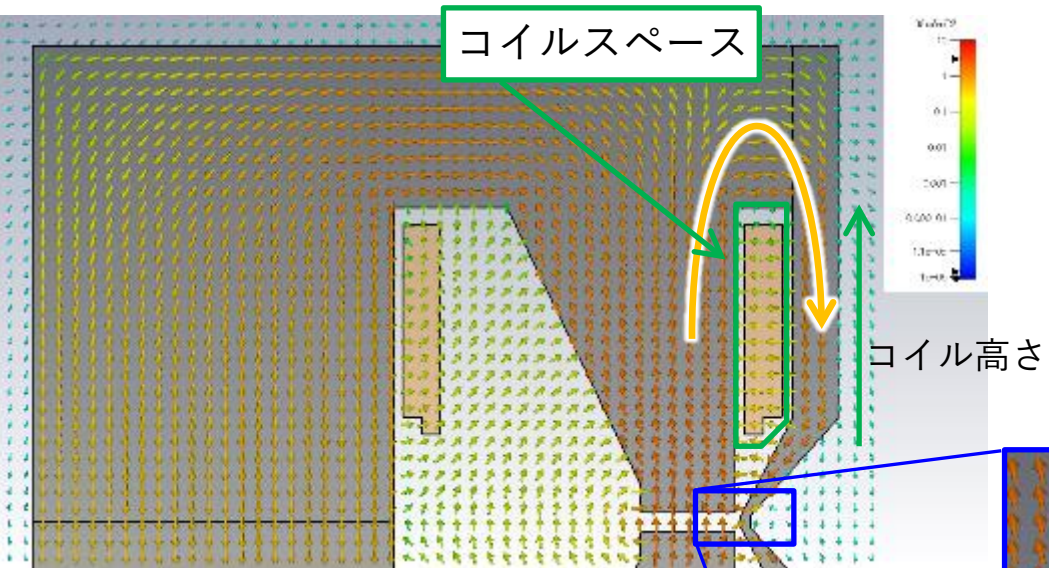


- ① 磁極間からの漏れ磁場を磁気シールドが吸収

磁気シールド形状を“<”にすることで、コイル断面を鉛直方向に伸ばすスペースを確保。



磁気回路の特徴

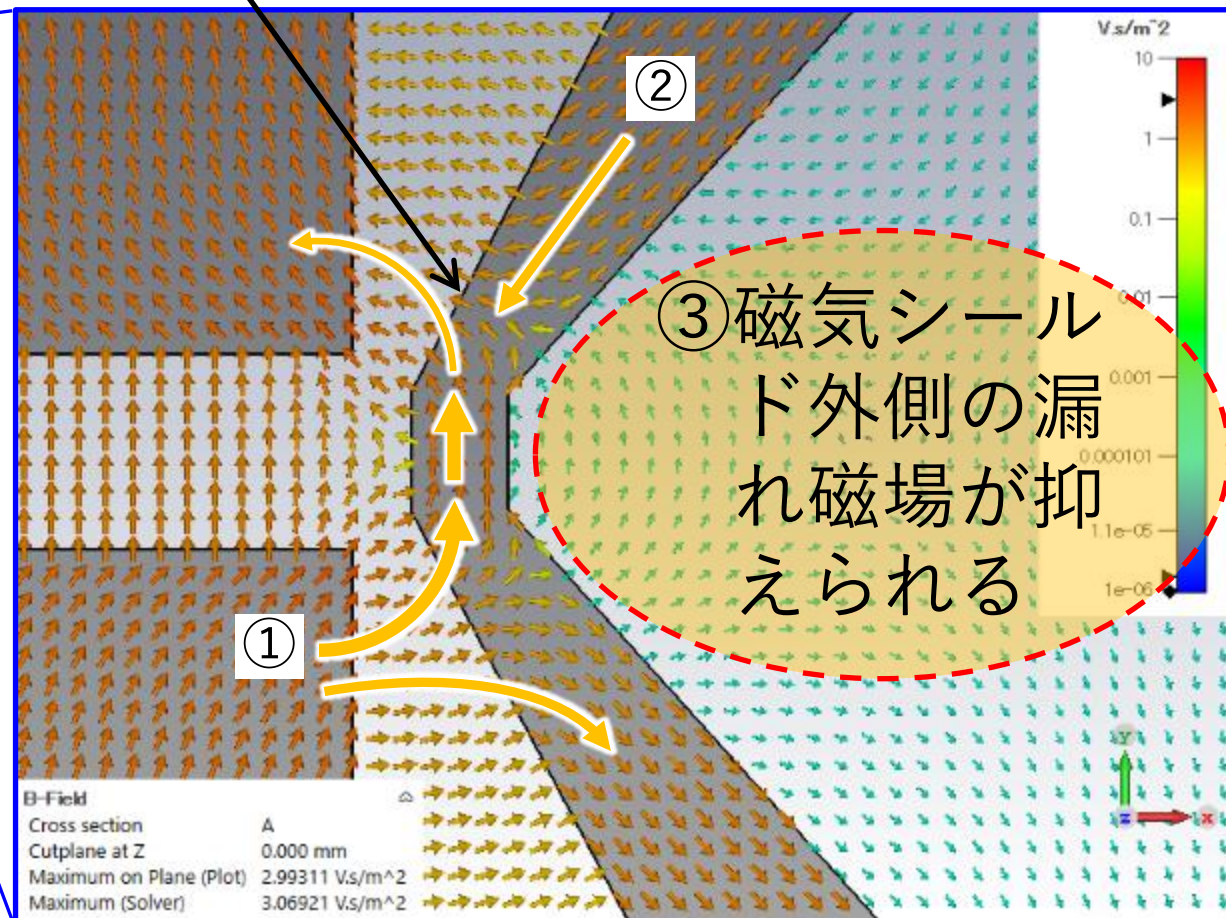


② 磁石上側ヨーク→磁気シールドを通して戻ってきた磁場が漏れ磁場を相殺

磁気シールドに吸収された漏れ磁場は、磁気シールドを通して戻ってきた磁場によって相殺されて、小さくなる



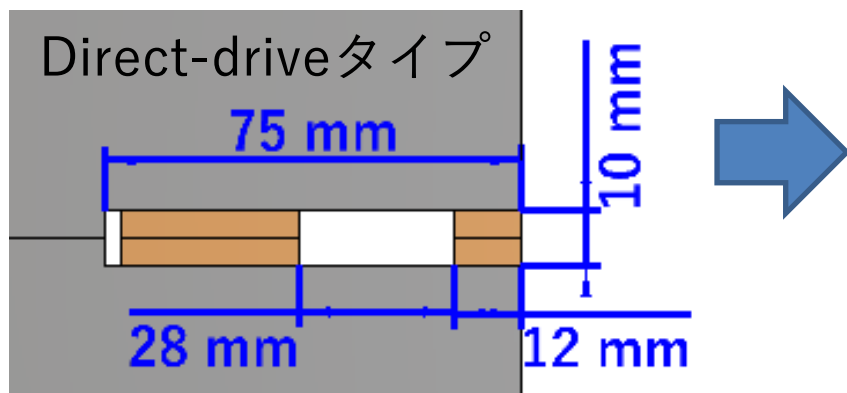
磁気シールドの厚みを薄くすることが可能になる



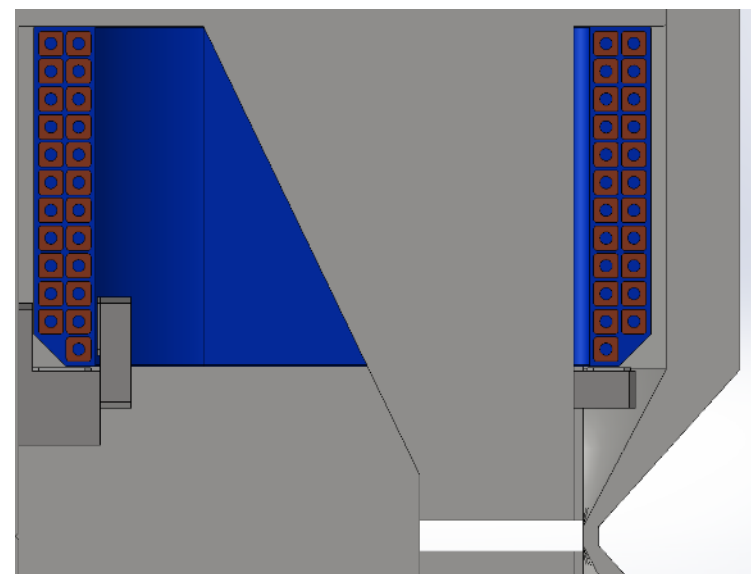
③ 磁気シールド外側の漏れ磁場が抑えられる

コイル

コイルの巻数を 2巻 → 23巻に増加
コイル断面積を増やすことで、
電流密度を抑える



本設計のDCセプタム電磁石



	コイル断面積 [mm×mm]	コイル電流 [A]	電流密度 [A/mm ²]	ジュール熱 [kW]
Direct-drive タイプ	10×12 (2巻)	4780	80	19
本設計の DCセプタム	110×20 (23巻)	232	4.5	1.1



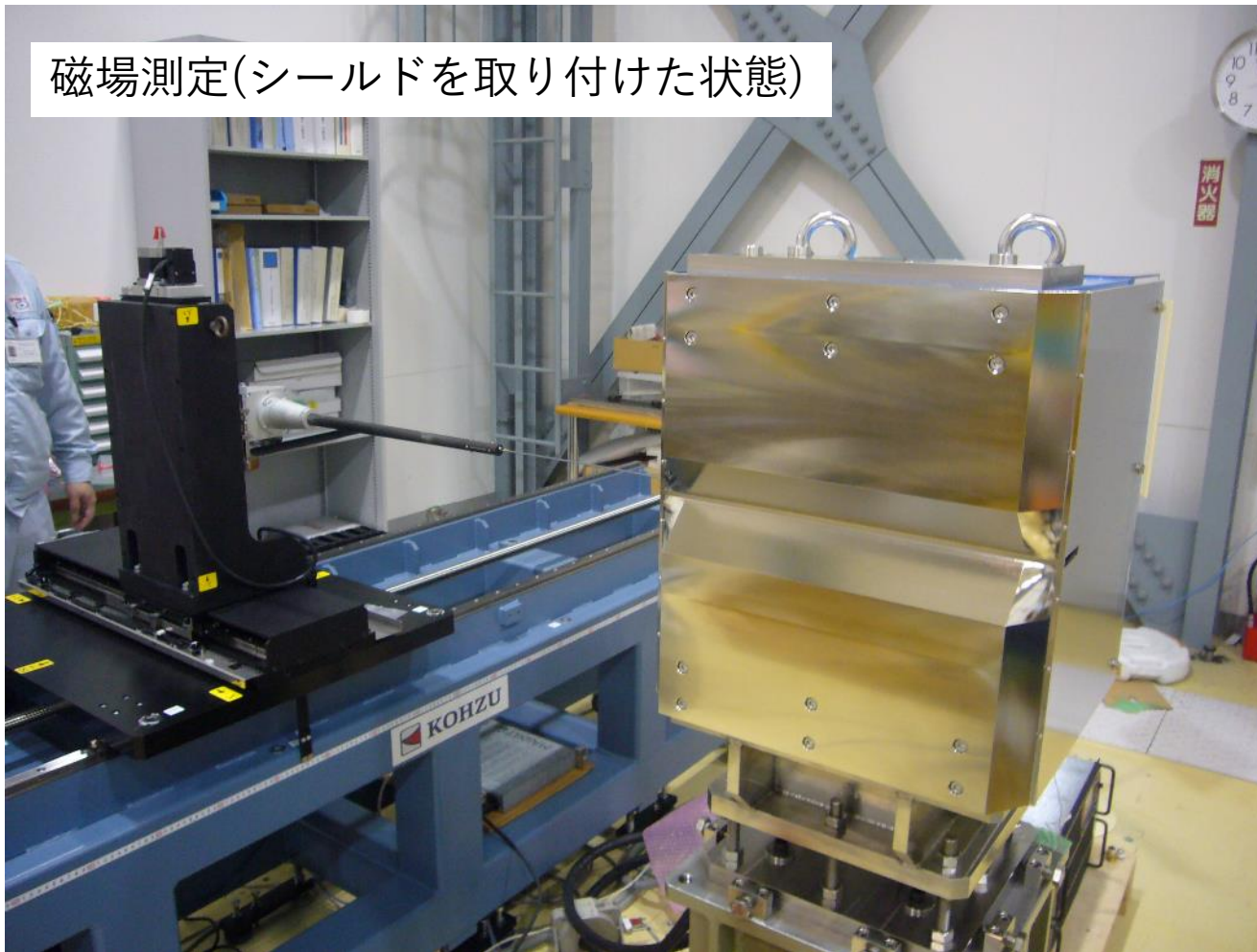
Direct-driveタイプと比較して、電流密度,消費電力は 1/17倍

製作・磁場測定

本設計のDCセプトラム電磁石を製作

1軸ホールセンサー(Lake Shore M460, MMT-6J18-VH-06)で磁場を測定

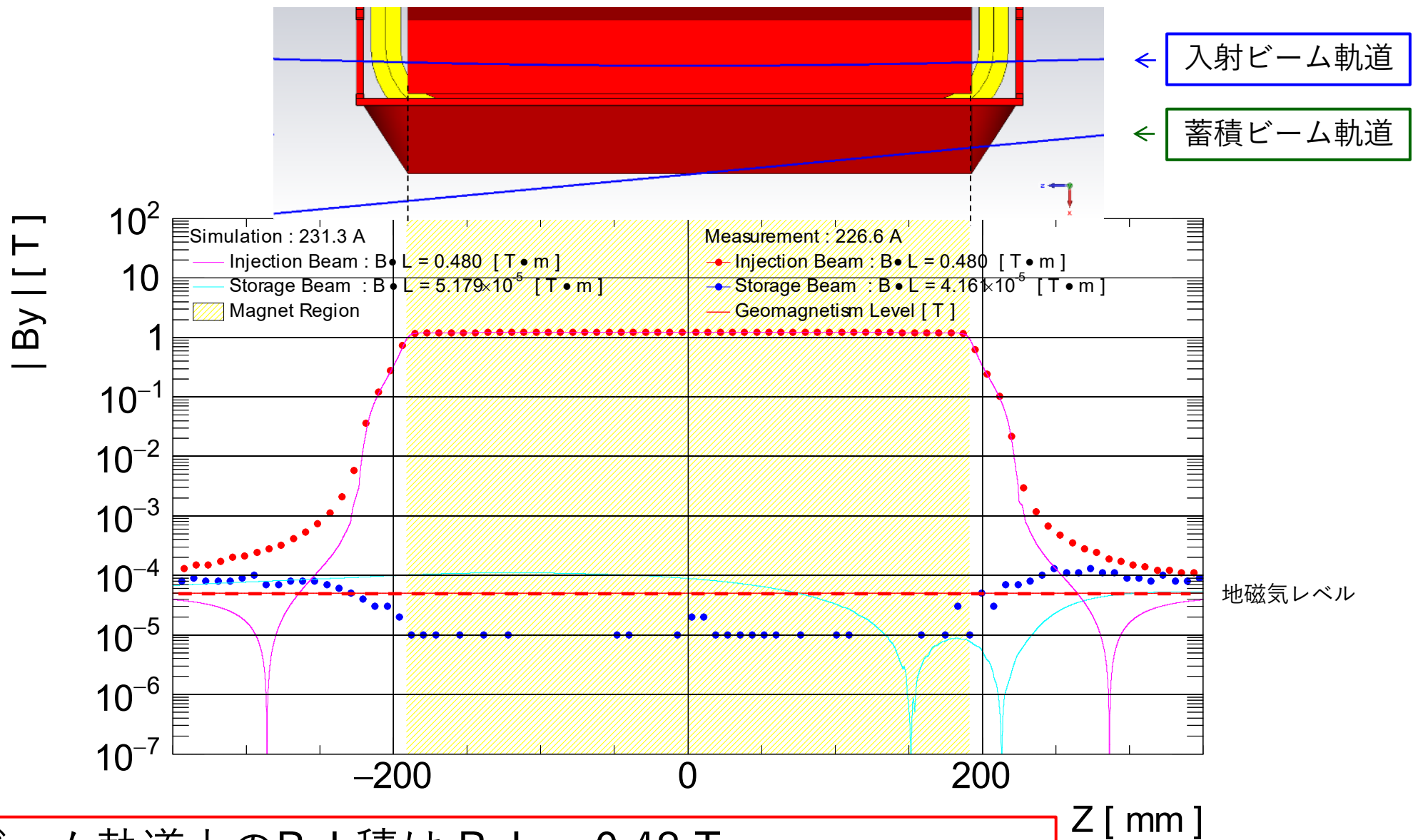
磁場測定(シールドを取り付けた状態)



シールドを取り外した状態



磁場分布 (ビーム軌道上)



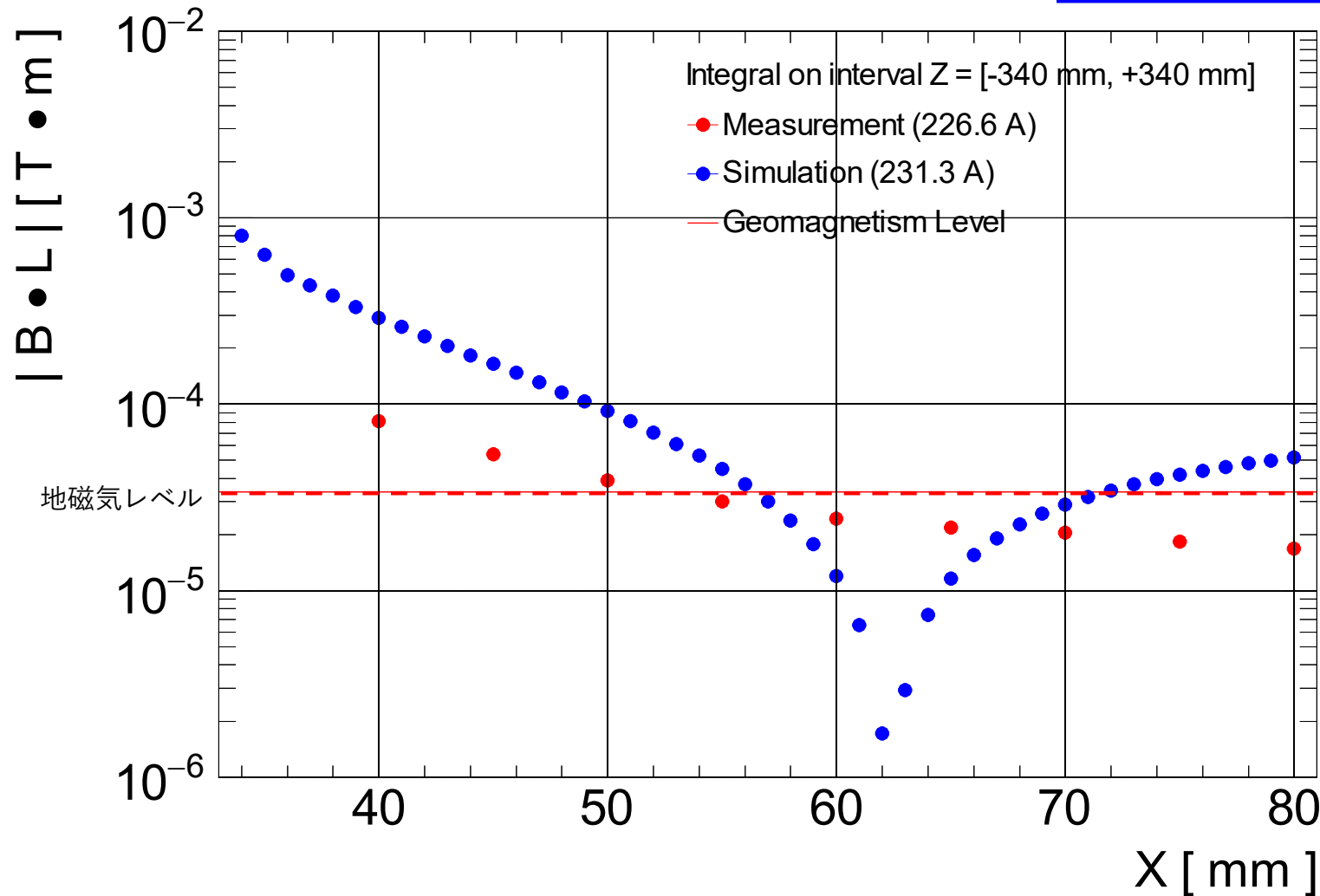
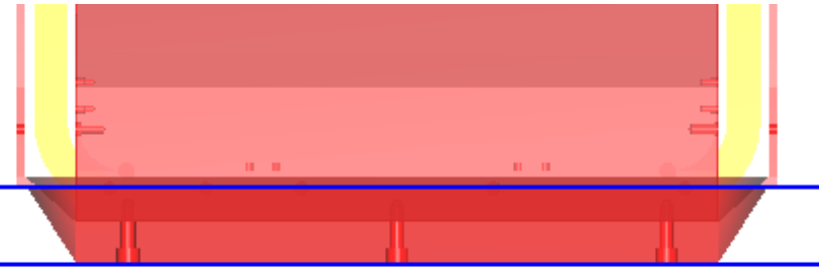
入射ビーム軌道上の $B \cdot L$ 積は $B \cdot L = 0.48$ T·m.
蓄積ビーム軌道上の磁場は地磁気レベルに抑えられている

漏れ磁場分布

蓄積ビーム軌道が変動した場合
シールド外側のZ方向BL積を評価

X = 34 mm

X = 80 mm

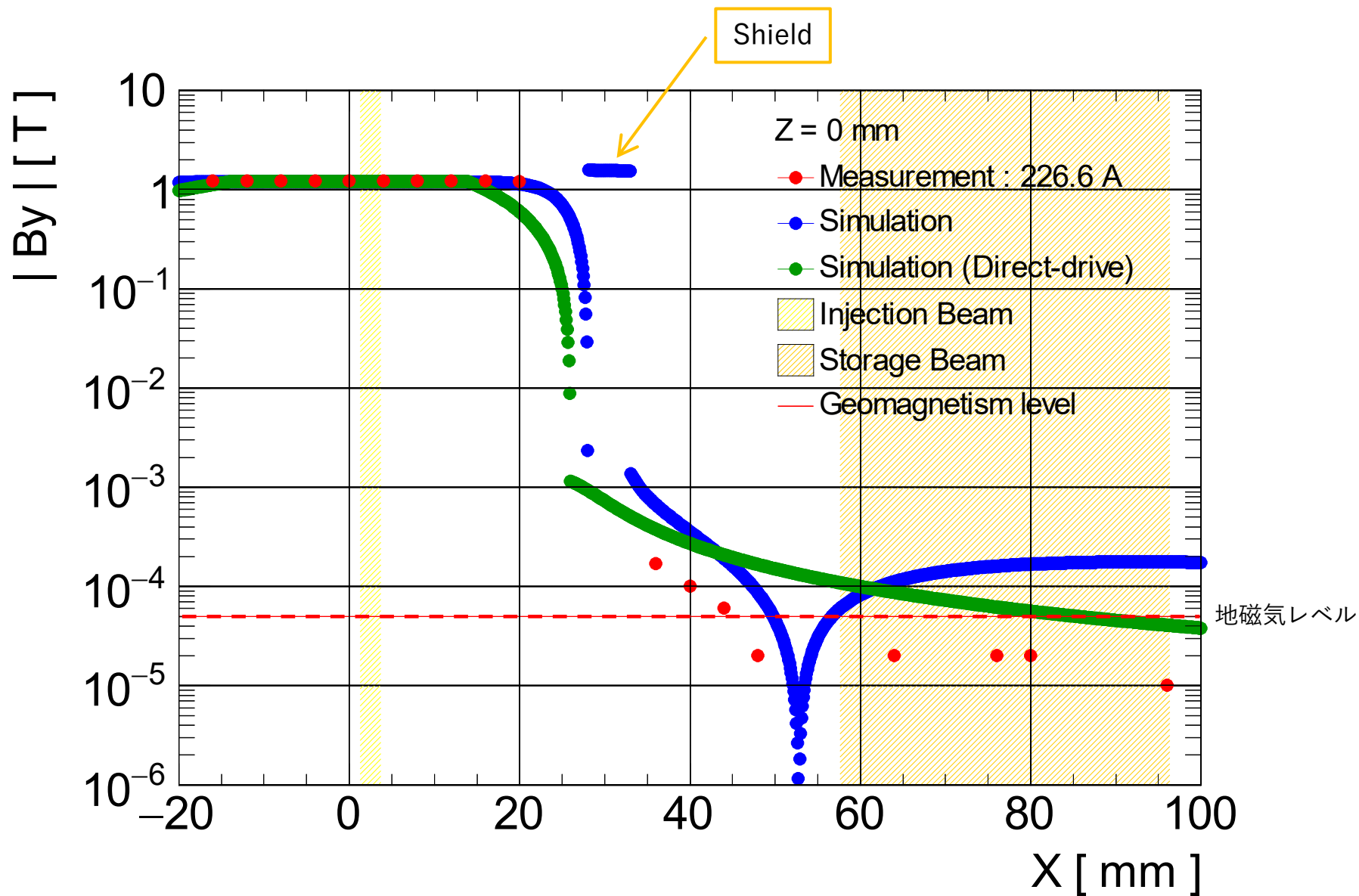


シールド外側は、地磁気レベルまで磁場強度が落ちている



蓄積ビームの軌道が多少変化しても、問題なく運転可能

磁場分布 (水平方向)



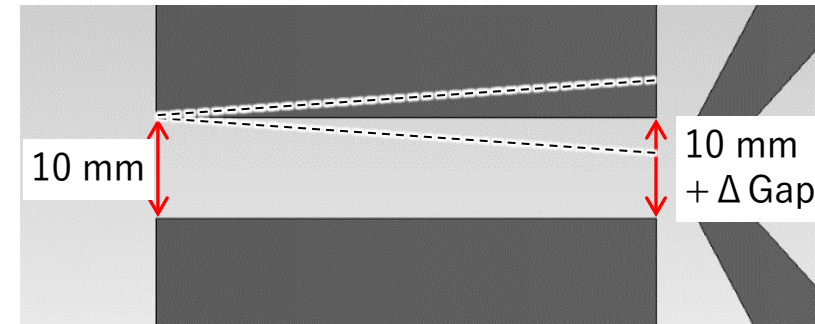
- 磁極ギャップ領域では 1.2 T の磁場が掛かっている
- 蓄積ビーム領域は地磁気程度の磁場に抑えられている

磁場平坦度

磁気シールドや磁極の傾きによって磁場平坦度が変化

- ヨーク側のギャップ間隔は 10 mm で固定
- シールド側のギャップ間隔は $10 + \Delta \text{Gap}$ mm

にして磁極を傾け、磁場分布を計算



ギャップの製作公差

ヨーク側 : $10^{+0.02}_{-0.00}$ mm

シールド側 : $10^{+0.00}_{-0.02}$ mm

($-40 \leq \Delta \text{Gap} \leq 0 \mu\text{m}$ に対応)

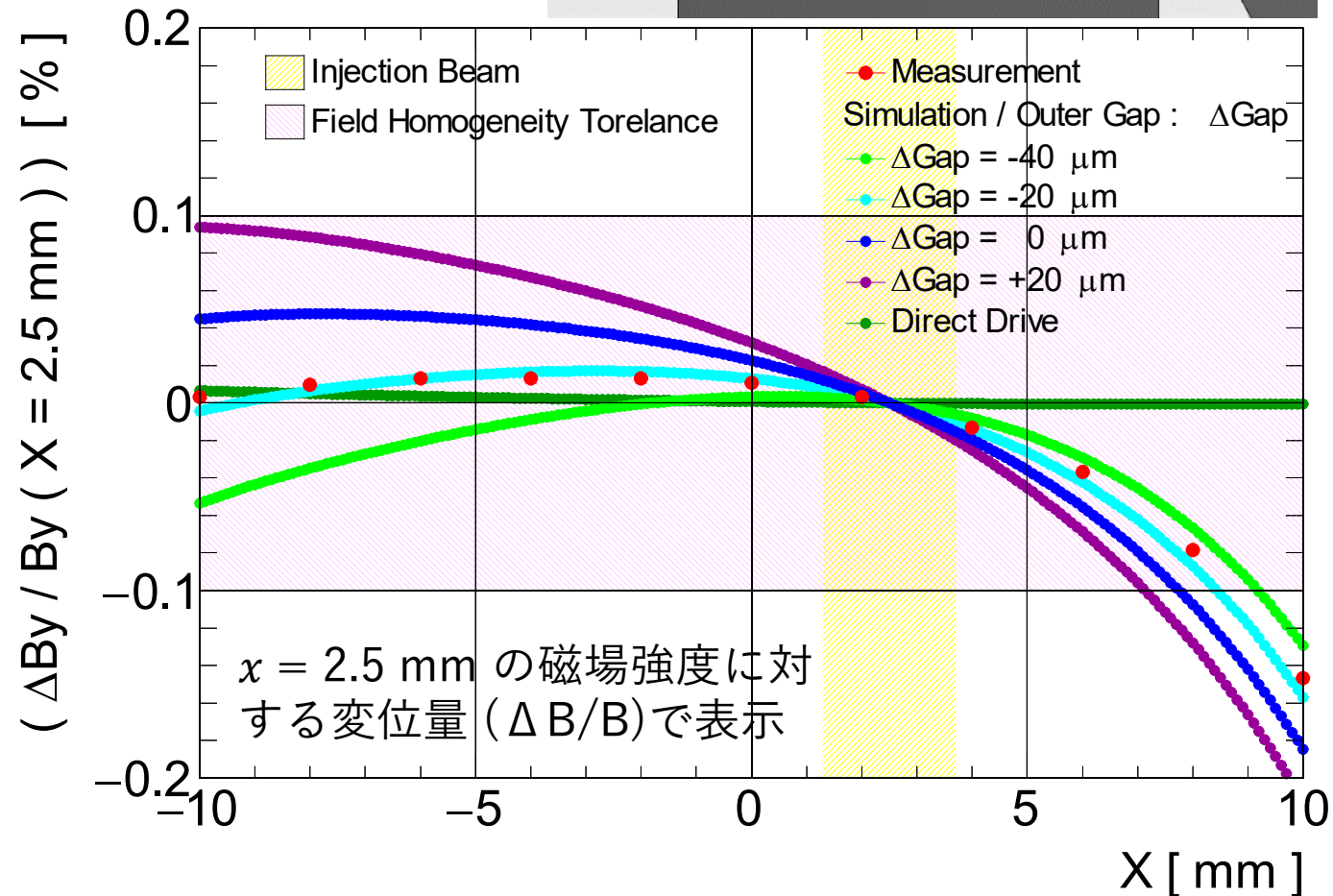
に設定

入射ビーム領域 測定結果

$\Delta(\Delta B/B) = 0.016\%$



DCセプタム磁石は要求を満たす磁場平坦度を示している



まとめ

次世代放射光源用DCセプタム電磁石を設計・製作し性能評価を実施

- 磁場強度
 - 入射ビーム
 - $BL = 0.48 \text{ [T}\cdot\text{m]}$
 - 磁場平坦度：0.016%
 - 蓄積ビーム
 - $BL = 4 \times 10^{-5} \text{ [T}\cdot\text{m]}$ (地磁気レベル)
- コイル電流 232 [A] (電流密度 4.5 [A/mm²])



次世代放射光源に使用可能なDCセプタム電磁石の設計・製作を完了