

# 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<sup>\*A)</sup>, 谷内努<sup>A)</sup>, 青木毅<sup>A)</sup>, 深見健司<sup>A,B,C)</sup>,  
渡部貴宏<sup>A,B,C)</sup>, 高野史郎<sup>A,B,C)</sup>, 竹村育浩<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup>高輝度光科学研究センター(JASRI)

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

<sup>C)</sup>量子科学技術研究開発機構(QST)

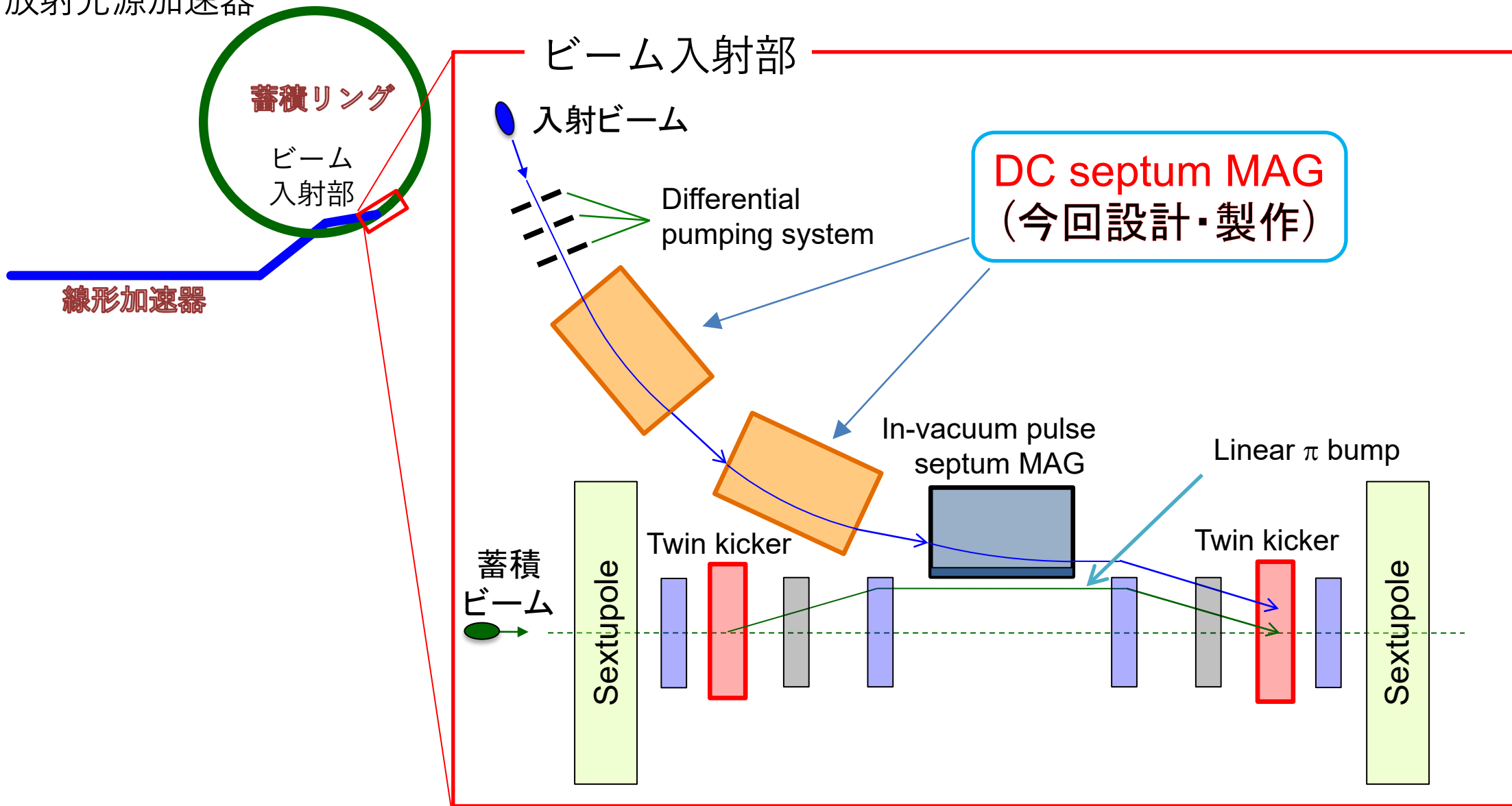
<sup>D)</sup>スプリングエイトサービス株式会社(SES)

# Outline

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

# 次世代放射光源 入射部

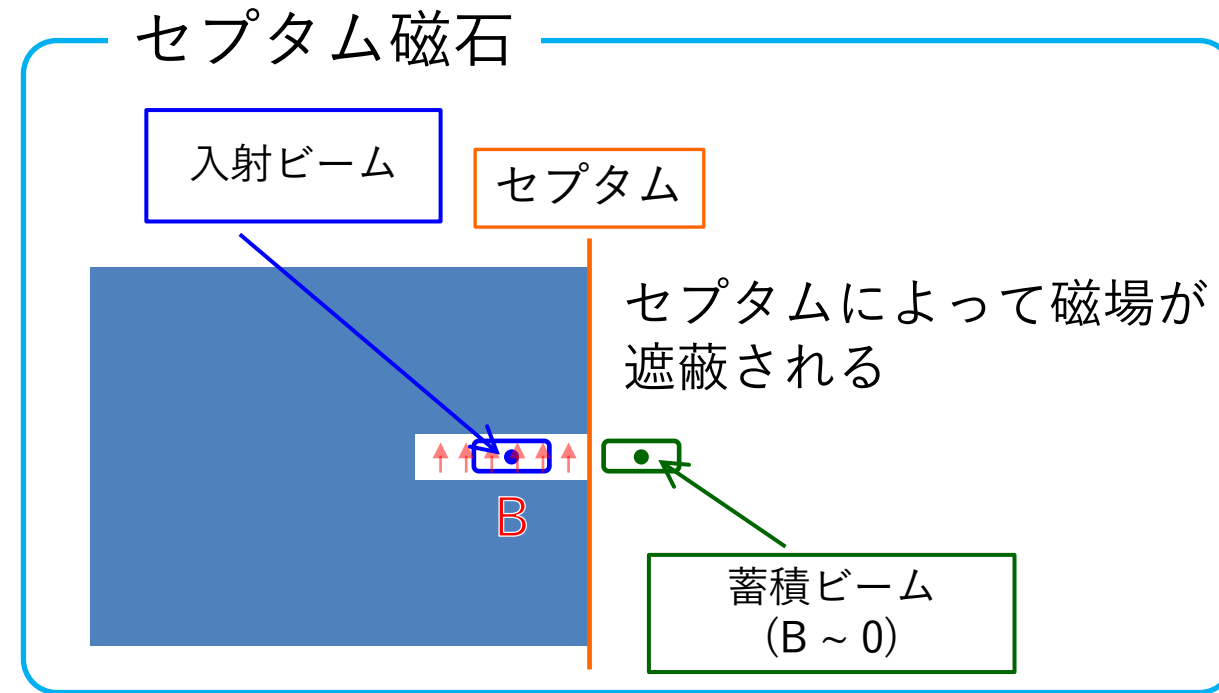
放射光源加速器



DCセプトラム磁石の設計・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

ビームエネルギーは、3 GeVを想定

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)

$$B \cdot L \text{ 積} : B \cdot L = 0.48 \text{ [T} \cdot \text{m]}$$

$$\text{曲率半径} : \rho = 8.333 \text{ [m]}$$

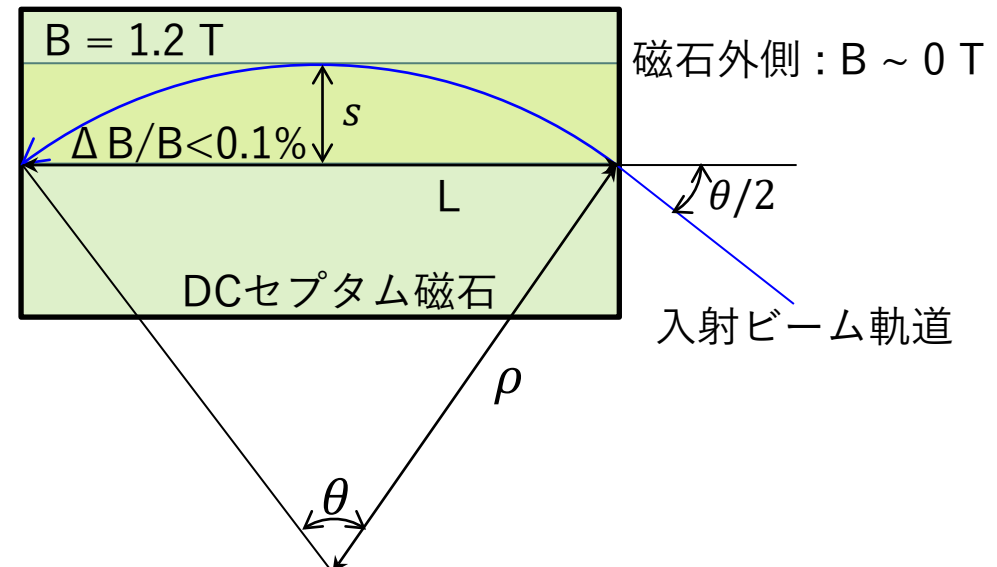
$$\text{キック角} : \theta = 48 \text{ [mrad]}$$

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

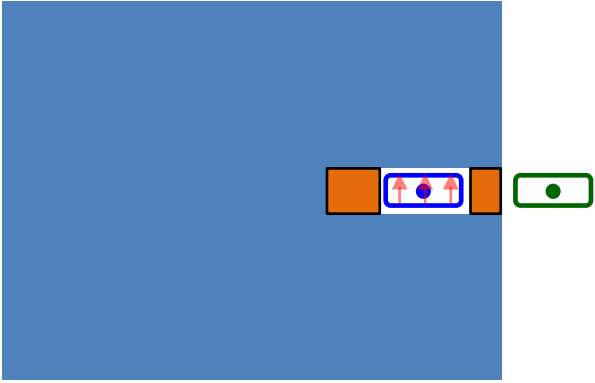
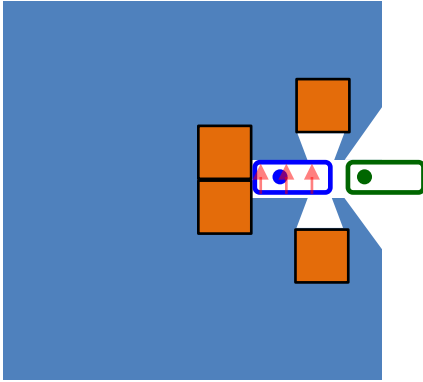
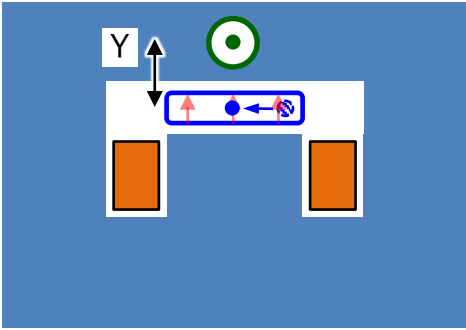


## 蓄積ビーム領域

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



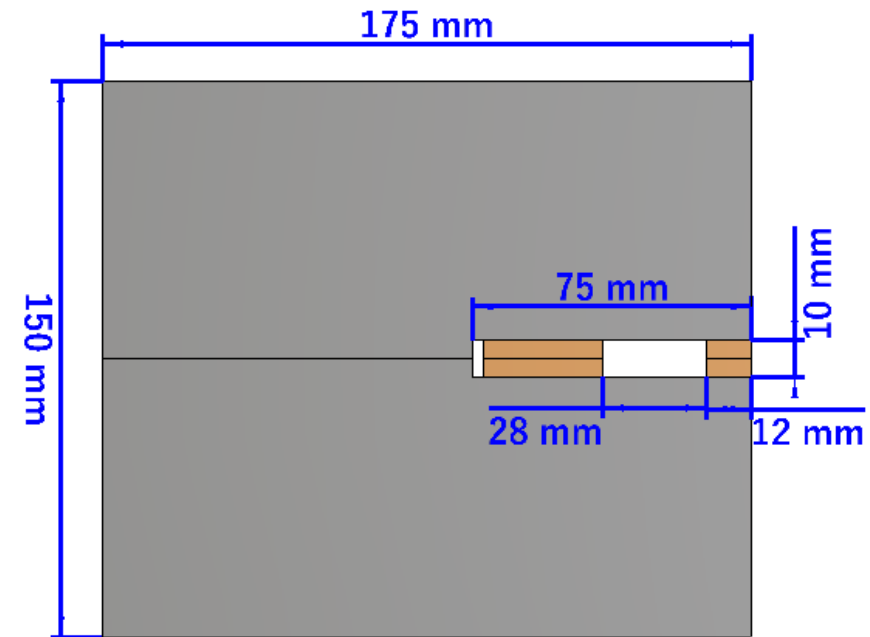
# DCセプトラム タイプ・種類

| タイプ | Direct-drive                                                                       | Massless                                                                                                                                  | Lambertson                                                                                                                                                                       |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 形状  |   |                                                        |                                                                                               |
| 特徴  | <ul style="list-style-type: none"><li>コイルがセプトラムも兼ねる</li><li>SPring-8でも採用</li></ul> | 偏向磁石と四極磁石が隣接する磁極構造<br><a href="http://accelconf.web.cern.ch/e98/PAPERS/MOP01E.PDF">http://accelconf.web.cern.ch/e98/PAPERS/MOP01E.PDF</a> | ヨークの中に開けた穴の中に蓄積ビームを通す<br><a href="https://www.aps.anl.gov/files/APS-sync/Isnotes/files/APS_2012261.pdf">https://www.aps.anl.gov/files/APS-sync/Isnotes/files/APS_2012261.pdf</a> |
| 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"><li>磁場均一度が低い</li><li>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</li></ul>                                                                                 |

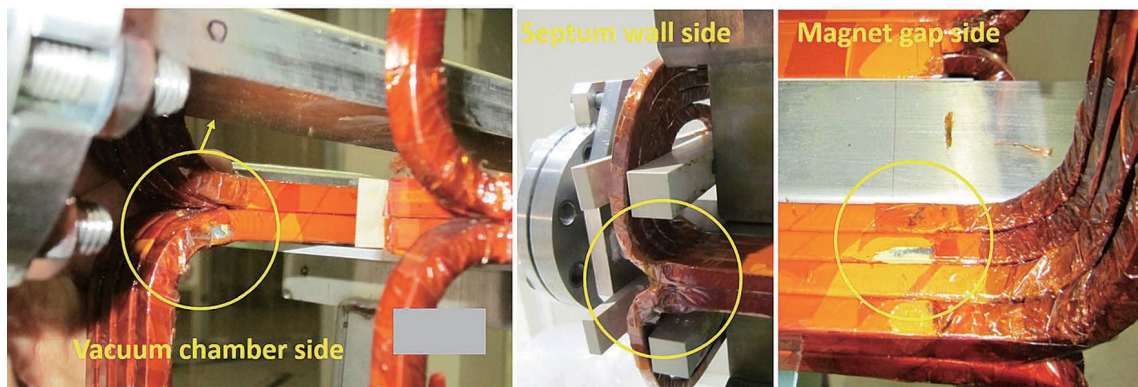
# 従来設計の問題点

## 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 mm<sup>2</sup>  
⇒ コイル電流密度 : 80 A/mm<sup>2</sup>



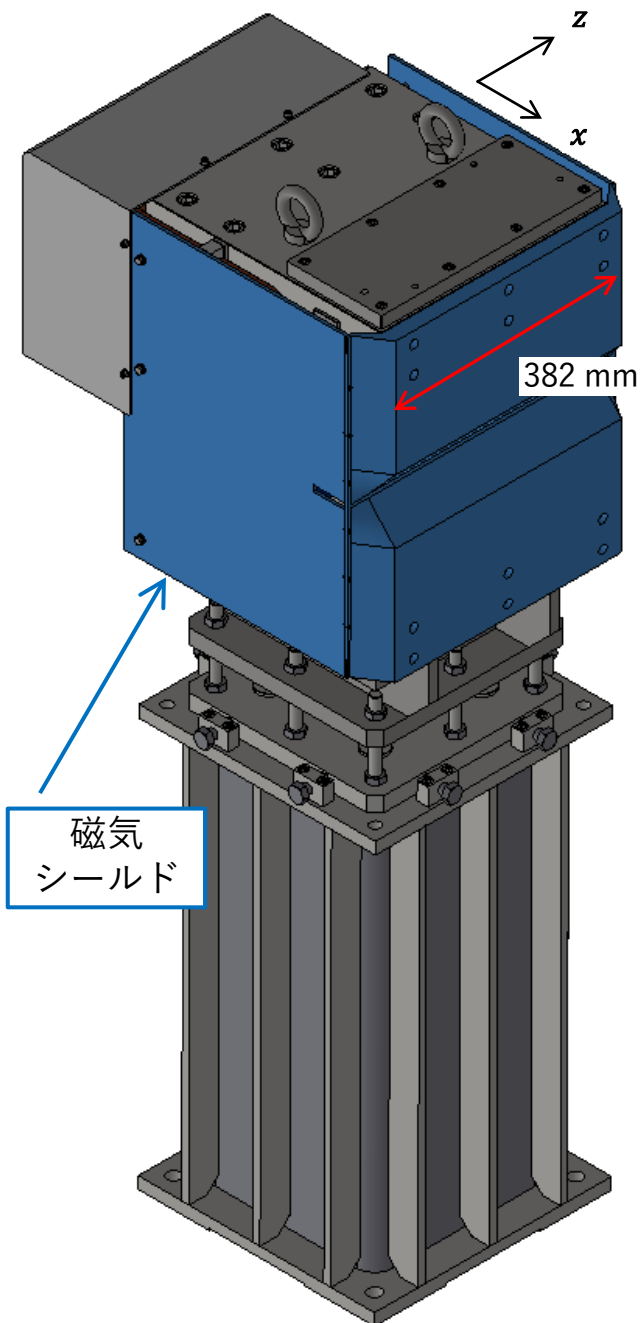
コイル電流密度が高いと故障を起こしやすくなる



- SPring-8 ( $\sim 70$  A/mm<sup>2</sup>)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

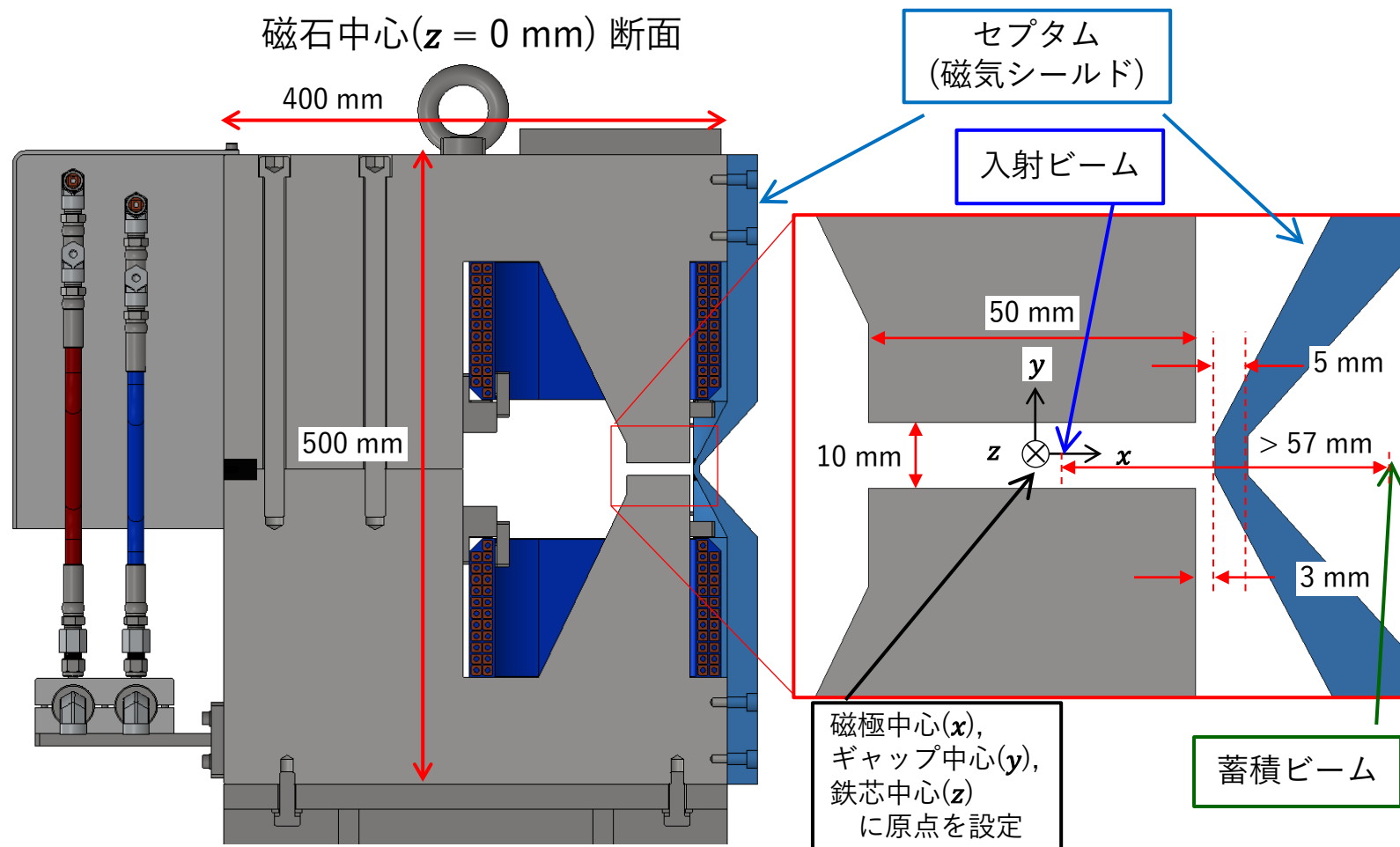
コイル電流密度を  $< 5$  A/mm<sup>2</sup> に抑えたDCセプタムを開発する

# DCセプタム 設計



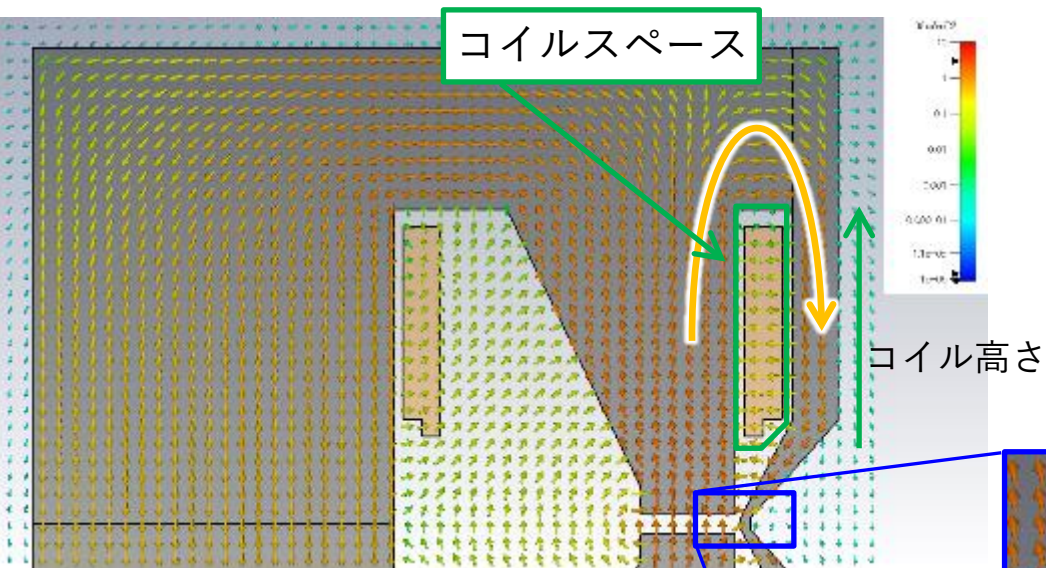
“<”の形状をした磁気シールドを設置

- 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



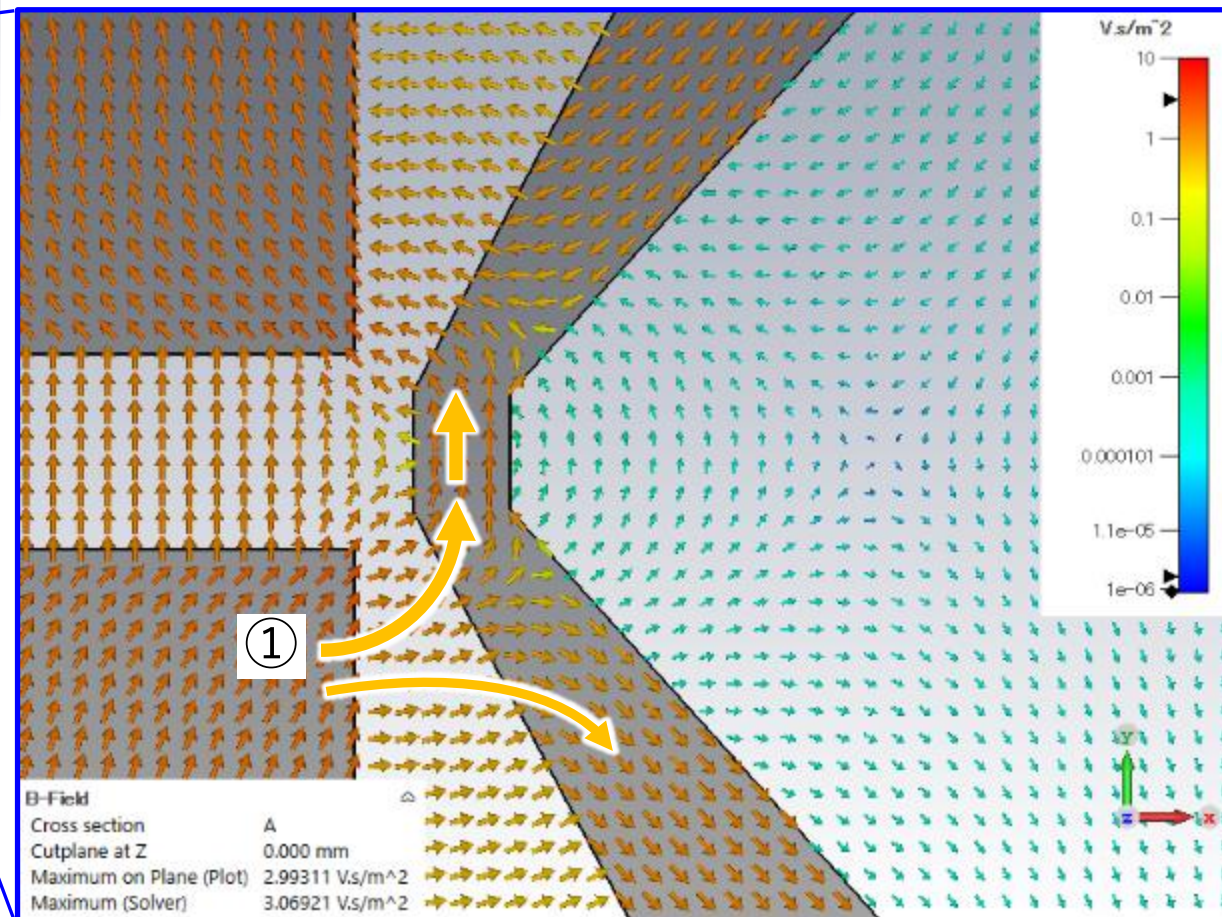


# 磁気回路の特徴



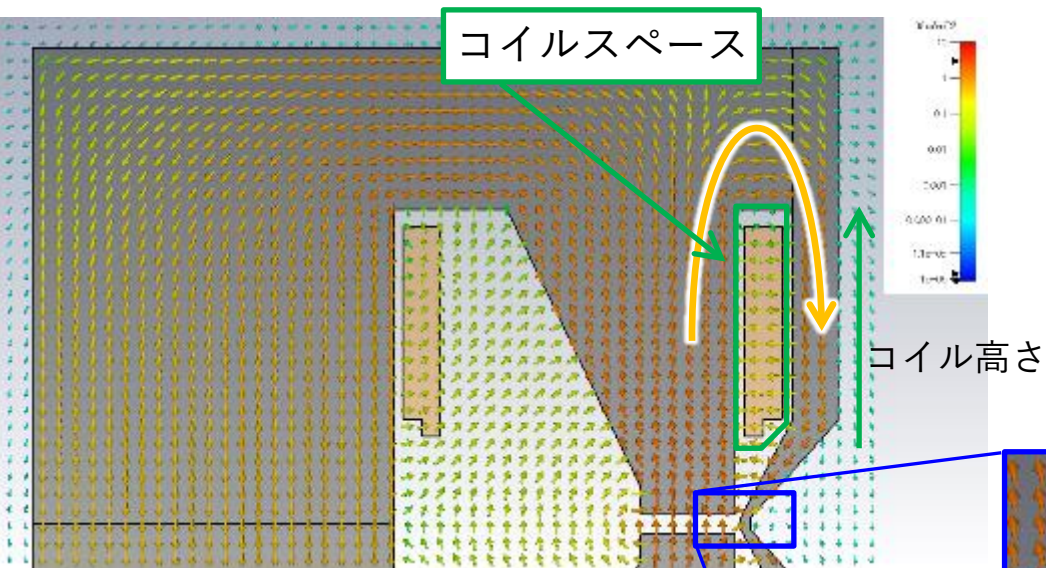
- ① 磁極間からの漏れ磁場を磁気シールドが吸収

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

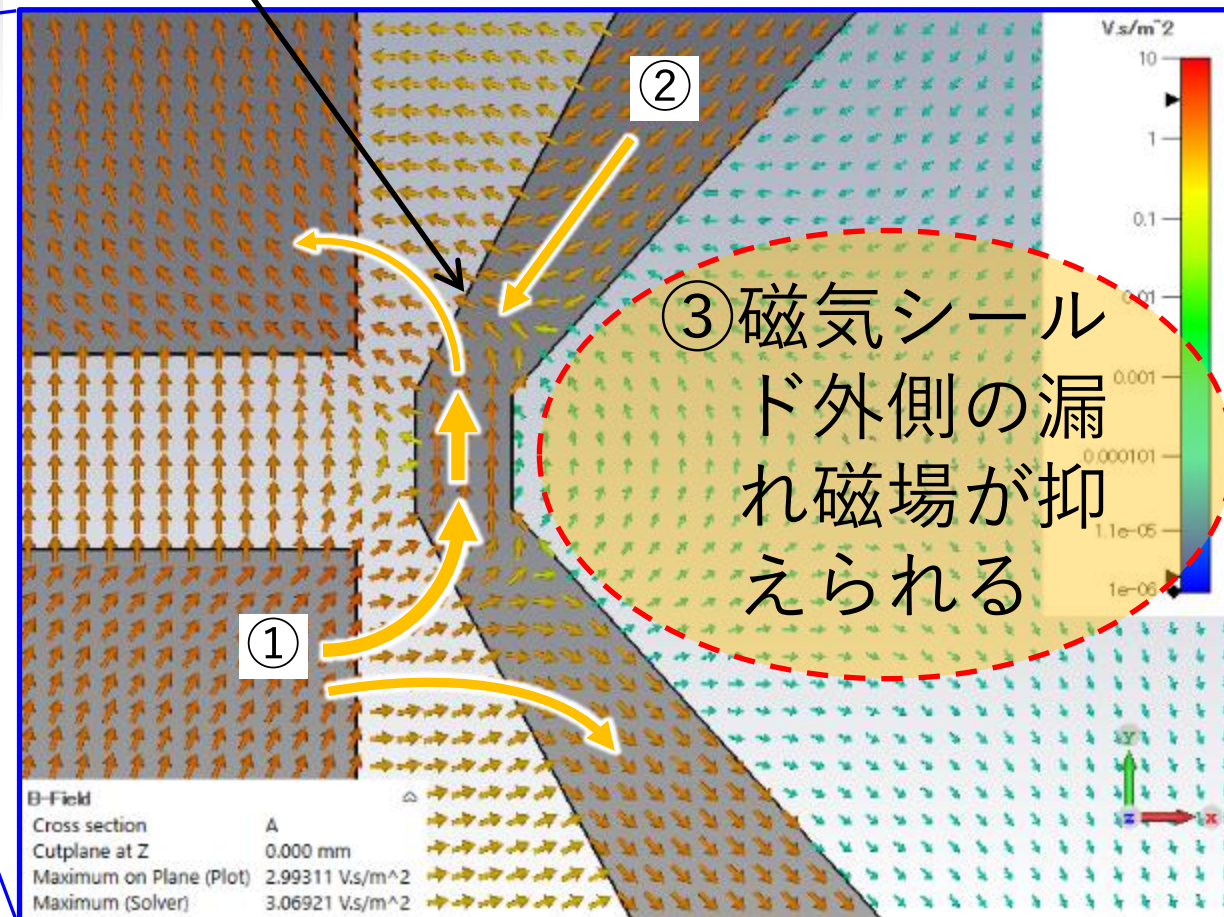


② 磁石上側ヨーク→磁気シールドを通して戻ってきた磁場が漏れ磁場を相殺

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

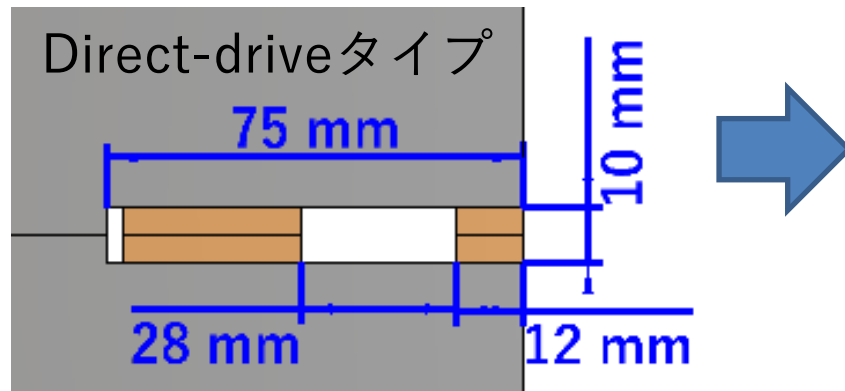


磁気シールドの厚みを薄くすることが可能になる

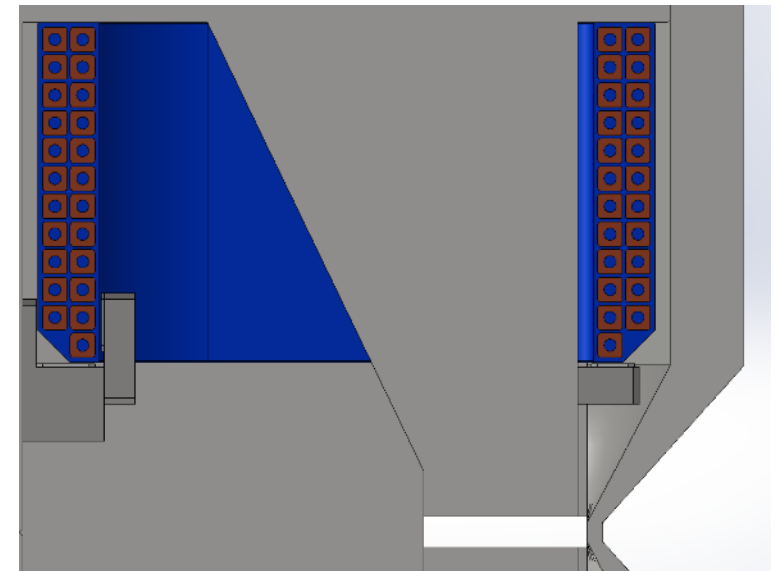


# コイル

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<br>[mm×mm] | コイル電流<br>[A] | 電流密度<br>[A/mm <sup>2</sup> ] | ジュール熱<br>[kW] |
|---------------------|-------------------|--------------|------------------------------|---------------|
| Direct-drive<br>タイプ | 10×12<br>(2巻)     | 4780         | 80                           | 19            |
| 本設計の<br>DCセプタム      | 110×20<br>(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

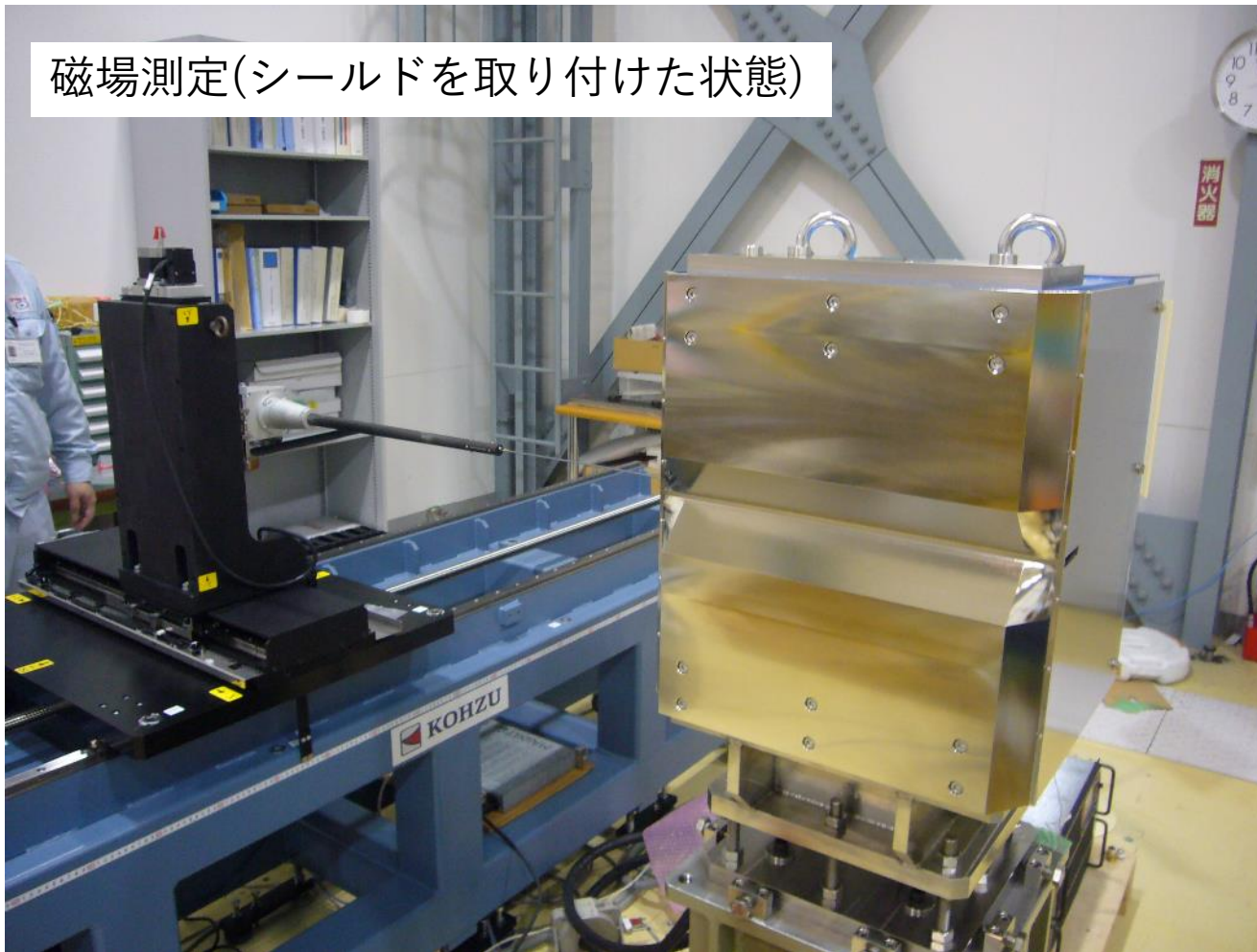


# 製作・磁場測定

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

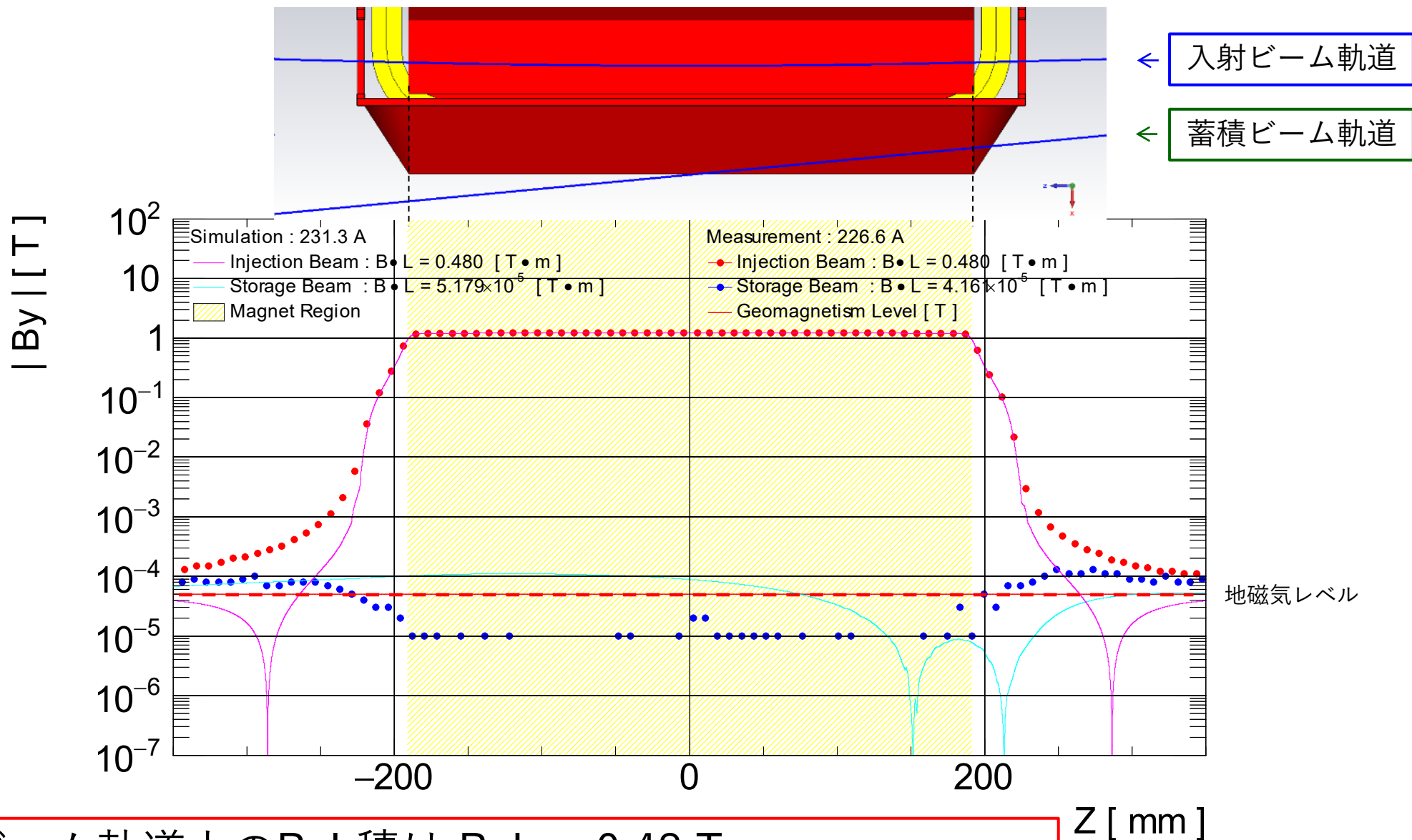
磁場測定(シールドを取り付けた状態)



シールドを取り外した状態



# 磁場分布（ビーム軌道上）



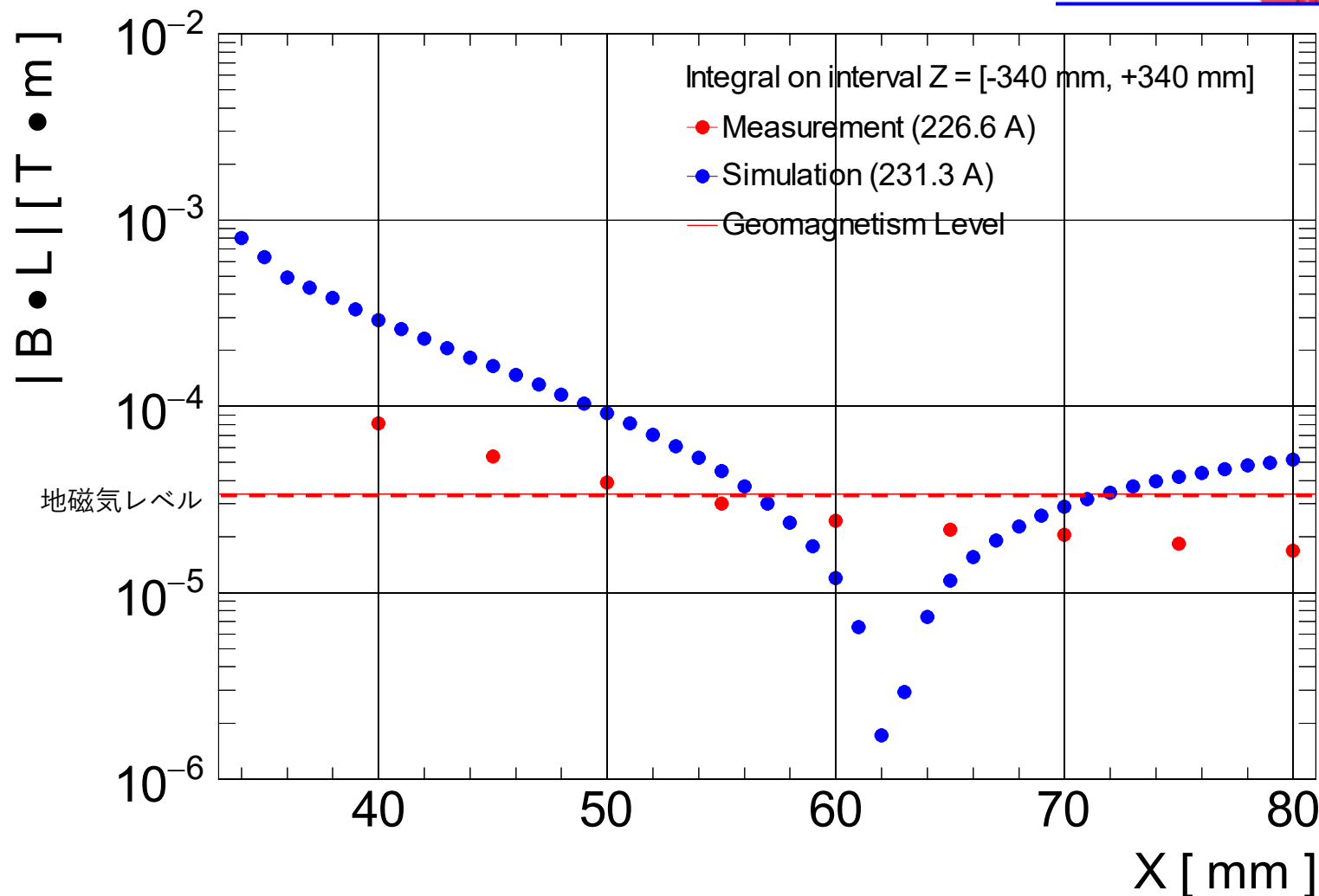
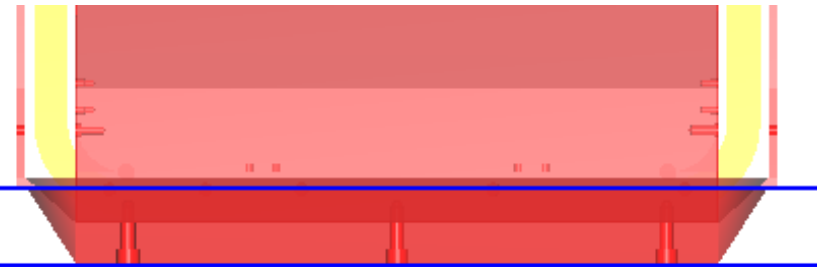
入射ビーム軌道上の $B \cdot L$ 積は  $B \cdot L = 0.48 \text{ T} \cdot \text{m}$ .  
蓄積ビーム軌道上の磁場は地磁気レベルに抑えられている

# 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

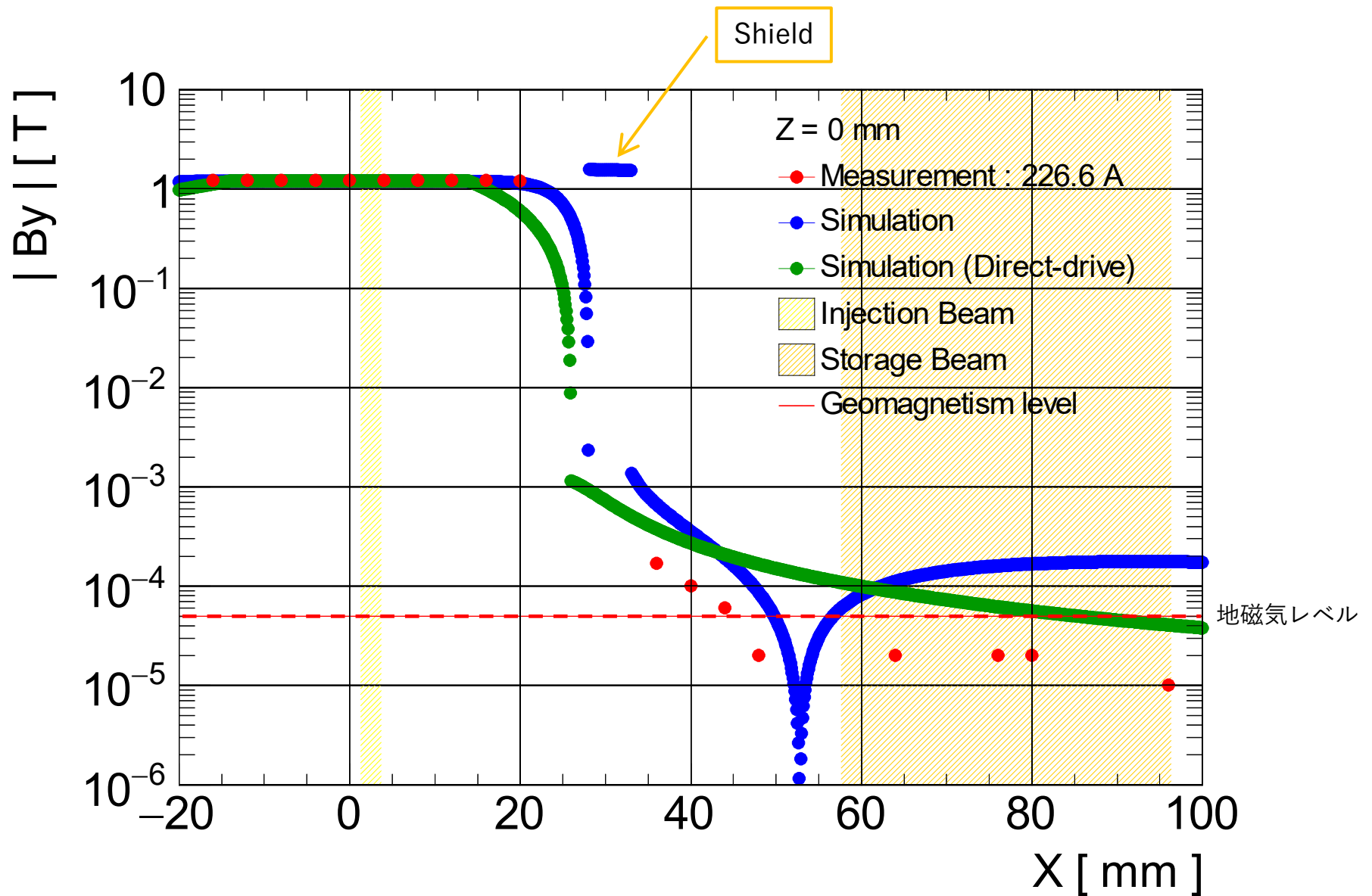


シールド外側は、地磁気レベルまで磁場強度が落ちている



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)



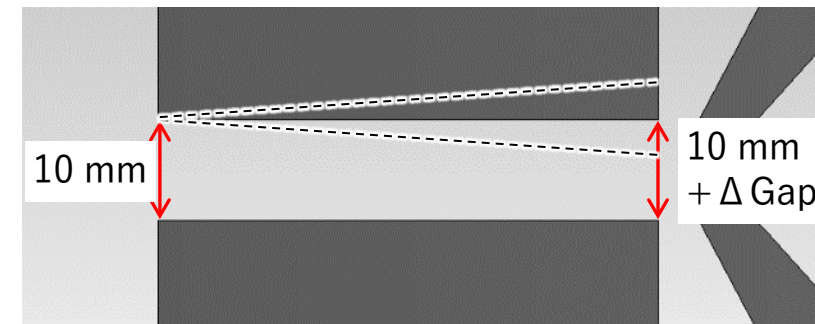
- 磁極ギャップ領域では 1.2 T の磁場が掛かっている
- 蓄積ビーム領域は地磁気程度の磁場に抑えられている



# 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

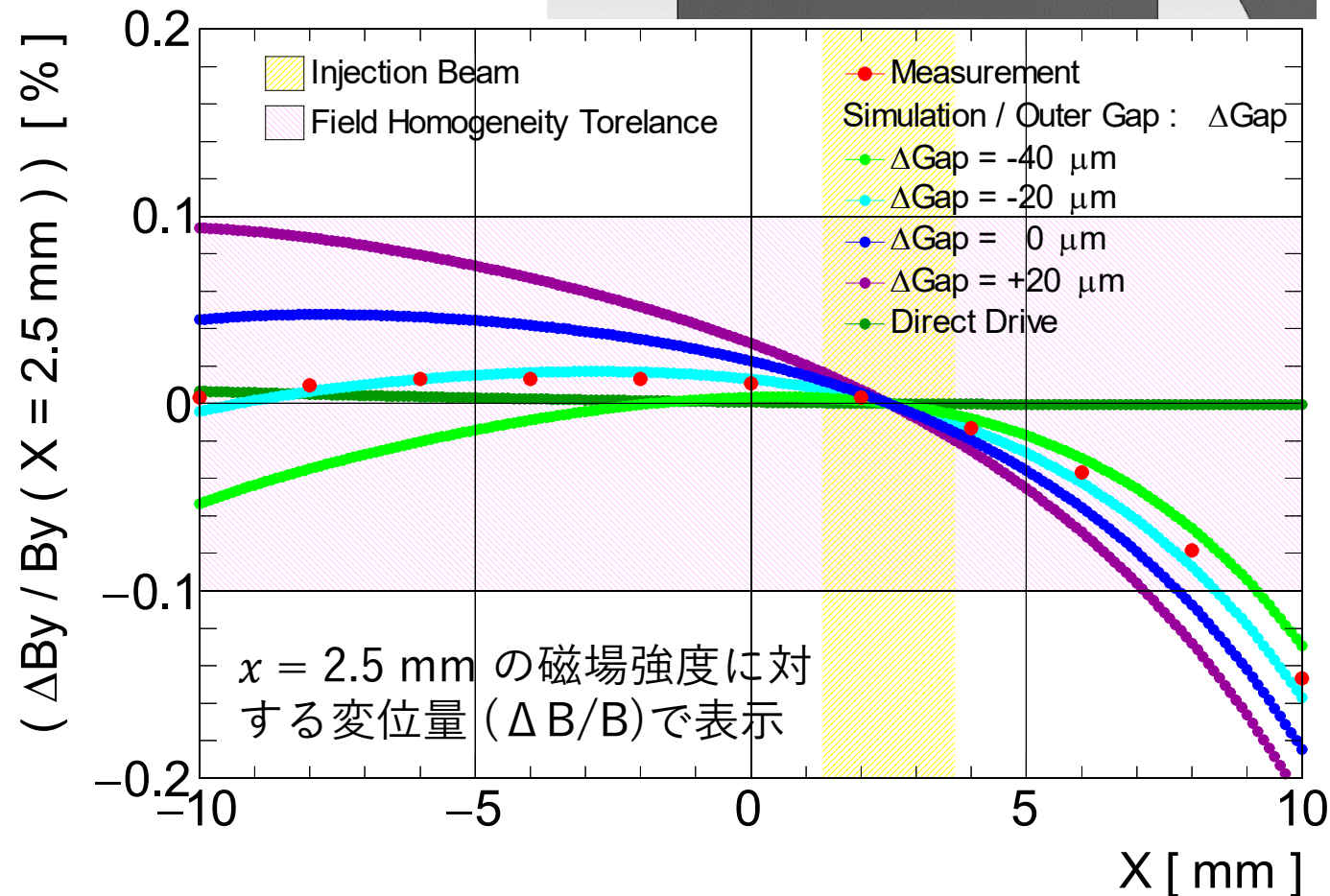
シールド側 :  $10^{+0.00}_{-0.02}$  mm  
( $-40 \leq \Delta \text{Gap} \leq 0 \text{ } \mu\text{m}$ に対応)  
に設定

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/mm<sup>2</sup>])



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