

$g-2/EDM$ 精密計測用磁石の磁場構成と調整方法の 検討

Structure and tuning method of the superconducting magnet for the $g-2/EDM$ precision measurements.

第22回日本加速器学会年会(PASJ2025)
東京都市大学世田谷キャンパス
2025年8月06日～8月08日

発表No. FR0607 電磁石・レーザー [口頭発表: Oral]

発表日時: 8月8日 1520-1540

発表会場: 6号館61C

阿部充志, 佐々木憲一, 三部勉, 小川真治(高エネルギー加速器研究機構)
福村省三(新潟大学)、飯沼裕美(茨城大学)

背景と目的

背景

J-PARCで準備を進めているミュオンの磁気・電気モーメント($g-2/EDM$)高精度測定に用いる磁石はミュオンを周回・蓄積するシリンダー状の領域(3cm半径幅、10cm高で直径66.6cm)に、高磁場(3.0T)で超高一様磁場(許容振幅 $\pm 0.1\text{ppm}$)を持つ。螺旋入射したmuonを赤道面付近の周回軌道を安定に保つ弱収束磁場(WFF: Weak Focus Field)分布を加えても、理想磁場から $\pm 0.1\text{ppm}$ 以内の残差とする必要がある。

この磁石の起磁力配置設計では、非常に均一な磁場を実現出来るよう、起磁力配置を設計した(NIMA, vol.890, May 2019)。WFF磁場コイルについて精度良いコイル配置を設計した(PASJ2023)

しかし、実機では組み立て誤差などによる各種の誤差磁場を含む。そのため、詳細な磁場調整(シミング)が必要である。

g-2/EDM磁石の静磁場・Muon螺旋入射関連磁石(コイル)の仕様

Muon蓄積磁石内で静磁場をつくる磁石・コイルは下記のもので、磁場シミングも関連する。

表 静磁場関係

コイル・磁石	機能	仕様
主磁場コイル (超電導、永久電流)	(i) 一様強磁場 (ii) Muon軸方向移動を減速	(i) 3.0 T $\pm 0.3\mu\text{T}$ (ii) $B_R \geq 0$
弱収束磁場コイル (WFFC)(超電導,電源駆動)	$(B_R \propto Z)$ の収束磁場を発生	$B_R = -n(B_Z^0/R_0)Z$ $B_Z = -n\frac{B_Z^0}{R^0}\left\{(R - R^0) + \frac{Z^2}{2R^0}\right\} \pm 0.3\mu\text{T}$
受動的シミング (強磁性体,鉄片など)	Coarseシミング	10ガウス程度の磁場調整可能、<6000cc, Max.46000cc、トレイ操作に上蓋の開閉有り
	Fineシミング	0.1ガウスレベルの磁場調整、<100cc, 常時開口のシムトレイ操作用穴を持つ
シムコイル (超電導,電源駆動)	B_{\perp} -type: B_{\perp} 周回方向分布補正	一様、1回・2回対称、最大5ガウス
	B_Z -type: B_Z 周回方向分布補正	一様、1回・2回対称、最大<30ガウス

WFFC: Weak Focus Field Coil

n : decay index, $B_Z \propto R^{-n}$ であり、本実験では $n = 1.5 \times 10^{-4}$

本発表の目的

磁場調整(シミング)に準備している磁場調整機構を議論する。

本発表の内容

1. シミング機構の概要
2. 受動シミングと磁場再構成の計算法
3. 能動シミング用シムコイル
 - B_Z -type shim coil
 - B_{\perp} -type shim coil
 - 磁場分布の再構成と課題
4. まとめ

受動シミング:

磁場中で磁化する強磁性体(Fe, Ni, など) を誤差磁場成分を打ち消すように、シミングトレイのポケットにし、目標磁場(設計磁場)分布に近づける。

鉄シム片: 飽和磁化 2.15 T 1.711 Am²/cc、ニッケルシム片: 飽和磁化 0.60 T, 0.478 Am²/cc

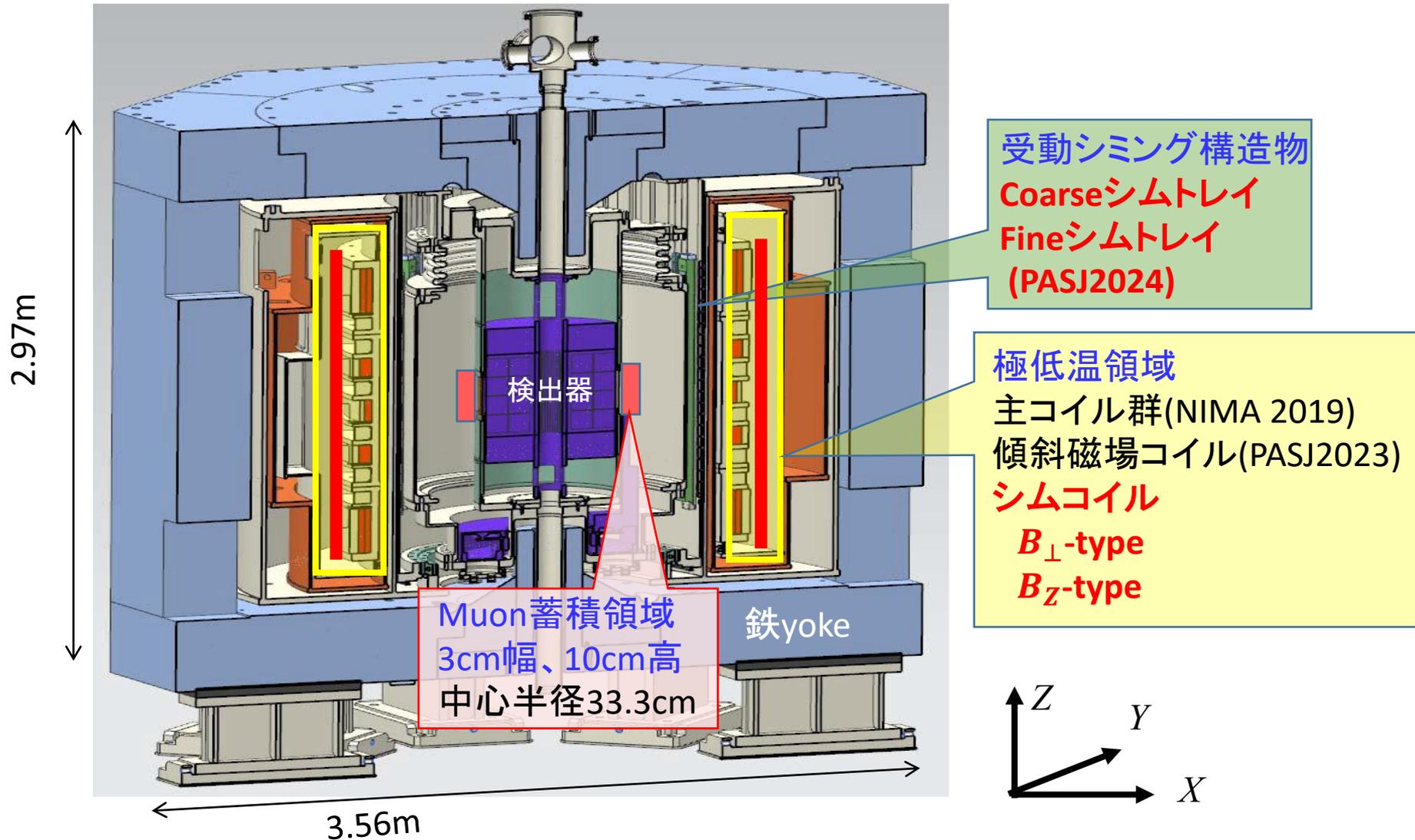
シミング機構(補正磁場発生ツール)

設置直後では数千ccの鉄量が必要であるが、一方、実験開始後では少量のシミングのみとなる。前者には大きな穴が鉄yoke天井に必要であるが、このような穴は、閉止しても、再現性に疑問が残る。そこで、下記の方式を考えている。

受動(Passive)シミング機構		能動的(Active)シミング機構	
磁化鉄片の磁気モーメント利用(飽和磁化: 1.711Am ² /1cc)、配置位置・量を調整		小コイルによる磁場を利用、電源電流を調整	
Coarse用	Fine用	B_Z タイプシムトレイ	B_R タイプシムトレイ
粗いシミングに利用	最終的な精度良いシミング	軸方向成分 B_Z 用	直交磁場成分(B_X, B_Y)用
鉄容量<46000 cc <6000ccを目指す	鉄容量<1600 cc <100ccを目指す	±30ガウス以内 (17kAT)	±5ガウス以内(1.0kAT)
20本x25ポケット(92.5cc)	20本x19ポケット(5.0cc)	周回方向にSCコイル6個	周回方向にSCコイル6個
消磁必要	励磁を保つ	実験中でも操作可能	実験中でも操作可能
鉄yoke天井の4個のシムトレイ取り出し穴。シミング終了後に閉止。実験開始後ではCoarseシミング無し	鉄yoke天井の20個のシムトレイ取り出し穴。シミング終了後も開継続、鉄yokeの変化無し	6個の小コイルを独立に通電できる電流導入 但し、周回方向の分布のみ調整	6個の小コイルを独立に通電できる電流導入 但し、周回方向の分布のみ調整

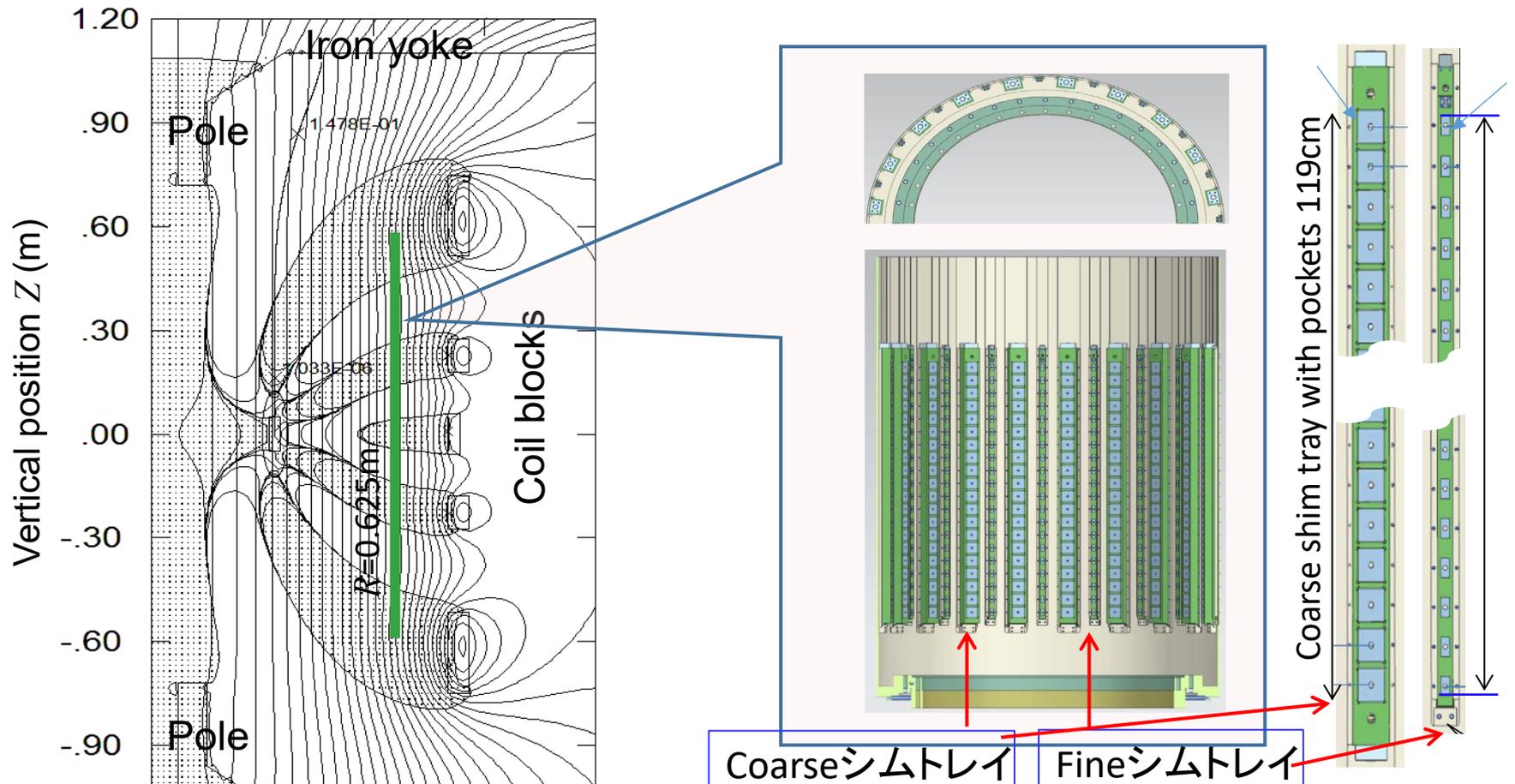
受動的(Passive)シミング機構設計についてはPASJ2024

シミング機構の概要(磁石構造)



g -2/EDM詳細計測用磁石

受動シミング機構の概要(シムトレイ構造)



両方共にシムトレイ本数は20本Muon入射口との
両立のため、20本以外不可
シムポケットに鉄片を配置、
磁気飽和2.15T鉄片 $\rightarrow 1.711Am^2/cc$

受動シミング用シムトレイ構造 (Coarse, Fine)

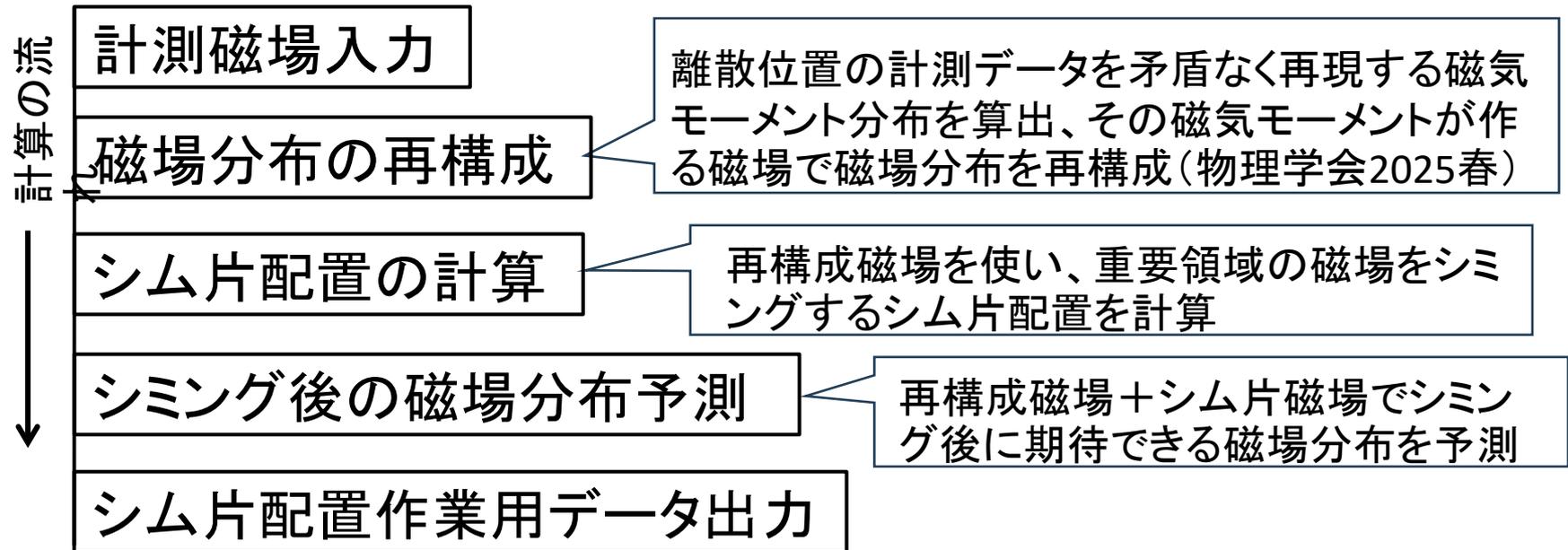
受動シミング計算(全体構成)

シミング計算: 入力: 磁場分布の計測データ(1000~2000点)

出力: シム鉄片配置(400点)と予想磁場分布、均一度予測

本研究でのシミング計算の構成 (MuSEUM実験には既適用)

MuSEUM (Muonium Spectroscopy Experiment Using Microwave) 実験、
1.7 ± 0.1 ppm の一様磁場が必要



Ref.

(1) Mitsushi Abe, Kenji Sakakibara, Takuya Fujikawa, Hikaru Hanada, 'Static Magnetic Field Shimming Calculation Using TSVD Regularization Considering Constraints of Iron Pieces Placements', IEEE Transaction on Applied Superconductivity, vol. 27, no. 7, Oct. 2017, Art. no. 4400812. DOI: [10.1109/TASC.2017.2732285](https://doi.org/10.1109/TASC.2017.2732285)

(2) 阿部充志、佐々木憲一、荻津透、齊藤直人、三部勉、下村浩一郎、飯沼裕美、多田紘規、小山駿、「TSVDシミング計算とMRI磁石を用いた超良好一様(±0.1ppm)磁場実現のシミング試験」、低温工学 58巻3号(2023) pp. 132-139.

シミング計算(2:磁場分布の再構成:計算モデル)

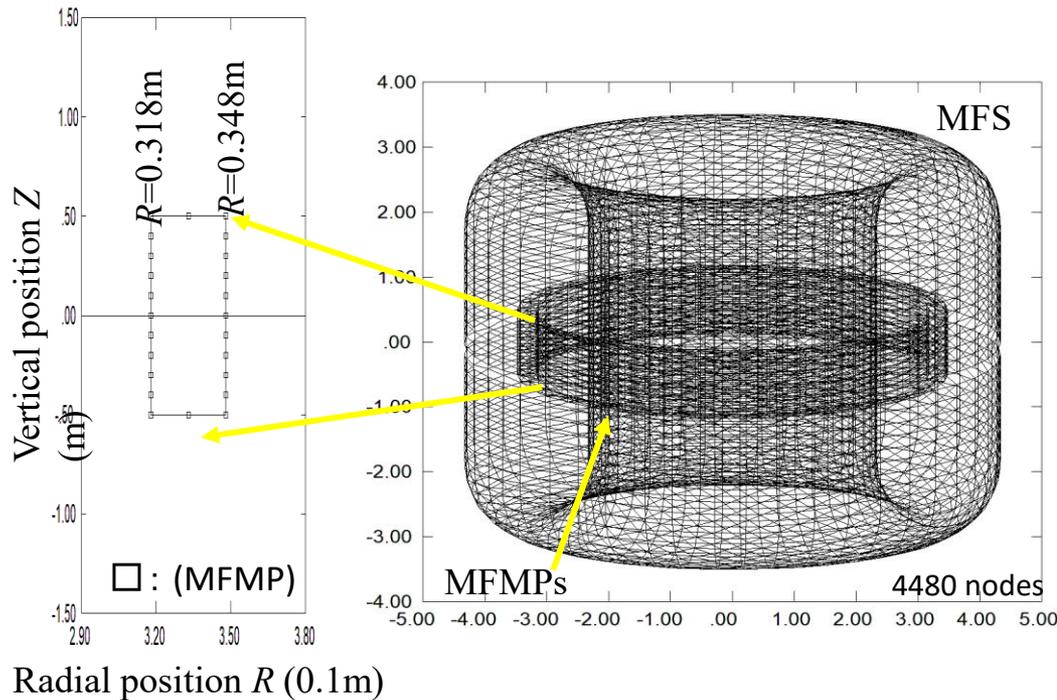
計算体系

- 計測点MFMPs (Magnetic Field Measurement Positions):蓄積領域を囲むように配置
- 起磁力(MFs : Magnetomotive Forces): 計測点を囲む面(MFS)に磁気モーメント(MM)を配置,

$$\mathbf{b}_{ij} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3(\mathbf{m}_j \cdot \mathbf{r}_{ij})\mathbf{r}_{ij} - r_{ij}^2 \mathbf{m}_j}{r_{ij}^5} \quad (\text{MM: Magnetic Moment})$$

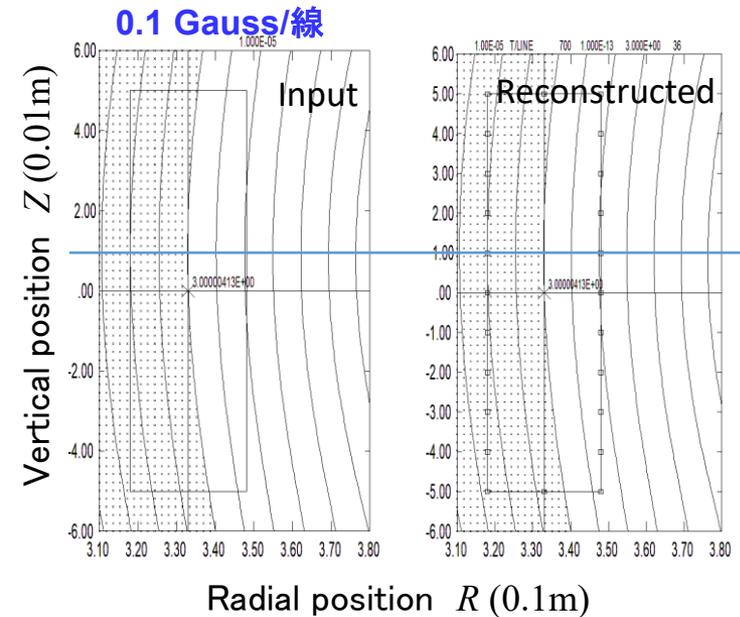
計算手順

- 計測磁場入力,
- 起磁力面(MFS)の節点に計測磁場を再現する磁気モーメント分布を計算
- 磁気モーメントによる磁場を算出し蓄積領域の磁場分布を再構成



計測点MFMPs: Magnetic Field Measurement Positions

起磁力(磁気モーメント)配置面
MFS(Magnetomotive Force Surface)



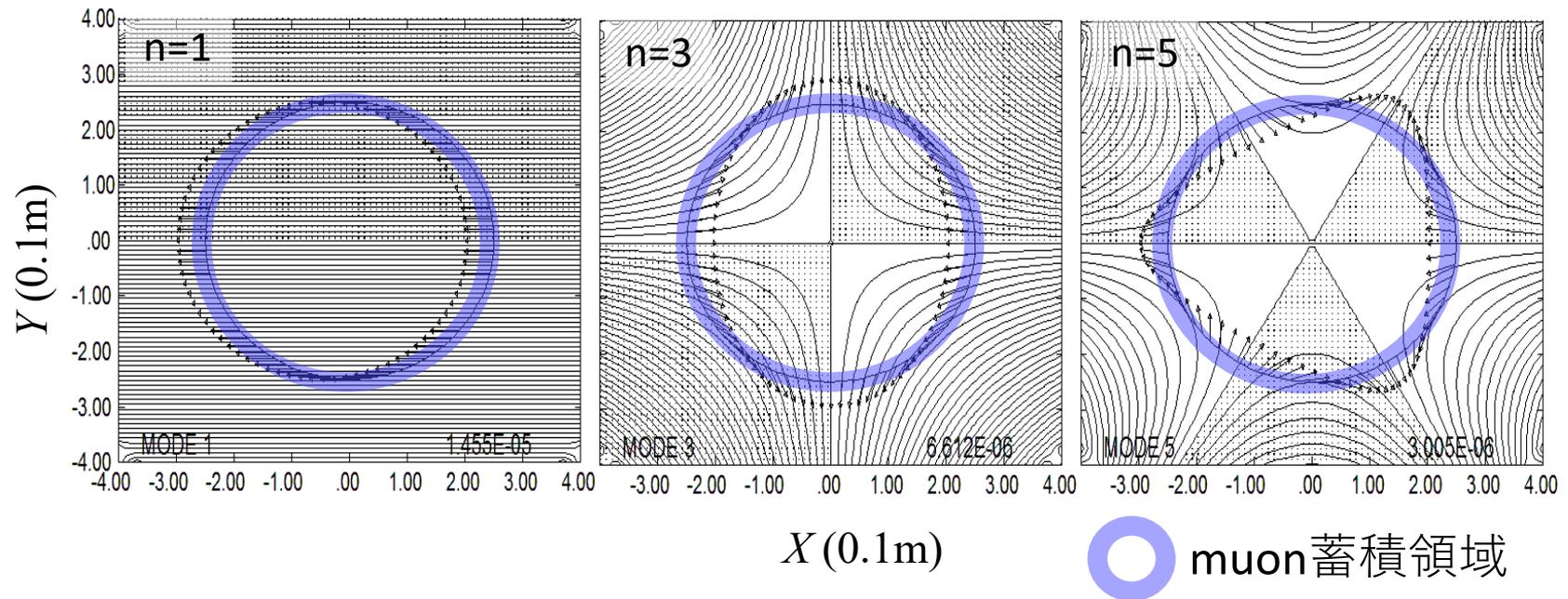
入力・出力磁場の比較

本磁場再構成・受動シミング手法で扱えない磁場成分

軸に垂直で $\frac{\partial b_Y}{\partial X} = \frac{\partial b_X}{\partial Y}$ に従い、Z方向に一様な (b_X, b_Y) 成分(下図参考、磁力線表示)は、本手法の計算で取り扱う b_Z と関係を持たないため、扱えない。

・鉄yokeの傾きでa few Gauss程度の一様な (b_X, b_Y) 成分が発生し得る。しかし、計測磁場にはほぼ影響なし。Muon軌道との関係は今後の課題。補正を可能とする超伝導のシムコイルを用意予定。

$$\text{Nmr検出} = |\mathbf{B}| = \sqrt{(b_X^0)^2 + (b_Y^0)^2 + (b_Z^0)^2} \cong (b_Z^0) \left(1.0 + \frac{(b_X^0)^2 + (b_Y^0)^2}{2.0 \times (b_Z^0)^2} \right)$$



$\frac{\partial b_Y}{\partial X} = \frac{\partial b_X}{\partial Y}$ に従い、Z方向に一様な磁場成分の磁力線(A_Z 成分)のZ=0面上の分布図

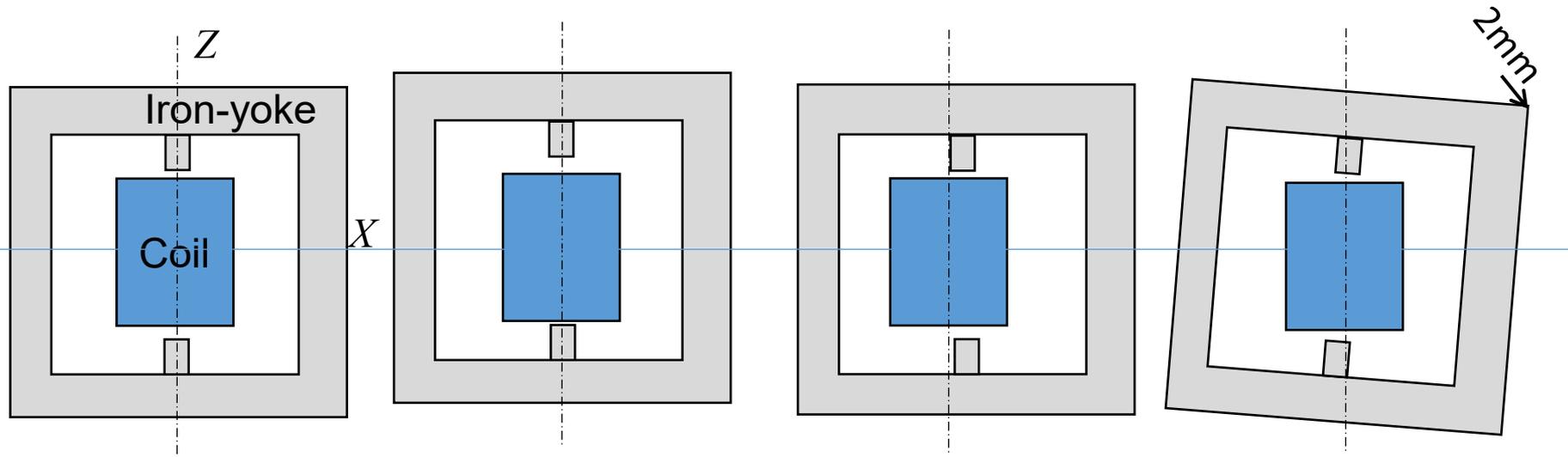
シミングのシミュレーション

鉄yoke設置誤差による誤差磁場のシミング

誤差磁場原因として鉄yokeの設置誤差のみを考える。

目標磁場 B^0 はミュオン蓄積領域で一様であり、 B_i^0 は全ての3.0T、
ビーム蓄積領域で B_z の磁場振幅は3.0Tを中心に、

-0.1ppm \sim +0.1ppm (-0.3 μ T \sim +0.3 μ T)であることがシミング後の目標



設計値

(1) 1mm上方向変位

(2) 1mm軸変位

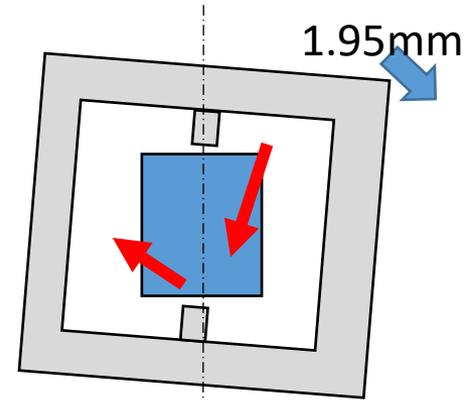
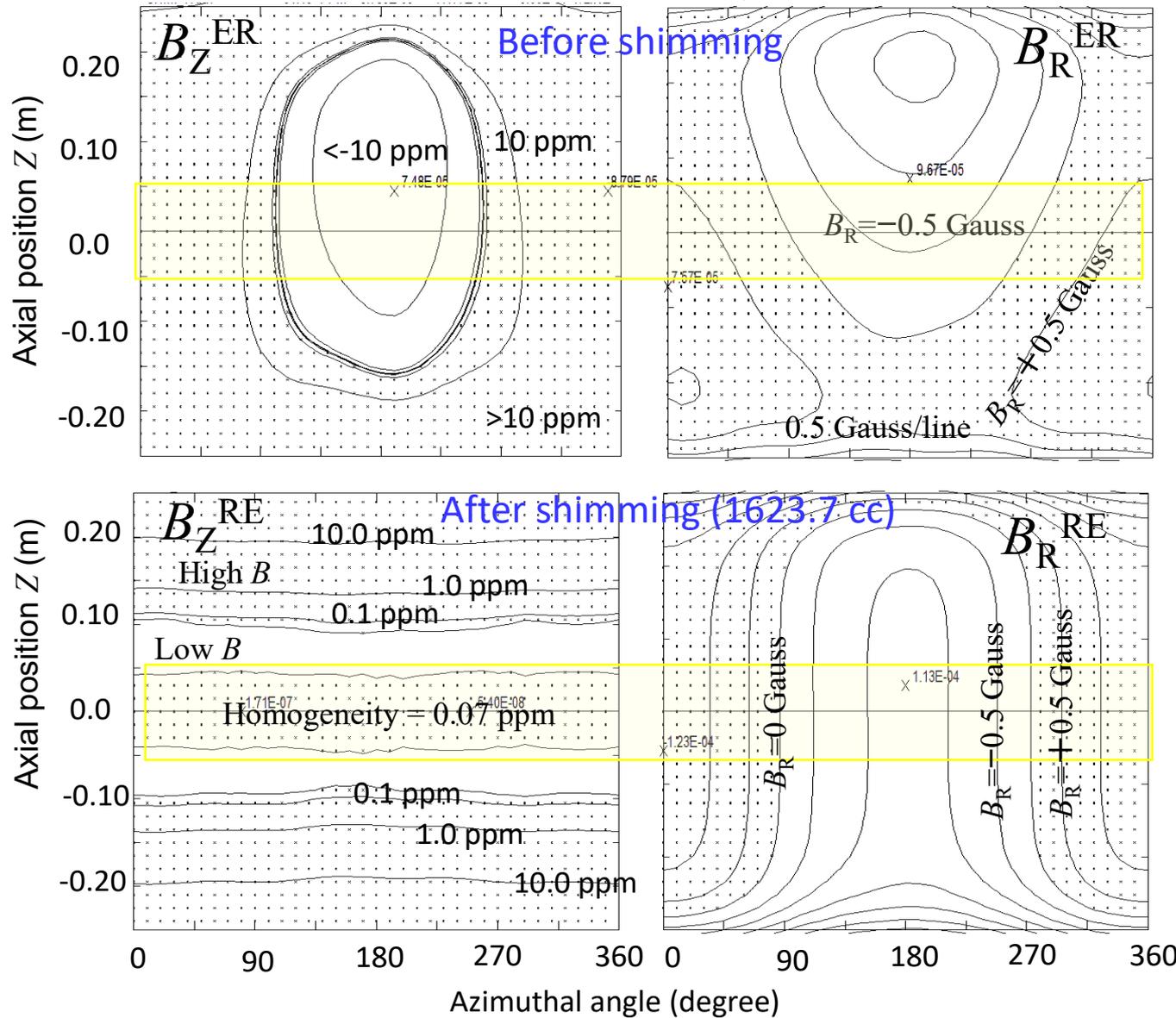
(3) 0.05度回転

シミング計算例に使用した鉄yoke変位例

12

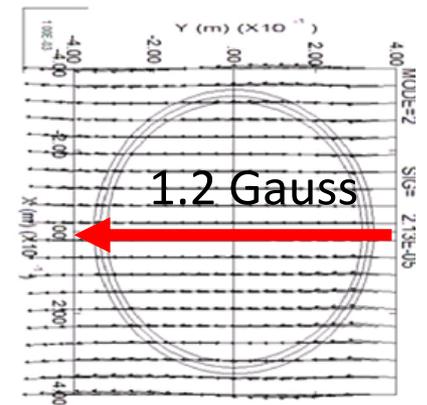
鉄yokeが超伝導コイルに対して0.05度傾いた場合

円筒面上の磁場

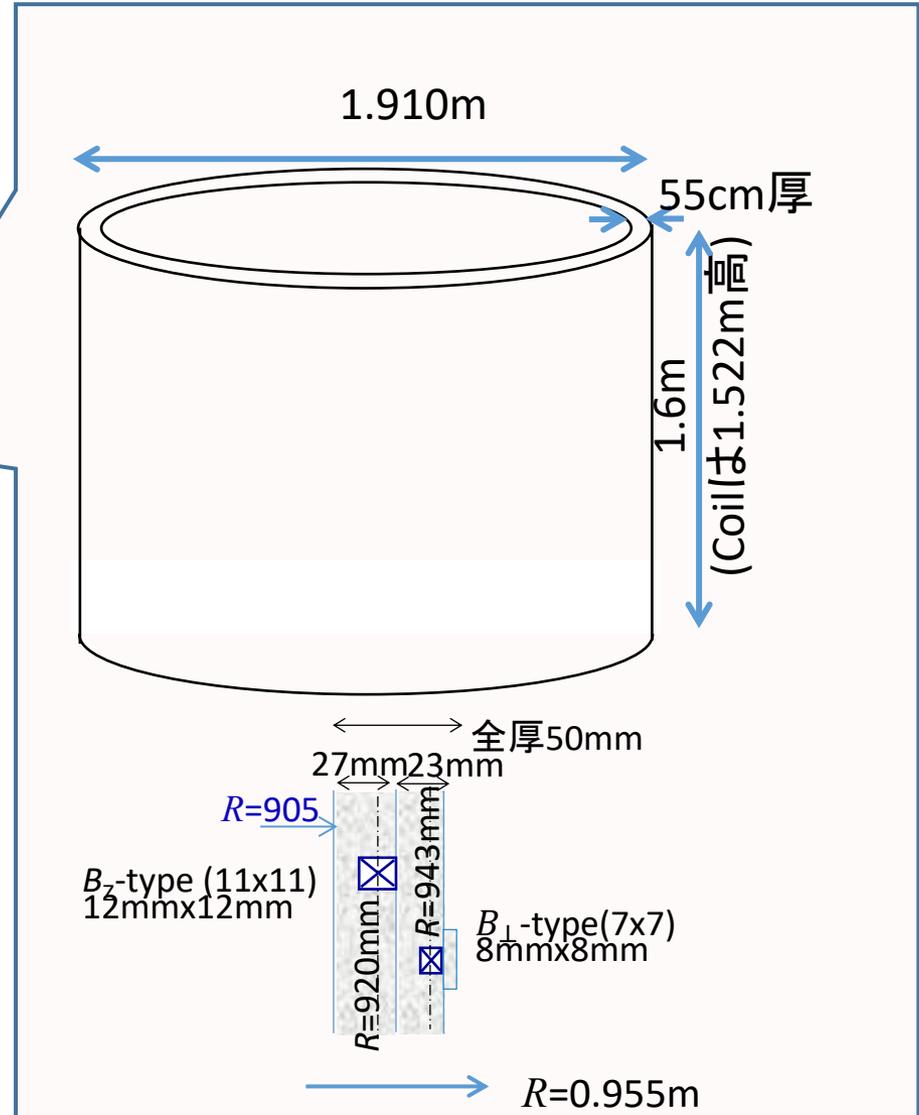
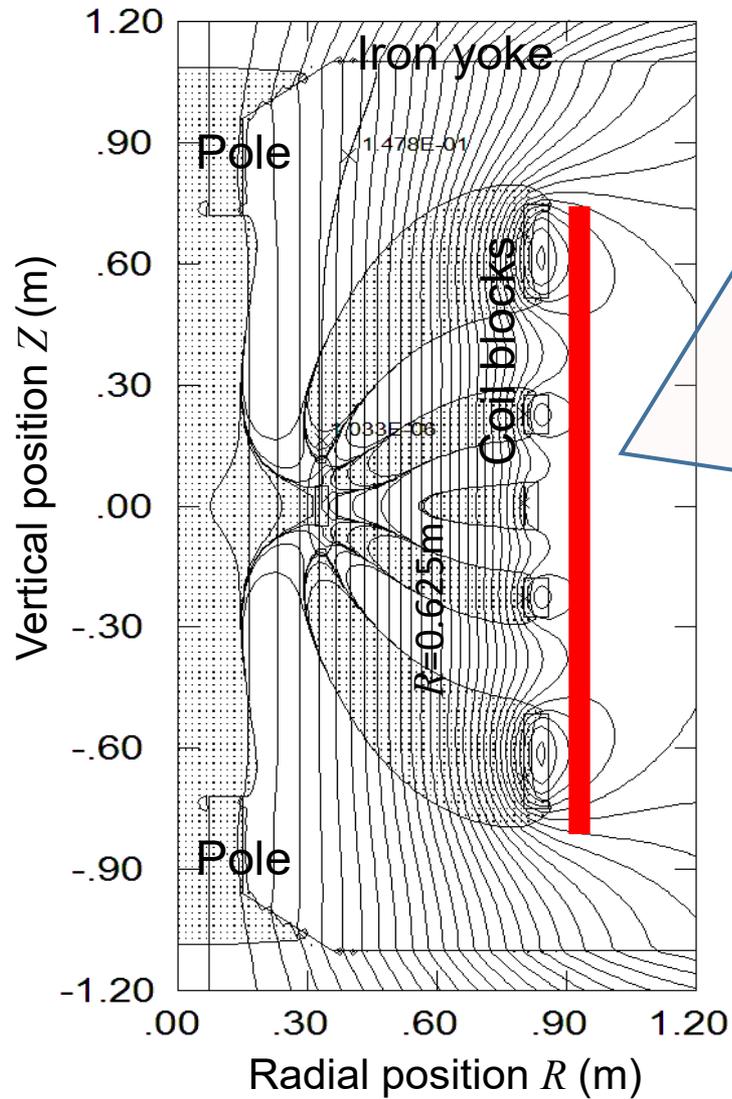


After shimming

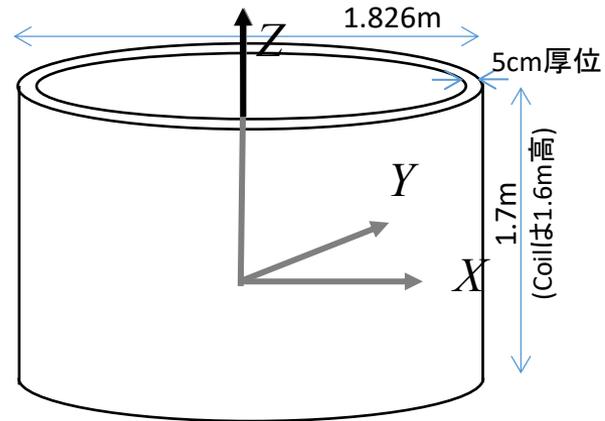
- Homogeneity of B_Z is good enough
- B_R in fiducial area is larger than 1 Gauss in X-Y plane.



能動シミング用シムコイル(配置位置)

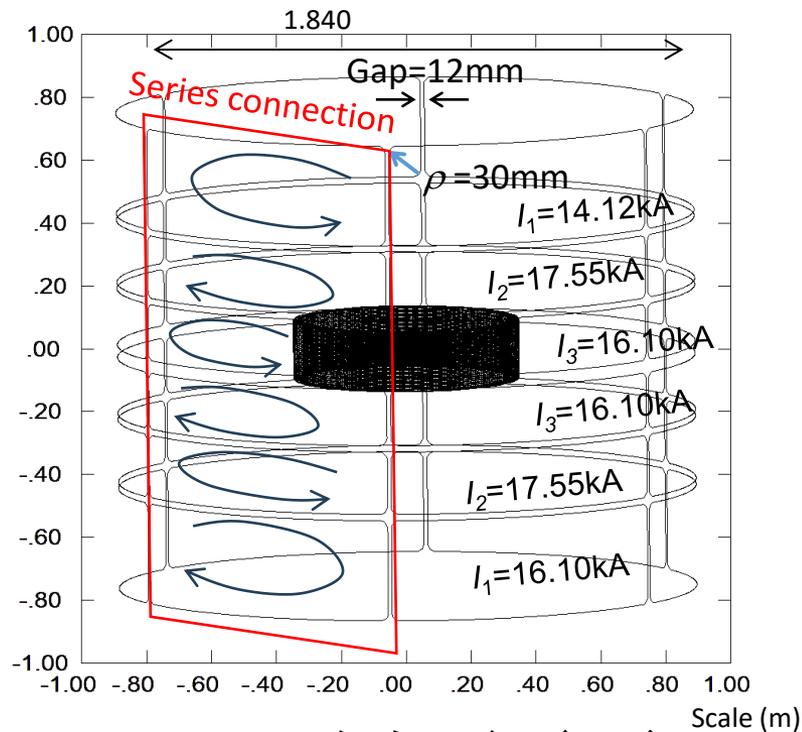


能動的(Active)シミング用シムコイル

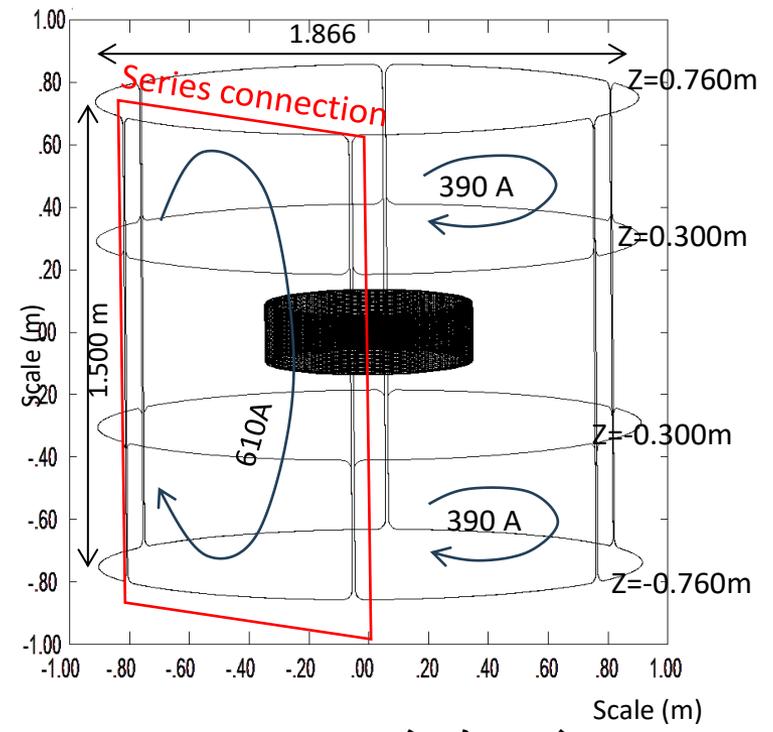


B_Z -type: WFF励磁の磁場の補正(主磁場の変動、WFFの誤差磁場)

B_{\perp} -type: 受動シミングでは扱えない B_{\perp} 成分の補正



B_Z -typeシムコイル(BZ0)



B_{\perp} -type シムコイル

B_{\perp} -type シムコイルの電流路

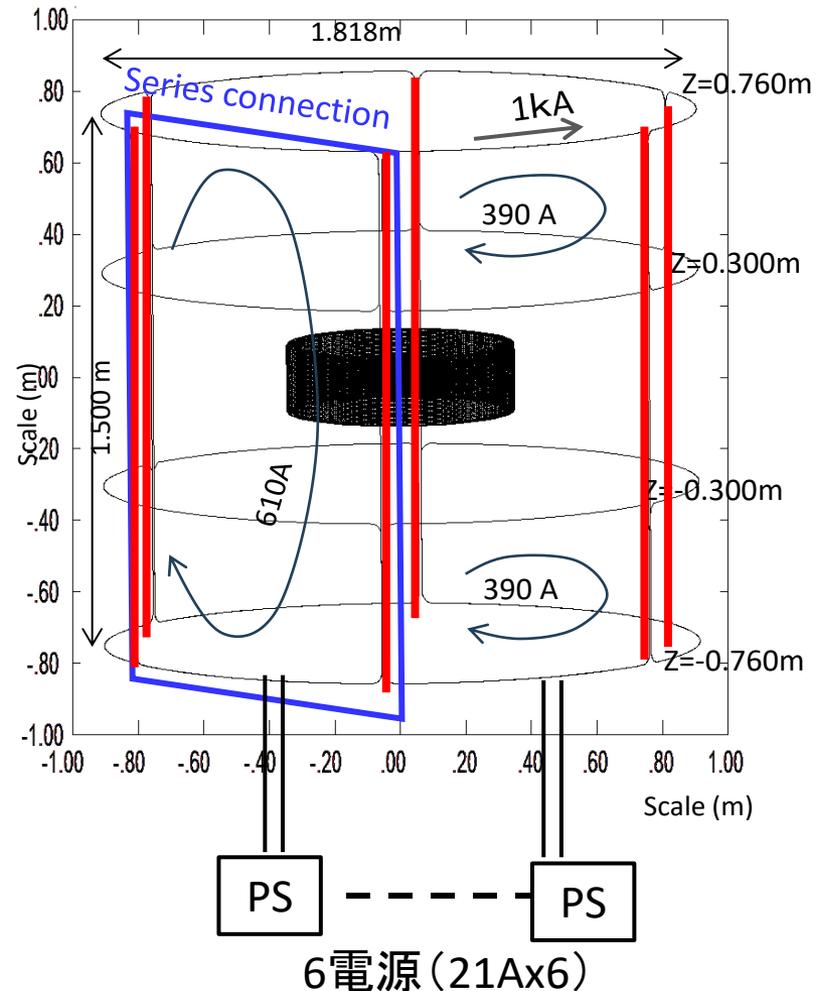
B_{\perp} -type シムコイルの磁場(Z 軸に垂直方向の磁場)は、 Z 方向電流により発生するベクトルポテンシャル A_Z により発生する。

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{i(\mathbf{X}_C)}{|\mathbf{X} - \mathbf{X}_C|} d\mathbf{l}$$

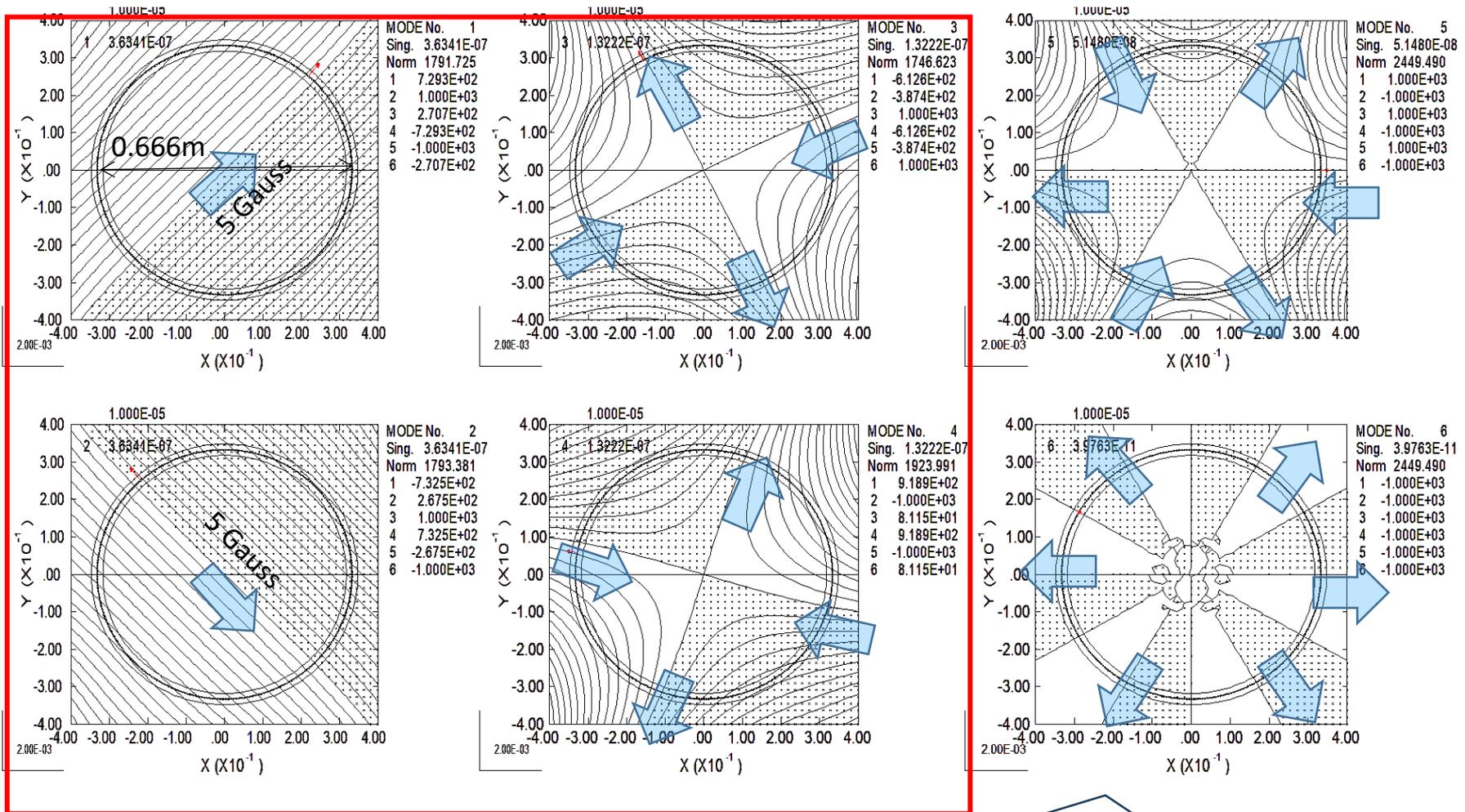
ベクトルポテンシャル \mathbf{A} と電流 i は平行
 R, θ, Z の円筒座標で考えると

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_R &= \{\nabla \times \mathbf{A}\}_R = \frac{1}{R} \frac{\partial A_Z}{\partial \theta} - \frac{\partial A_{\theta}}{\partial Z} \\ \mathbf{B}_{\perp} &= \{\nabla \times \mathbf{A}\}_{\perp} = -\frac{\partial A_Z}{\partial R} \\ \mathbf{B}_{\theta} &= \{\nabla \times \mathbf{A}\}_{\theta} = -\frac{\partial A_Z}{\partial R} \\ B_Z &= \{\nabla \times \mathbf{A}\}_Z = \frac{1}{R} \frac{\partial R A_{\theta}}{\partial R} \end{aligned}$$

となり、軸 Z 方向電流・ A_Z が重要。
6個の電流値 $\rightarrow A_Z$ 分布の行列から
磁場のSVD固有固有分布(次ページ)



B_{\perp} -type シムコイルの作る磁場($Z=0$ 面, A_Z 等高線)



$B_R = \{\nabla \times A\}_R = \frac{1}{R} \frac{\partial A_Z}{\partial \theta} - \frac{\partial A_\theta}{\partial Z}$ で A_θ による磁場、利用できない。同時発生 of $B_Z = \frac{1}{R} \frac{\partial R A_\theta}{\partial R} \propto Z$ 、はシミングされ、 B_R 成分も変化し、利用者が自由に調整することは出来ない。

B_Z -type シムコイルの電流路(1)

B_Z -type シムコイルの磁場(Z軸方向の磁場)は、周回方向(θ 方向)電流により発生するベクトルポテンシャル A_θ により発生する。

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{i(\mathbf{X}_c)}{|\mathbf{X} - \mathbf{X}_c|} dl$$

ベクトルポテンシャル \mathbf{A} と電流 i は平行

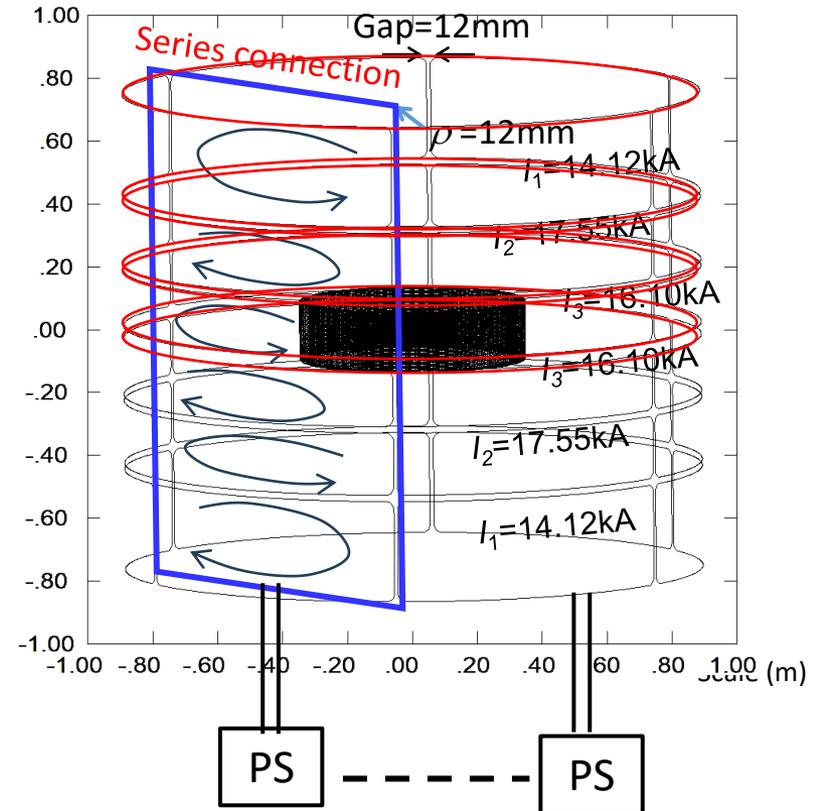
$$B_R = \{\nabla \times \mathbf{A}\}_R = \frac{1}{R} \frac{\partial A_Z}{\partial \theta} - \frac{\partial A_\theta}{\partial Z}$$

$$B_\theta = \{\nabla \times \mathbf{A}\}_\theta = -\frac{\partial A_Z}{\partial R}$$

$$B_Z = \{\nabla \times \mathbf{A}\}_Z = \frac{1}{R} \frac{\partial R A_\theta}{\partial R}$$

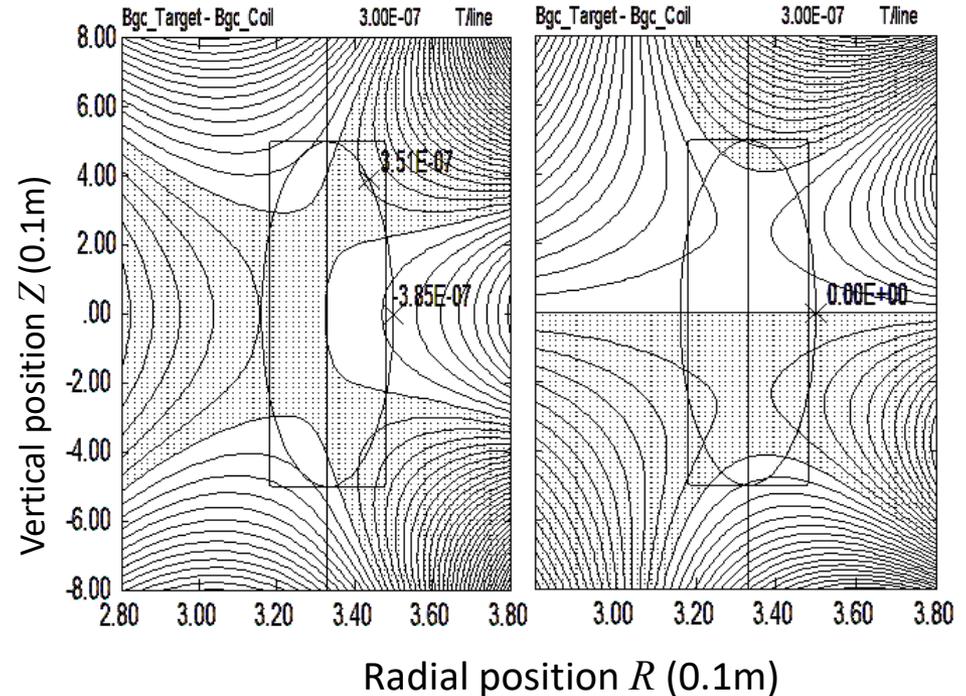
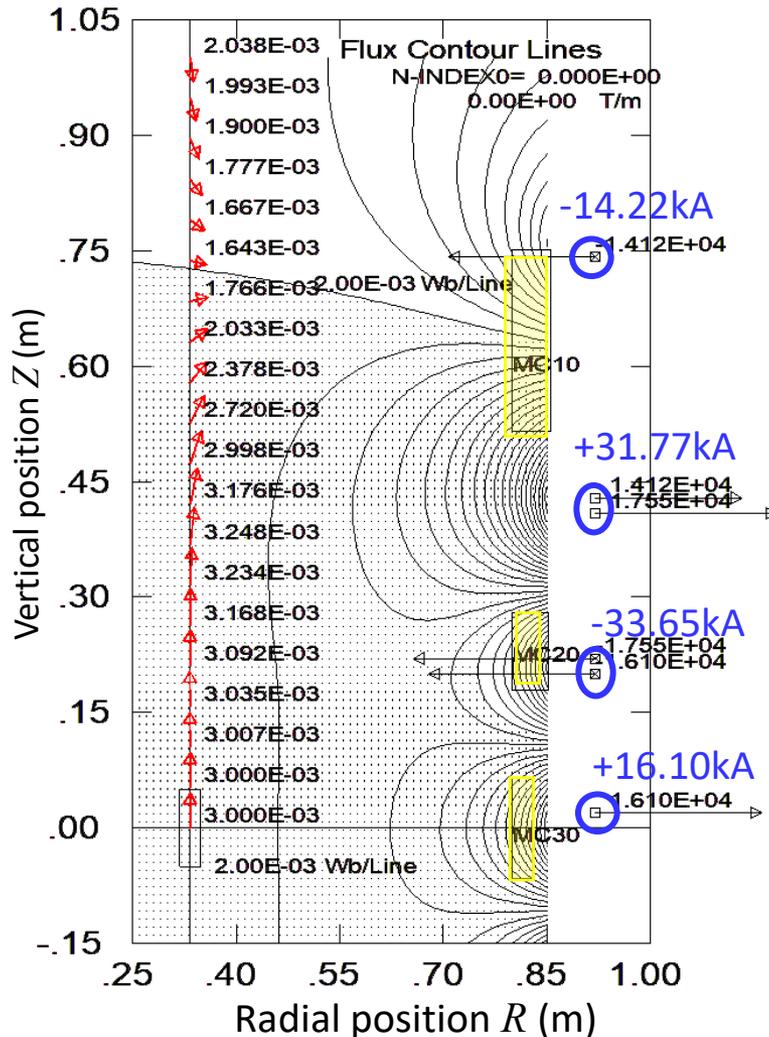
となり、周回方向電流 $\cdot A_\theta$ が重要。

6個の電流値 $\rightarrow A_\theta$ 分布の行列から磁場のSVD固有固有分布(次ページ)



B_Z -type シムコイルの電流路(2)

2Dで周回方向電流位置・大きさ(設計値30Gauss)→周回方向6分割
WFFコイルと主磁場の磁氣的相互作用は無くせない



Shim coil→Main coilの磁束を零として B_Z -type シムコイル励磁による主磁場の変化を無くす。

$$\Phi_{MS} = \sum_{j \text{ 巻き線}} 2\pi R_j^M A_{\phi_j}^S = \sum_{k:CB} 2\pi \int R A_{\phi}^S ds \cong 0$$

{積分はCB(Coil Block)断面内}

B_Z -type シムコイルの電流路(1)

B_Z -type シムコイルの磁場(Z 軸方向の磁場)は、周回方向(θ 方向)電流により発生するベクトルポテンシャル A_θ により発生する。

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{i(\mathbf{X}_C)}{|\mathbf{X} - \mathbf{X}_C|} dl$$

ベクトルポテンシャル \mathbf{A} と電流 i は平行

$$B_R = \{\nabla \times \mathbf{A}\}_R = \frac{1}{R} \frac{\partial A_Z}{\partial \theta} - \frac{\partial A_\theta}{\partial Z}$$

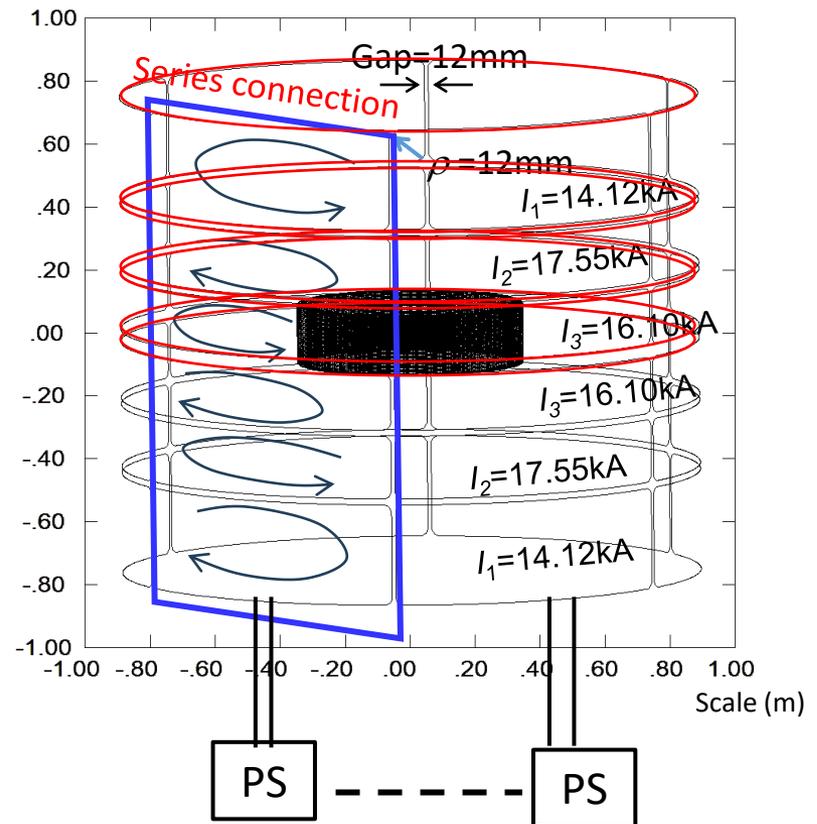
$$B_\theta = \{\nabla \times \mathbf{A}\}_\theta = -\frac{\partial A_Z}{\partial R}$$

$$B_Z = \{\nabla \times \mathbf{A}\}_Z = \frac{1}{R} \frac{\partial R A_\theta}{\partial R}$$

となり、周回方向電流 $\cdot A_\theta$ が重要。

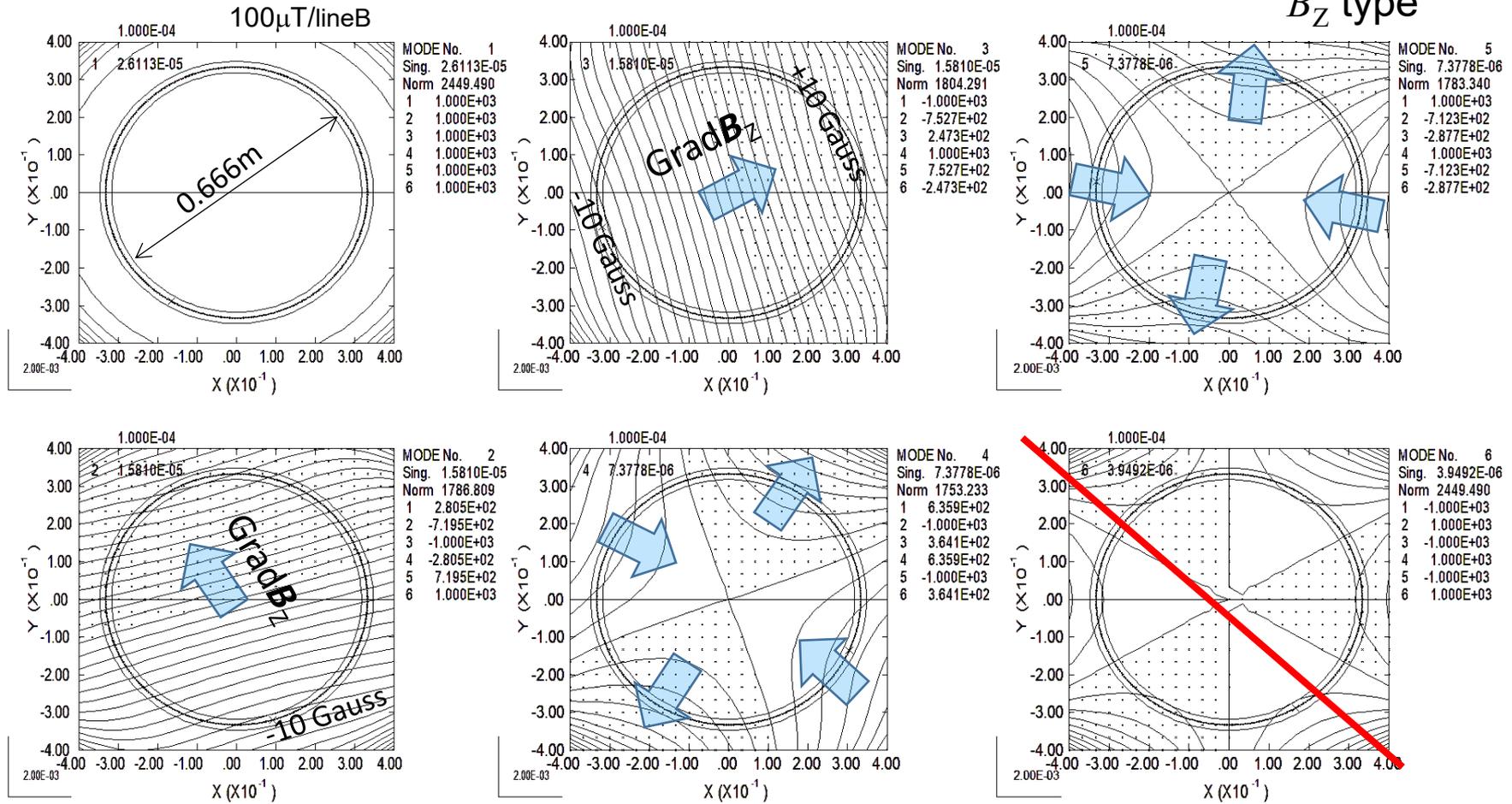
6個の電流値 $\rightarrow B_Z$ 分布の行列から
磁場のSVD固有固有分布(次ページ)

本検討では一様磁場を目指すシムコイルであるが、 μon 軌道中心の上下位置を調整する
 Z_1 シムコイルも今後検討

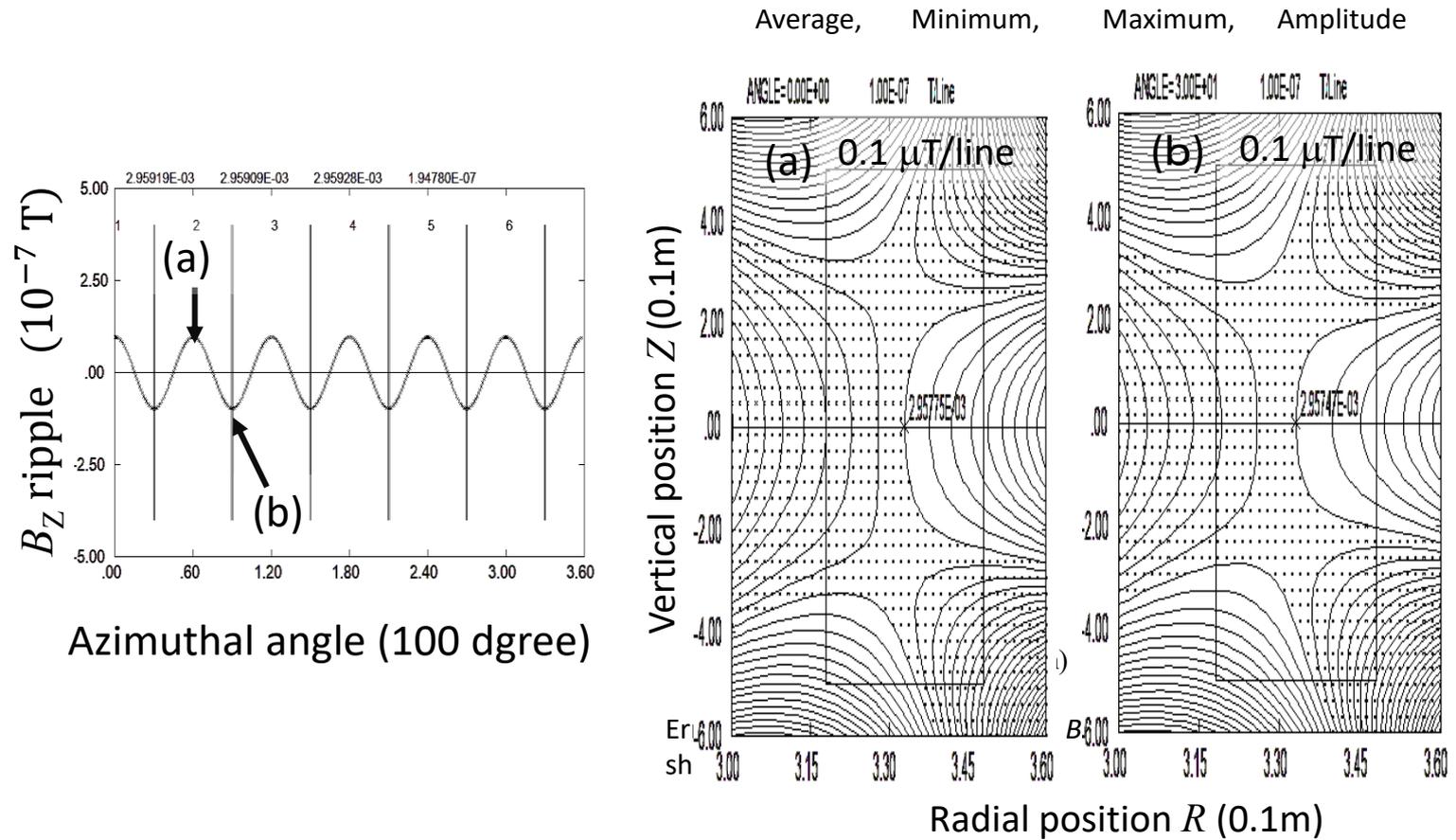


B_Z typeシムコイルの作る B_Z 磁場分布の等高線

コイル電流6個→磁場評価点1500点 B_Z 磁場の行列をSVDした固有分布
(1Gauss/line 定格電流、30Gauss)



定格電流時の周回方向磁場分布(分割部の磁場リップル)



全シムコイル定格通電時の磁場(30Gauss)時の磁場分布

まとめ

g-2/EDM精密計測用3.0T磁石の磁場調整(シミング)機構について議論した。調整機構には、

- ・受動シミング: Coarse用、Fine用シムトレイ・ポケット
- ・能動シミング: B_Z -type shim coil、 B_{\perp} -type shim coil が用意される。さらに、
- ・磁場を空間離散的な計測値から空間連続的に把握するために、磁場分布の再構成計算手法を用意している。

これらを組み合わせて使い、精度良い磁場分布

- ・3.0T一様磁場: $B_Z = 3.0\text{T} \pm 0.3\mu\text{T}$
 - ・WFF磁場: $B_Z = -n \frac{B_Z^0}{R^0} \left\{ (R - R^0) + \frac{Z^2}{2R^0} \right\} \pm 0.3\mu\text{T}$
- を実現する予定である。

ありがとうございました