

# $g-2/EDM$ 精密計測用ミュオン蓄積磁石内配置の弱収束磁場コイルの設計

## DESIGN OF WEAK FOCUS FIELD COIL TO STABILIZE MUON ORBITS AND FOR PRECISION MEASUREMENTS OF $g-2/EDM$ IN THE SUPERCONDUCTING MUON STORAGE MAGNET

阿部充志<sup>A)</sup>, 佐々木憲一<sup>A)</sup>, 三部 勉<sup>A)</sup>, 中山久義<sup>A)</sup>, 飯沼裕美<sup>B)</sup>, 山中隆志<sup>C)</sup>

Mitsushi Abe<sup>A)</sup>, Ken-ichi Sasaki<sup>A)</sup>, Tsutomu Mibe<sup>A)</sup>, Hisayoshi Nakayama<sup>A)</sup>, Hiromi Inuma<sup>B)</sup>, Takashi Yamanaka<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> KEK, <sup>B)</sup> Ibaraki Univ., <sup>C)</sup> Kyushu Univ.

### Abstract

A WFF-coil (Weak Focus Field coil) which will be placed in a muon storage magnet for  $g-2/EDM$  precision measurements, has been designed, based on TSVD (Truncated SVD, SVD: Singular Value Decomposition) of a non-regular response matrix from co-axial circular coil currents to magnetic field in the storage region. WFF-coil consists of 7 CBs (coil blocks), which are placed just inside of main CBs to use the support structure jointly. The CBs has  $-9.71$  to  $+11.55$  kAT with rated conductor current 68.35 A (roughly 1.1 mm diameter NbTi super conductor) and rated WFF strength of  $n_{index}=1.5 \times 10^{-4}$ .

### 1. はじめに

J-PARC では Muon の磁気・電気モーメント( $g-2/EDM$ )を高精度測定する実験(E34)の準備を進めている。使用する超伝導磁石は、muon を周回・蓄積するシリンダー状の muon 蓄積領域(断面: 3 cm 半径方向幅、10 cm 高で直径 66.6 cm)に、高磁場(3.0 T)で超高均一磁場(磁場振幅  $\pm 0.1$  ppm、均一度 0.2 ppm)を持つ[1, 2]。この均一度は、MRI 用超伝導磁石の場合[3]に比べ約一桁良い均一度である。

Figure 1 のように、2 つの常伝導 ASSM(Active Shield Steering Magnet)[4, 5]により軌道を微調整して磁石上部よりらせん入射した muon は、キッカーの半径方向磁場により、赤道面付近で軸方向移動を止められる[1]。また、周辺磁場もらせん入射 [1, 2, 6]を可能とする必要がある。このような磁場を発生する起磁力配置の設計手法は既に関し、当時の設計状況を反映した起磁力配置設計例と共に既に報告した[2, 7-9]。

そして、入射された muon は弱収束磁場(WFF: Weak Focus Field)により周回軌道を安定に保つ。数ヶ月の長時間通電であり、安定な磁場が求められるので、WFF-coil は超伝導を想定しており、主コイルと同様に液体 He 温度である。WFF でも、muon 蓄積領域の各位置で  $\pm 0.1$  ppm 以内の精度が必要であり、MRI 磁石設計用に開発し、本実験の muon 蓄積磁石の設計にも応用した特異値分解(SVD: Singular Value Decomposition)利用のコイル設計手法を適用した。精度良い WFF に必要な CB(Coil Block)数の検討は既に報告した[9]が、今回は超伝導線の巻き数を具体化して、配置位置を最適化した。位置精度を高めるために主コイルの支持構造を利用するが、磁気結合が無視できないため、WFF-coil 励磁時には主コイルの電流も調整し、BZ-type シムコイル[10]も用いて磁場強度の微調整を行う。実機磁場では組み立て誤差などによる誤差磁場も予想されるので、WFF 励磁後には磁場シミング(磁場分布の微調整)も行うことになる。以上のような WFF コイルを設計したので、ここで紹介する。

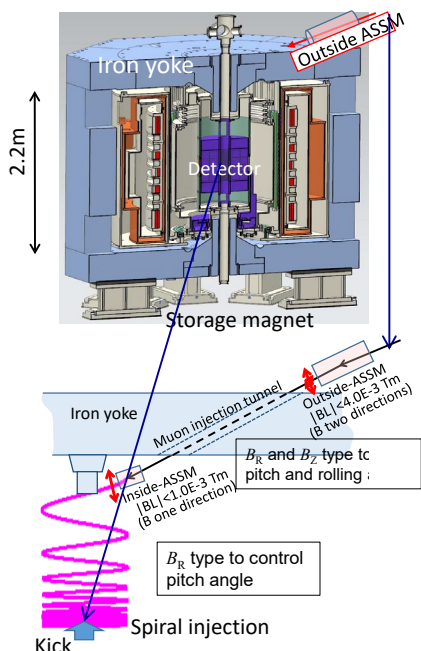


Figure 1: Schematic drawing of storage magnet, muon spiral injection and two active shield steering magnets.

# pasj-desk@conf.bunken.co.jp

### 2. WFF-coil の仕様

#### 2.1 磁場勾配指数 $n_{index}$ の定義

2D(2次元:半径  $R$ , 軸方向  $Z$ )磁場分布で、半径方向に磁場勾配がある場合、下記のように近似的に表示する。

$$B_z(R) = B_{z0} \left( \frac{R}{R_0} \right)^{-n_{index}} \quad (1)$$

ここで、 $B_z(R)$ は半径位置依存の軸方向磁場成分で、基準位置  $R_0$  での磁場強度が  $B_{z0}=3.0$  T である。この磁場中で  $\mu\text{on}$  が  $R_0=0.333$  m の周回軌道を取るとき、微小な軌道変位( $\Delta R, \Delta Z$ )が発生したときに、軌道の復元には、

$$0 < n_{\text{index}} < 1 \quad (2)$$

が必要である。J-PARC の E34 実験では  $n_{\text{index}}=1.5 \times 10^{-4}$  と計画している。

## 2.2 WFF-coil 設計の目標磁場

この  $n_{\text{index}}$  を持つ WFF-coil が作る磁場( $B_R^{\text{WFF}}, B_Z^{\text{WFF}}$ )は、

$$B_R^{\text{WFF}} = -n_{\text{index}} \frac{B_{z0}}{R_0} Z \quad (3)$$

$$B_Z^{\text{WFF}} = -n_{\text{index}} \frac{B_{z0}}{R_0} (R - R_0) + \frac{1}{R} \frac{\partial B_z Z^2}{\partial R} \quad (4)$$

である[9]。また、上記の WFF は  $\mu\text{on}$  蓄積領域では 1 ガウス以下であり、磁場強度への影響は限定的である。

ここで議論している磁場は 2D(半径  $R$ , 軸方向  $Z$ )磁場で、 $R=0$  の磁石軸を中心とする周回方向に一様な磁場であり、磁場を発生する電流は同軸線輪電流である。このため、WFF を作るベクトルポテンシャルは、周回方向成分  $A_\phi$  のみで、

$$A_\phi = C_{\text{WFF}} \left\{ R \left( \frac{R}{3} - \frac{R_0}{2} \right) - \frac{Z^2}{2} \right\} + \frac{C_0}{R}, \quad [\text{Wb/m}] \quad (5)$$

である。ここで、 $C_{\text{WFF}}$  は WFF の磁場勾配を示し、

$$C_{\text{WFF}} = -n_{\text{index}} \frac{B_0}{R_0}, \quad [\text{T/m}] \quad (6)$$

ここで、 $C_0$  は磁場に影響しない[Wb]の次元を持つ任意の定数である。このベクトルポテンシャルを電流配置の目標磁場として、WFF-coil の配置を設計した。 $C_0$  に任意の値を使えるという意味で、式(3, 4)を直接使うより、電流配置・WFF-coil 設計の自由度が増えると言える。また、半径  $R$  内部の磁束  $\Phi$  は、

$$\Phi = 2\pi R A_\phi \quad (7)$$

である。 $C_0$  により磁場を変えることなく、磁束を変更でき、主コイルとの相互インダクタンスを調整できる可能性がある。しかし、これは理想的な場合で、実設計では式(3~5)の目標磁場を、限られた自由度で近似的に再現する。そのため、正確な目標磁場の再現は出来ない。実設計では、式(5)で設計した電流配置による磁場を、式(3, 4)の磁場と比較しながら WFF-coil を設計していく。

## 3. 電流配置の計算法

### 3.1 連続分布電流での検討

電流配置の計画は、参考文献[2, 9, 11]の MRI 磁石や

本磁石主コイルの設計手法と同様の方法を採用した。まず、ソレノイド状に線輪電流を連続的に多数配置し、軸方向の分布電流を求めて概略の電流配置を決め、その後、離散的に配置して巻き線まで考慮した具体的なコイル配置を設計する。

Figure 2 の体系で検討する。半径-軸方向の 2D で示している。この図には、主コイル位置・形状、支持構造とともに WFF-coil の検討用に配置した線輪電流位置を×印(下部省略)で示した。連続分布電流の検討段階では、70 個の線輪電流を配置している。これらの線輪電流の  $j$  番目位置の単位電流が蓄積領域に配置する  $i$  番目磁場評価点(MFEP; magnetic Field Evaluation Point)につくる単位電流あたりの磁場(ベクトルポテンシャルの周回方向成分  $A_\phi$ )は、

$$A_{ij} = \frac{\mu_0 I \sqrt{R_j}}{\pi \sqrt{k R_i}} \left[ \left( 1 - \frac{k}{2} \right) K(k) - E(k) \right] \quad (8)$$

$$k = \frac{4R_j R_i}{(R_j + R_i)^2 + Z_{ij}^2} \quad (k=0 \sim 1.0) \quad (9)$$

である。ここで、 $R_i, R_j, Z_{ij}$  はそれぞれ、 $i$  番目 MFEP の半径位置、 $j$  番目電流の半径位置、そして、2 つの位置の間の軸方向位置の差である。完全楕円積分  $K(k), E(k)$  には Chebyshev 近似[12, 13](ただし、多項式の係数は[13]の値を勧める)を使うことで良い精度を短計算時間で確保する。そして、電流分布  $\mathbf{I}$  と磁場分布  $\mathbf{A}_\phi$  の関係は、

$$\mathbf{A}_\phi = \mathbf{A} \mathbf{I} \quad (10)$$

と書ける。 $\mathbf{A}$  は非正則(電流数と磁場計測点数は異なり非正方)なので、一般逆行列  $\mathbf{A}^-$  を、SVD を利用し、

$$\mathbf{A}^- = \sum_{\text{all } m} \mathbf{v}_m \mathbf{u}_m^t / \lambda_m \quad (11)$$

$$\mathbf{I}_m = \mathbf{v}_m \mathbf{u}_m^t \mathbf{A}_\phi^{\text{TG}} / \lambda_m, \quad (12)$$

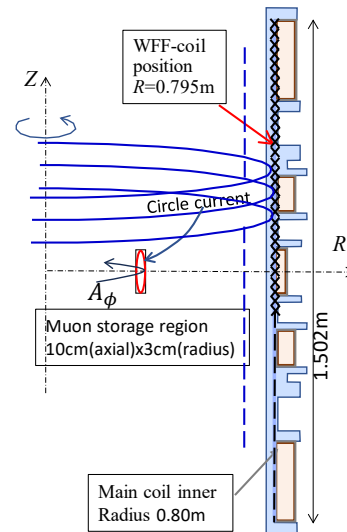


Figure 2: Geometrical arrangement to discuss WFF-coil placement.

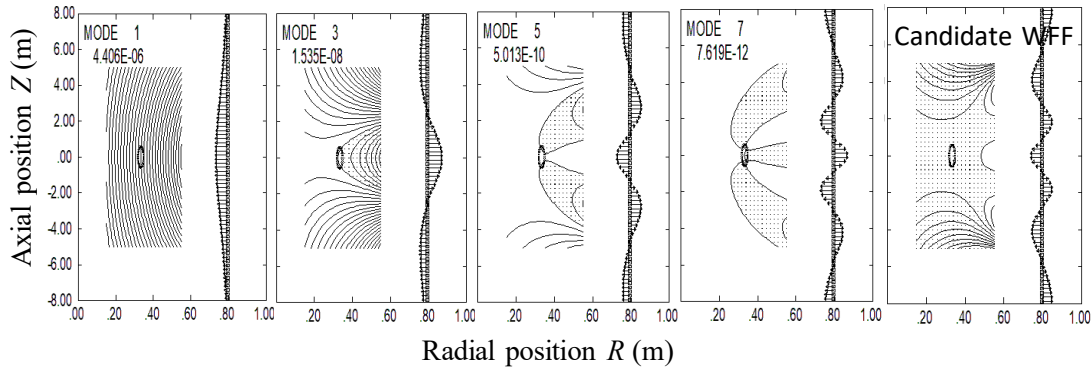


Figure 3: SVD eigenmodes to construct WFF using 70 circular currents. Odd 4 eigenmodes are used.

$$I = \sum_{m=1}^{M_T} I_m \quad (13)$$

で電流分布  $I$  を求める。磁場分布を表す基底  $u_m$ 、これと一対一に対応した電流分布の基底  $v_m$ 、および、相互の換算係数 [T/A] と考えることのできる特異値  $\lambda_m$  の組み合わせを固有モード番号  $m$  について加算した式(13)で電流分布  $I$  を表現できる。

Figure 3 には 70 本の線輪電流による電流と磁場分布を示す。左側 4 個は奇数番号の SVD 固有モードで、再右側は式(13)の結果である。再右側の電流分布には、正負の電流ピークはそれぞれ 4 個と 3 個が存在する。そして、これらのピーク位置に併せて合計 7 本の電流を配置し、やはり、4 個の SVD 固有分布で WFF 用の電流配置を作ることも可能である。

この電流分布の計算結果を Table 1 に 2 組、線輪電流数を 70 本と 7 本について示している。行の上から下に加算 {式(13)} する固有モード数を増やして、式(3, 4)の磁場と設計磁場の差を残差磁場  $B_Z^{RE}$  として示した。固有モードの選択数に依存して、求める  $B_Z^{RE}$  は小さくなる。今回は  $M_T=7$  (奇数番目が上下対称で利用可能)、SVD 固有モード 4 個で電流分布を構成し、 $\pm 0.1$  ppm (0.3  $\mu$ T) 以内の  $B_Z^{RE}$  が実現できる電流配置が可能である。

式(3-5)の磁場を高精度で再現するには加算割合は全て 1.0 とし、多数を加算することが良い。一方、残差磁場の許容範囲で、電流を下げておきたい。これは、大きな電流で、導体の設置誤差があれば、誤差磁場が大きくなるためである。このため、Table 1 と Fig. 3 には書かれていないが、9 番目の SVD 固有モードは除外している。

Table 1: Discussion on SVD Eigenmodes to be Used

No.	Add factor				70 currents		7 currents	
	1	3	5	7	$B_Z^{RE}$ (0.1mT)	Total (kA)	$B_Z^{RE}$ (0.1mT)	Total (kA)
1	1.0	1.0	0.0	0.0	-44.3~+57.2	3.43	-44.5~57.5	3.47
2	1.0	1.0	0.5	0.0	-22.0~30.2	8.12	-22.3~30.6	8.71
3	1.0	1.0	1.0	0.0	-4.11~3.90	15.49	-3.85~3.66	17.74
4	1.0	1.0	1.0	0.5	-2.18~2.38	42.50	-2.08~2.26	36.32
5	1.0	1.0	1.0	0.9	-1.04~1.16	74.96	-1.03~1.15	62.02
6	1.0	1.0	1.0	1.0	-0.82~0.86	83.08	-0.84~0.87	68.44

Notice: Currents are filament circle currents

Table 1 で、No. 5 と 6 では、 $B_Z^{RE}$  は  $\pm 0.035$  ppm 程度の範囲であり、小さいと判断して、4 個の固有モードを使うことにした。Table 1 の右側には、固有モード数 7 個使用の場合に現れる正負合計 7 個の電流ピーク位置に 7 個の線輪電流を配置した場合である。同等の電流で、同様な磁場精度を実現できることが判る。そこで、7 本(後で 7 個の CBs)の線輪電流での WFF を構成することにした。

WFF 磁場は式(5)の周回方向磁気ポテンシャル  $A_\theta$  を目標磁場として利用する。この式で、 $C_0$  は任意の値をとることができるので、主コイルと WFF-coil との相互インダクタンスを小さくすることを試みた。しかし、WFF-coil 励磁が主コイル電流に与える影響を避けることはできなかった。結果として、 $C_0 = -0.870 \times 10^{-6}$  とした。この値は、磁場の式(3, 4)を用いたときの電流分布に近い値となった。限られた数の起磁力配置では、磁場分布が容易に劣化し、 $C_0$  を変化させる範囲は狭い。そのため、磁場が良好な分

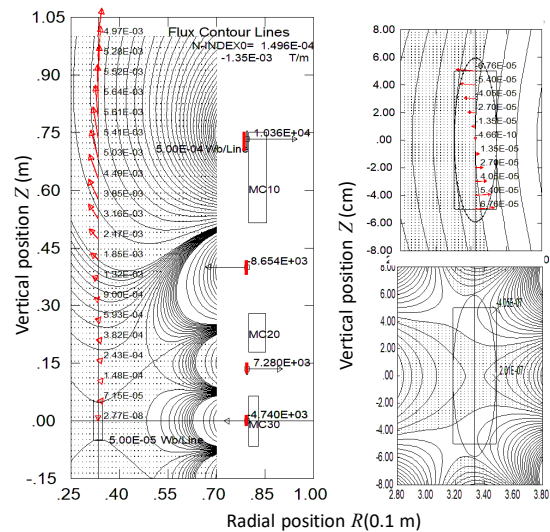


Figure 4: WFF constructed by the 4 SVD eigenmodes. Left frame plots WFF field by the 7 filament circle currents by equi-flux lines (0.5 mWb & 0.05 mWb/line). Arrows (red) indicate magnetic field by the WFF and arrows (black) indicate current magnitudes. Right top frame plots  $B_Z$  distribution by contour lines at every 20  $\mu$ T. Right bottom frame plots  $B_Z^{RE}$  by contour lines at every 0.15  $\mu$ T.

布となる条件で  $C_0$  を選択した。

この 7 本の線輪電流で算出した磁場分布を Fig. 4 に示す。電流値は連続値(実数値)である。WFF-coil 電流が作る磁場は、muon 蓄積領域だけでなく、他の領域でも、磁場を作る。この磁場は、らせん入射領域で、蓄積領域より強くなっており、入射の検討には WFF-coil による磁場の考慮も必要である。Figure 4 右側には  $B_z$  分布(上)と磁場設計の残差磁場  $B_z^{RE}$ (下)を等高線で示す。一様磁場(3.0T) を主磁場として設計 WFF に加算している。この磁場分布から、目標の精度内に収まる良好な磁場を発生する電流配置が求まっていると判断できる。

### 3.2 WFF-coil 配置の検討

Table 2 の左側はこの 7 本の線輪電流の位置と電流値を書いている。正負それぞれ 4 本と 3 本の電流である。しかし、実コイル設計では巻き線構造を反映し、コイルの大きさを考慮してコイル配置を決める必要がある。WFF-coil は、Fig. 2 でも判るように、主コイルのすぐ内側近傍に配置する。そのため、軸方向に長く半径方向に薄い断面とする必要があり、Table 2 右側に示す巻き線構造とした。NbTi 直径 1.1 mm<sup>φ</sup> 超伝導線を想定し、素線電流は 68.35 A としている。巻き数整数化の様子を、Fig. 5(a)に示している。また、Fig. 5(b)は配置位置の断面である。半径方向には 4 層で細長い CBs とし、主コイルすぐ内側に配置している。

Table 2: WFF-coil Placements ( $n=1.5E-4$ )

CB 番号	線輪電流計算			巻き線数整数化 CBs			起磁力 (kA)
	CB 中心位置 $R(m)$	CB 中心位置 $Z(m)$	電流 $I_j(kA)$	中心位置 $Z(m)$	Turn 数 $RxZ$	断面 $RxZ$ (mm)	
1	0.795	0.733	+11.6114	0.72895	4x42, -1	3.81x46.2	+11.551
2	0.795	0.415	-9.7217	0.41473	4x35, -1	3.81x38.5	-9.6373
3	0.795	0.140	+7.5203	0.13715	4x27, -1	3.81x29.2	+7.4501
4	0.795	0.0	-9.6790	0.0	4x35, -1	3.81x38.5	-9.7057
5	0.795	-0.140	+7.5203	-0.13715	4x27, -1	3.81x29.2	+7.4501
6	0.795	-0.415	-9.7217	-0.41473	4x35, -1	3.81x38.5	-9.6373
7	0.795	-0.733	+11.6114	-0.72895	4x42, -1	3.81x46.2	+11.551

導体:1.1 mm $\phi$ NiTi 超伝導線を想定、定格 70 A, 最大 140 A

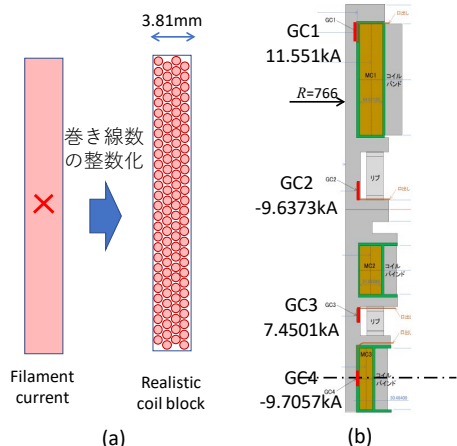


Figure 5: Schematic drawings of cross-sections. (a) CB with integer winding turn. (b) WFF-coil positions at upper part.

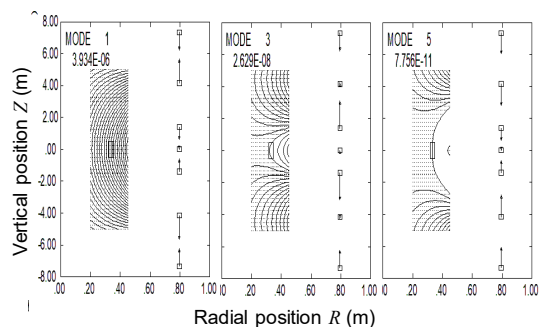


Figure 6: SVD eigenmodes to tune CB Z positions.

Table 2 左右の電流値を比較すると、正確な電流の再現はできない事が解る。そのため、許容範囲の残差磁場の正確な磁場を構成できる左の場合に比べ、現実的な右側の CB 配置では、磁場分布は大きな誤差磁場を持つ(10  $\mu$ T 程度)。この誤差磁場を低減するために、赤道面( $Z=0$  m)以外に配置され CBs の Z 位置を調整する。主コイル(3.0 T)の設計では、CBs の軸方向 Z と共に半径 R 方向の位置も調整した[2]。しかし、WFF-coil は主コイルの近傍にあり、R 方向位置調整は不可であり、Z 方向のみ調整する。

この位置調整にも SVD 固有モードを利用する。Figure 6 の固有モードである。やはり、奇数番の固有モードが上下対称で、調整に利用した。Figure 5 最右は 5 番目( $m=5$ ) SVD 固有モードであるが、この固有モードは特異値  $\lambda_m$  が小さく、式(12)から判るように Z 位置調整量が過大となるので、実際的には利用できない。そのため、左側 2 個の固有モードで調整した。十分な調整が出

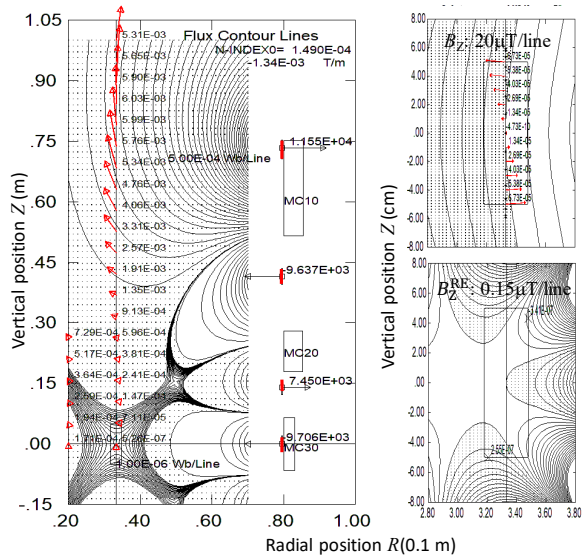


Figure 7: WFF produced by the designed 7 CBs at rated conductor current of 68.35 A. Left frame plots WFF field by the 7 CBs by equi-flux lines (0.5 mWb & 0.05 mWb/line). Arrows (red) indicate magnetic field by the WFF and arrows (black) indicate current magnitudes. Right top frame plots  $B_z$  distribution by contour lines at every 20  $\mu$ T. Right bottom frame plots  $B_z^{RE}$  by contour lines at every 0.15  $\mu$ T,

来なければ、Fig. 2 の配置位置の再検討を考える必要がある。本設計では試行錯誤を伴ったが、この WFF-coil は十分な精度(小さい残差磁場)に調整できた。この CB 位置調整では、Table 2 右左の Z 位置の比較から、最大 4.05 mm の調整を実行した。

Table 2 右側の CB 数 7 個が発生する磁場分布を Fig. 7 に示す。電流値は表中の巻き数と素線電流 68.35 A を掛けた値である。WFF-coil が作る磁場は、Fig. 4 と同様に、muon 蓄積領域だけでなく、他の領域でも、磁場を作る。この磁場は、らせん入射領域で、蓄積領域より強くなっており、muon 入射軌道の検討には WFF の考慮も必要である。

Figure 5 右側には  $B_z$  分布(上)と磁場設計と差異の残差磁場  $B_z^{\text{RE}}$ (下)を等高線で示す。参考文献[2]の手法で求めた設計磁場を主磁場として設計 WFF に加算している。CB 巻き数の設定と主磁場の加算で、Fig. 4 の線輪電流・連続電流値の磁場に比べ、残差磁場は muon 蓄積領域で小さくなっている。これは、試行錯誤の設計結果であるが、この磁場分布から、目標の精度内に収まる良好な磁場を発生する WFF-coil 配置の設計が纏まったと言える。

### 3.3 討論

蓄積磁石の励磁には、(i)主磁場と磁場シミング、(ii)WFF-coil 励磁と磁場シミング、(iii)シムコイル[10]励磁が順を追って行われる。WFF-coil にも設置誤差が存在し、最大で数  $\mu\text{T}$  程度の誤差磁場が発生すると予想する。そのため、主磁場に対してだけでなく WFF-coil 励磁後にもシミングが必要である。WFF のシミングは磁場強度の勾配が存在する場合の磁場シミングであり、計測位置精度の高精度化が課題と思われる。

また、主コイルと WFF-coil とは相互インダクタンスが存在する。WFF-coil を定格(68.35 A,  $n_{\text{index}}=1.5 \times 10^{-4}$ )に立ち上げると、主磁場コイルを永久電流モードで通電している場合、約 41 Gauss だけ主磁場が弱まると計算されている。これは、Fig. 5(b)のように WFF-coil 群を主コイルのごく近傍に配置したためでもある。一方で、この配置は、強固で精度良い主コイルの支持構造を利用しているので、設置誤差は小さいと期待できる。この利点を考えて、WFF-coil 配置を決めている。

一方、WFF-coil 励磁時の主磁場低下も無視できない。このような磁場変動を避けるために、WFF-coil 励磁時には主コイルの電源も接続し電流を調整する励磁方法を採用する。この方法でも、数 Gauss 程度の磁場変動は避けられないと予想する。そのため、シムコイルは磁場強度の微調整機能も持つように設計されている。

シムコイルについては、主コイルとの磁氣的相互作用を無くす設計が可能であり、そのような設計を行っている。

## 4. まとめ

g-2/EDM 精密計測用磁石内に設置する弱収束磁場コイル(WFF-coil: WFF: Weak Focus Field)の設計を行った。電流から磁場分布への応答行列の特異値分解(SVD)で得た固有モード 4 個を重ね合わせて、電流配置を計画し、具体的巻き線構造を考え、CB(Coil Block)配置を具体化した。そして、CB の軸方向動きに対する SVD 固有モード 2 個を利用して、計画した磁場を再現す

るように、コイル軸方向位置を調整し、WFF-coil の設計とした。このコイルは次の特徴を持つ。

- (1) 7 個のコイル群(定格: -9.71~11.55 kA)で構成され、+38.00, -29.98 kA の正負電流で構成され、定格 WFF は  $n_{\text{index}}=1.5 \times 10^{-4}$ (主磁場 3.0 T)である。
- (2) 各コイルの半径方向幅は 3.81 mm, 軸方向幅は 29.2 mm~49.2 mm である。
- (3) 超伝導線には 1 mm $\phi$  程度で、定格 68.35 A, 最大 140 A を想定する。
- (4) WFF-coil の CBs 群は主コイルの直内側配置で、主コイル・WFF-coil で支持構造を共有する。

## 謝辞

本研究は、科学研究助成事業(科研費) JP19H00673 のサポートを受けています。

## 参考文献

- [1] H. Iinuma *et al.*, “Three-dimensional spiral injection scheme for g-2/EDM experiment at J-PARC”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 832, 2016, pp. 51-62.
- [2] M. Abe *et al.*, “Design method and candidate of a magnet for muon g-2/EDM precise measurement in a cylindrical homogeneous volume”, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A, vol. 890, 2018, pp. 51-63.
- [3] T. C. Cosmos, M. Parizh, IEEE TAS vol. 21 (2011), p. 2104.
- [4] 阿部充志 他, “g-2/EDM 精密計測用超伝導磁石内設置能動磁気遮蔽型ステアリング磁石の試設計”, 第 17 回日本加速器学会年会, No. FRPP46, online, 2020 年 9 月 2~4 日.
- [5] M. Abe *et al.*, “Design method of active shield steering magnet for fine tuning of muon injection orbit into g-2/EDM precision measurements magnet”, IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 32, Issue 6, 2022, p. 7007505.
- [6] 飯沼 他, “J-PARC muon g-2/EDM 実験用ビーム入射キッカーの磁場設計”, 本年会(第 19 回日本加速器学会年会), TUP036, 2022 年 10 月 18 日.
- [7] 阿部充志, “プロジェクトレビュー、特異値分解固有モードを利用した磁場設計(核融合装置技術から応用した磁場設計)”, プラズマ・核融合学会誌 95, No. 4, 2019, p. 155.
- [8] 阿部充志 他, “g-2/ED 精密計測用ミューオン蓄積超伝導磁石の磁気設計の最新化”, 第 18 回日本加速器学会年会, No. THP016, Online, 2021 年 8 月 9~12 日.
- [9] 阿部充志, “10. g-2/EDM 超伝導磁石開発と MRI への精密磁場技術”, 高エネルギー加速器セミナー OHO'22, 2022 年 OHO セミナー超伝導磁石技術, 2022 年 9 月.
- [10] 阿部充志 他, “g-2/EDM 精密計測用ミューオン蓄積超伝導磁石の磁場調整方針”, 第 16 回日本加速器学会年会, No. THOH07, 於京都大学 2019 年 7 月 31 日~8 月 3 日.
- [11] M. Abe *et al.*, “Coil Block Designs with Good Homogeneity for MRI Magnets Based on SVD Eigenmode Strengths”, IEEE Trans. Magn., vol. 51, 2015, p. 7002713.
- [12] W. J. Cody, “Chebyshev approximations for the complete elliptic integrals  $K$  and  $E$ ”, Math. Comput., vol. 19, 1965, pp. 105-112.
- [13] Xuewei Ping *et al.*, “A Discussion on Efficient Methods for Computing Magnetic Flux Density of Circular Coils”, IEEE Journal of Multiscale and Multiphysics Computational Technique, vol.4, 2019, pp. 227-233.