

g -2/EDM 精密計測用超電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

TRIAL DESIGN OF A STEERING MAGNET TO BE PLACED IN MUON STORAGE MAGNET FOR G-2/EDM PRECISION MEASUREMENT

阿部充志^{#,A)}, 萩津透^{A)}, 齊藤直人^{A)}, 佐々木憲一^{A)}, 三部勉^{A)}, 中山久義^{A)}, 飯沼裕美^{B)}
Mitsushi Abe^{#,A)}, Toru Ogitsu^{A)}, Naohito Saito^{A)}, Ken-ichi Sasaki^{A)}, Tsutomu Mibe^{A)}, Hisayoshi Nakayama^{A)}
Hiromi Inuma^{B)}
^{A)} KEK, ^{B)} Ibaraki Univ.

Abstract

Experiments of g -2/EDM precise measurements are under preparation in J-PARC and they use a high field (3.0 T) muon beam storage magnet (MBSM) with a fiducial volume of cylindrical fiducial volume with 3cm-radial width, 10cm-vertical (axial) height and 66.6 cm diameter with less than 0.2 ppm peak-to-peak magnetic field homogeneity. Muons will be injected by the spiral injection from the magnet top through iron-yoke, reducing axial speed by the fringe field and will be stopped by a kicker radial field. However, there are some error fields and some corrections of muon injection orbit are necessary. Then, the steering magnets (SMs) are under developments and they will be placed inside and outside of the MBSM. SMs should have active shield coils to avoid additional error fields from magnetic interactions with structural metals. Then, they are ASSMs (Active Shield SM). Furthermore, ASSM should have small joule heat generations to avoid error fields due to temperature change of the iron-yoke. Under these specifications, we have done a trial design ASSMs using newly developed magnetic design method expanded from MRI gradient field coil design method.

1. はじめに

大強度陽子加速器(J-PARC)に配置されている、物質・生命科学実験施設(MLF)の大強度ミュオン(muon)ビームラインでは、十分なビーム強度を保ちつつ、エミッタンスが非常に小さい超冷 muon ビームの実用化研究が進んでいる。これを利用して、高エネルギー加速器研究機構(KEK)を中心に、muon 異常磁気モーメント(g -2)と電気双極子モーメント(EDM)の超精密測定を行う実験(以下では本実験または g -2/EDM 実験)を準備している[1]。この実験にはミュオンを蓄積・周回させる領域に 3.0 T で非常に一様(均一)な磁場を持つ MBSM(Muon Beam Storage Magnet)を使う[2, 3]。

一方、この実験では、MBSM 上部からの螺旋入射を行う。これは、鉄 yoke に開けたビーム入射口を通過した muon を磁石フリッジ磁場で軸方向速さを減速し、キッカー磁場で中央面付近に蓄積・周回させる[2]。

設計磁場では期待する入射・蓄積が行われるが、実際の磁石では、組み立て設置誤差、建屋鉄筋のや周囲の鉄製機器の影響などで、誤差磁場が存在し、muon 軌道のずれが発生する可能性がある。そのため、この誤差磁場と muon 軌道を補正する必要がある。Muon 蓄積領域では均一磁場を確保する磁場シミングを行うが、昨年の本学会で議論した[4]。今回は、入射軌道を調整する Steering Magnet (SM)の設計を議論する。

この SM は周囲との磁氣的相互作用とそれによる追加的な誤差磁場を避けるために、精度良い磁気シールド機能を持つ必要がある。また、熱的な要因による鉄 yoke からの誤差磁場を避ける必要もある。そのため、能動磁

気シールド(AS: Active Shield)機能を持つ ASSM であり、muon 入射に合わせたパルス運転で発熱量を抑える。

本発表では、能動磁気シールド機能を持つ磁石の磁気設計手法を開発し、本実験で使用できる ASSM の試設計に応用する。

2. ASSM の概要

2.1 設置位置

ASSM 配置位置は極めて限られている。Figure 1 の磁石で、鉄 yoke にあけるビーム入射口前後のみである。入射口を挟んで、外側と内側の 2 つ(Outside-ASSM および Inside-ASSM)を配置(Fig.2 参照)する予定である。この 2 つの ASSM を用いて muon 入射トンネルからビーム蓄積

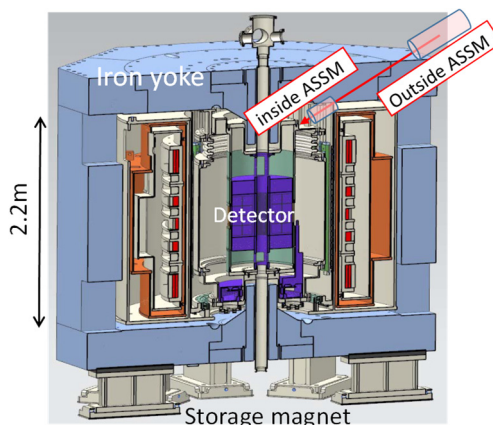


Figure 1: Schematic explanation of muon beam storage magnet and muon injection hole.

[#] abemk@post.kek.jp

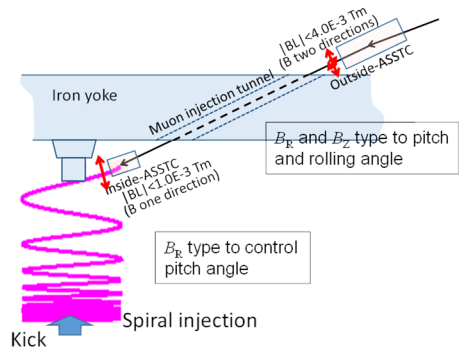


Figure 2: Schematic drawing of the ASSM placements.

領域までの螺旋入射軌道[2]を調整する。特に配置領域の限られる inside-ASSM について、設計手法の開発と試設計を通して、実際に配置出来ることを確認する。

2.2 目標仕様

Table 1 は設計の目標仕様である。目指す磁場(BL 積および磁気遮蔽性能)を、狭い領域に発生し、小さな発熱量で実現することが重要である。ASSM の大きさだけで無く、周囲との熱的・磁氣的相互作用を防ぎ、さらなる誤差磁場を防止するために、周囲への漏れ磁場が小さいことが必要である。十分な磁気遮蔽を得るには 3D でのシールドコイルの設計が必要であり、核融合装置設計と MRI 傾斜磁場コイル設計分野の参考文献[5-9]を応用して開発し、ASSM 設計に適用した。

発熱量低減のためパルス通電であり、muon ビーム入射に同期した 25 Hz 通電である。各パルスの通電時間はダクト上の渦電流による磁場を避けるために、渦電流時定数の 4 倍のフラットトップ時間とし、電流の立ち上げと下げを 0.1 ms とする台形電流波形を想定している。この場合、Joule 発熱 $Q(W)$ は次式である。

$$Q = 25RI^2(4\tau_e + 0.000066) \quad (1)$$

ここで R, I, τ_e はそれぞれ、ASSM の抵抗 (Ω)、フラットト

Table 1: Target Specifications of ASSMs

Parameter	Inside-ASSM	Outside-ASSM
BL product (Tm)	1.0E-3	4.0E-3
Magnetic field direction	Radial	Radial, axial
Control angle	Pitch	Pitch, rolling
Magnetic shield (μT)	< 1.0 at 0.2m	< 1.0 at 0.3m
Joule heat Q (W)	< 1.0	< 10.0
Outer diameter (mm Φ)	42.7	89.1
Beam duct Wall thickness (mm)	1.5	2.1
Beam duct Material	TBD (Temporary SUS)	
Eddy current decay time τ_e	0.0575 ms	0.166 ms
Allowable size	Diameter (mm)	< 100
	Length (mm)	< 200

プ電流値(A), ダクトの渦電流減衰時定数(s)である。この設計では、ビームダクトの材質、渦電流時定数は通電波形を決め、発熱量、電源容量の把握に重要なパラメータである。SUS ダクトでは Table 1 の時定数であるが、セラミック(肉厚が厚くなるため Inside 部では不可)もしくは高抵抗の金属材料(インコネル、Ti 合金など)を利用することで、通電時間を短縮し、発熱量を抑えることができる。

3. ASSM の磁気設計

3.1 磁気設計手法の概要

今回の ASSM の磁気設計は Fig. 3 の考えで実行する磁気設計を 2 次元(2D)[9]で行い、概略を把握した後、3D 設計を実行する。2D, 3D 共にシールドコイルと主コイルがともに矛盾無く電流分布を決めるために、下記 2 項目のために、繰り返し計算を行う。

- ・主コイルからの磁場を考慮したシールドコイルの電流分布計算。
- ・シールドコイルからの磁場を考慮したステアリング用のダイポール磁場(以下ではステアリング磁場)を作る主コイル電流分布計算。

以下では、2D 磁気設計例を Outside-ASSM で、3D 磁気設計の手法と設計例は Inside-ASSM で、議論する。

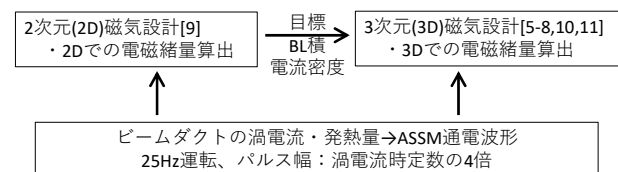


Figure 3: Flow of ASSM magnetic design.

3.2 2D 磁気設計

円筒の電流面を考え、軸方向無限長の電流分布を算出する。実際には有限長なので、計算は単位長さあたりの物理量を計算し、長さを掛け合わせて、ASSM の電磁諸量を算出する。Fig. 4 は Outside-ASSM の 2D 断面内の計算結果であり、曲線は磁力線を示し、矢印は電流を示し(外向きで正電流、電流値は長さに比例)している。磁力線は、シールドコイル (半径 100 mm) 内で閉じ込められ磁気シールドがよく出来ていることが解る。一方、

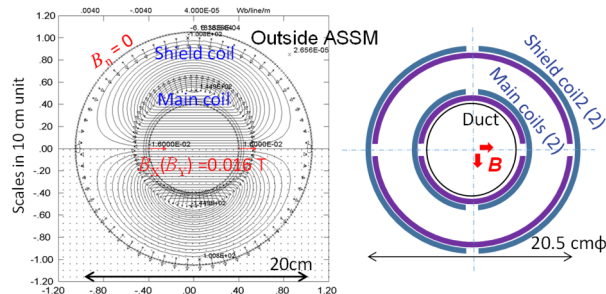


Figure 4: Left shows result of 2D design calculations for outside-ASSM. Lines: Flux contour lines at every 40 $\mu Wb/m$. Arrows: current magnitudes. Right schematic coil assemble plan of two dimensional ASSM.

中心部では磁力線は横方向に走っており、正確にステアリング磁場 ($B_{ST}=B_Y=160$ Gauss) が発生されている。右側に示すように磁場方向の異なる2組のコイル対を重ねることで、外見は1個の磁石であるが、2方向のステアリングを行う計画である。

Table 2には2D計算結果による電磁諸量をまとめた。磁石への通電は25 Hzパルス通電である。SUSダクトとする場合、ダクトと磁石共に発熱量が大きくなるので、セラミックダクトをこのOutside-ASSM部では採用する必要があることが解る。しかし、電源を含め、特に高度な磁氣的仕様を要求する項目はない。この2D磁気設計では、ASSM端部は考慮出来ないため、値に誤差は大きいと考える。しかし、セラミックダクトを採用すれば設置上特に問題となる項目は無いと言える。

Table 2: Electro-magnetic Parameters of Outside-ASSM

Parameter	ASSM-1		ASSM-2	
	Small radius side	Large radius side	Small radius side	Large radius side
P/S current (A)	76.0	76.8		
Numb. of turns	±22/11	±24/13		
Conductor (mm)	Cu 2.0x2.0	Cu 2.0x2.0		
Rough size (mm)	205Φ-350L			
BL products (Tm)	4.0E-3 (effective length 0.25m)			
EM Inductance (mH)	M. energy E (J)	0.500	0.572	
	Inductive voltage (V)	1768	203	
Resistance R (Ω)	Resistance R (Ω)	0.234	0.263	
	Resistive voltage (V)	17.8	20.2	
Joule loss	Joule loss (cont.) Q (W)	1352	1551	
	Heat generation (W)	24.7(3.25)	28.3(3.72)	
Duct Joule loss (W)	{SUS (Ceramic) duct}	25Hz pulse	25Hz pulse	
	Duct Joule loss (W)	41.8 (0: Ceramic duct)		
Power supply	Total voltage (V)	152	172	
	Spec. plan	230V, 100A, >10kHz		

3.3 3D 磁気設計手法

前節の2D磁気設計結果を踏まえ、3D磁気設計を行う。後者では2つの電流面(主コイル、シールドコイル)の電流分布を、目標磁場に適合する磁場を発生するように、算出する[5-8]。ASSM磁気設計での座標系は、このASSM設計の座標系であり、MBSMの座標系とは異なるので注意が必要である。

この手法では、核融合装置で誘導渦電流を求める計算で使われてきた電流ポテンシャル T (単位 A)[10, 11]を電流面上の変数に用いる。次式で電流を表現している。

$$\mathbf{j} = \nabla T \times \mathbf{n} \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{j} は電流面上の電流密度ベクトル(A/m)で、 \mathbf{n} は電流面の法線である。電流密度は T の勾配に比例した大きさで、2点間の T の差異が、その間を流れる電流の大きさである。また、電流面上で T 分布の等高線を描くと、電流は等高線に沿って流れており、等高線に沿って導

体を配置すると、求めるコイルを作ることになる。三角要素で電流面を表現し、節点に T 値を割り当て、目標磁場を再現するように最小二乗法で決める。本設計に応用したDUCAS[6]では、打ち切り特異値分解法(TSVD)を利用して、最小二乗法を解き、その T 分布から、電流分布、そして流線に沿った導体配置を決める。本設計ではシールドコイルと主コイルの2つの面電流を、互いの磁場を考慮した繰り返し計算で、同時に、互いに矛盾無く、算出する。この方法は、MRI装置の傾斜磁場コイル磁気設計手法[7, 8]を応用したASSM磁気設計手法である。

Figure 5は本試設計の計算モデルである。Inside-ASSMの主コイルとシールドコイルの電流面を三角要素の集合で表現し、節点に T 値を割り当てる。主コイル(左:接点数 2501)では内側(1845点)に、シールドコイル(右:接点数 3337)では外側に磁場評価面(面上に磁場評価点(MFEPs: Magnetic Field Evaluation Points): 3905点)を配置している。この B_{ST} の方向はMBSM座標では半径方向で(B_R type in Fig. 1)、ビーム上下方向角(pitch angle)を調整する。

主コイルの目標磁場は次のように考えた。 B_{ST} 分布を目標値として導体配置の算出も行ったが、導体配置に粗密が発生するため、BL積を高めるには不利である。そこで、局所的な磁場強度分布には拘らず、BL積をビームダクト断面内で一様にした。そのため、

$$T = \sum_{i=1}^{i=4} C_i \sin\{(2i-1)\theta\} \quad (3)$$

として T 値を周回方向角度のみの関数とし、端部では、

$$\left| \frac{dT}{dz} \right| = 20.8 \quad (\text{kA/m}) \quad (4)$$

とした。20.8 kA/mは導体(25 A)最密配置時の電流密度である。この結果、導体配置は直線の組み合わせとなり、電流密度が向上し、製作性も改善される。式(3)の C_i は磁石軸に沿った磁場(B_Y : Fig. 4で紙面垂直方向)の積分、

$$BL \text{ 積} = \int_{-0.2}^{+0.2} B_Y dl \quad (5)$$

をダクト断面内で一様とするように、決めた。

一方、シールドコイルの目標磁場については、ASSM

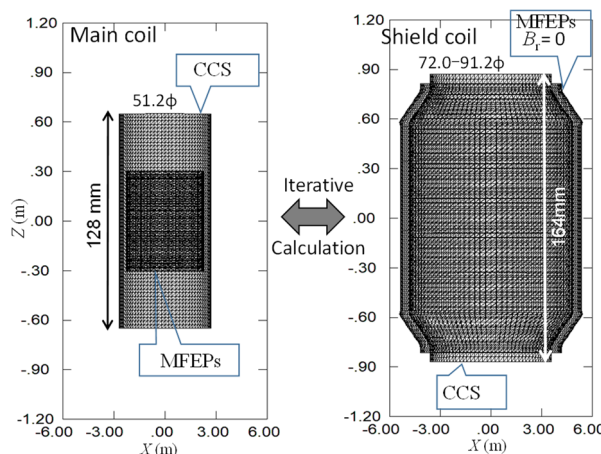


Figure 5: Computational model for inside-ASSM 3D magnetic design. Numbers are diameters of current carrying surfaces (CCS). Shield CCS is squeezed at edge to reduce leak field.

軸に対して放射状に発散(もしくは収束)する磁場成分 B_r に対し全 MFEPs で、

$$B_r = 0 \quad (6)$$

とした。ただし、これだけの条件だと、端部で電流面が閉じてないために、この部分からの漏れ磁場は大きい。そこで、シールドコイルと主コイルで、同じ大きさ(符号は反対)の磁気モーメントとなるように、人為的に両端部のみ導体位置を広げた。

Figure 5 の計算モデルでは電流ポテンシャル T の分布および面電流分布が求まる。その流線に沿って、 T 値の等間隔で、導体の配置を決める。より詳しい計算方法は参考文献[5-8]を参考にさせていただきたい。

3.4 Inside-ASSM 磁気設計結果

前節の計算法に従って決めた Inside-ASSM の導体配置を Fig. 6 に示す。シールドコイルは両端を絞った形状とし、軸方向の漏れ磁場を低減している。Figure 6 は磁場方向(Y 方向)から見たている。角を丸めた直線の組み合わせで主コイル導体が配置され、その磁場を磁石外部で打ち消すようにシールドコイル導体が配置される。この導体配置で求めた電磁諸量が Table 3 である。参考に 2D 設計計算値も記述した。2D では端部の状況が不明である。そのため、磁場については 1.1 倍の軸方向実効長、導体長については 1.5 倍とした。このような短軸コイルの 2D 値は誤差が大きいので、電源や発熱量の概略を把握するには有効と考える。

導体位置(電流路)が求まると、下記の式を用いて、導体長 L_{Cu} 、磁気モーメント M 、磁気エネルギー E などの電磁諸量が算出できる。

$$L_{Cu} = \sum_{all\ turn} \oint ds \quad (7)$$

$$M = I \sum_{all\ turn} \oint \mathbf{X} \times ds \quad (8)$$

$$E = I \sum_{all\ turn} \oint \mathbf{A} \cdot ds \quad (9)$$

$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} I \sum_{all\ turn} \oint ds/r^2 \quad (10)$$

これらの積分は全て導体に沿って行う。加算は全ての巻き線に加算する。 I は導体に流れる電流であり、ここでは 25 A である。 \mathbf{X} は導体位置で $\oint \mathbf{X} \times ds$ は巻き線が囲む面積を表すことになる。 r は導体(ds)位置と磁気ベクトルポテンシャル A 計算点との距離である。

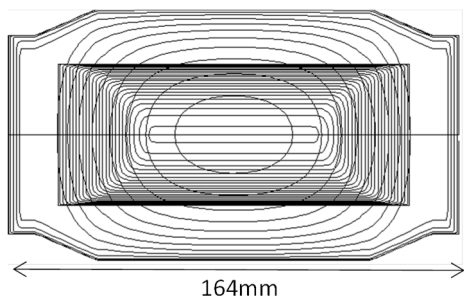


Figure 6: Calculated conductor placements for Inside ASSM. Small coil is the main coil. Large and squeezed at edge coil is shield coil. Outer most four turns of the shield coil are expanded to set off that of the main coil. Transient windings are not shown.

表中で注意することは、コイルとビームダクトを合わせた発熱が 1 W を超えると推定されることである。高抵抗のビームダクトを用いることで、発熱量は低減できるが、Inside-ASSM 位置でのセラミックダクトは、ビーム通過口径が小さくなってしまったため、採用が難しい。そのため、高抵抗の合金(インコネルや Ti 合金)で作られたビームダクトを利用する必要があり、検討を進めている。

Figure 7 は巻き線配置を、展開図(180 度分)で示す。図で横方向は周回方向である。一つの inside-ASSM を構成するには、2 コイル x2 組を組み合わせる。主コイル(左)は直線の導体配置の組み合わせで、角を丸めた。一方、シールドコイル(右)では、 $|Z| < 65$ mm では、 $B_r = 0$ とする導体配置であるが、 $|Z| = 65 \sim 82$ mm の両端部では導体位置を広げ、開口部に起因した漏れ磁場を縮小するためである。このため、inside-ASSM 全体での磁気モーメントは $1.0E-3$ Am² 以下となり、磁石周囲での漏れ磁場は小さくなり、MBSM 磁場(3T)との相互作用による

Table 3: Electro-magnetic Parameters of inside-ASSM

Parameter	2D cal.	3D cal.
P/S current (A)	25.0	25.0
Numb. of turns	±22/12	±25/12
Conductor (mm)	Cu 1.0x2.0	Cu 1.0x2.0
Max. current density (A/mm)	21.1	20.8
Rough size (mm)	100Φ-150L	100Φ-164L
BL products (Tm)	1.0E-3	
EM Magnetic energy (J)	0.0189	0.0322
Inductance on (μH)	60.4	100.3
Inductive voltage (V)	50.3	86.0
Resistance (W)	0.153	0.222
Resistive voltage (V)	3.83	5.55
Joule loss (cont.) (W)	95.8	138.9
Heat generation (W)	0.60	0.87
SUS duct	25Hz	25Hz
Duct Joule loss (W)	1.0 (rough estimation)	
Power supply Total voltage (V)	64.1	91.6
Spec. plan	120V, 30A, >10kHz	

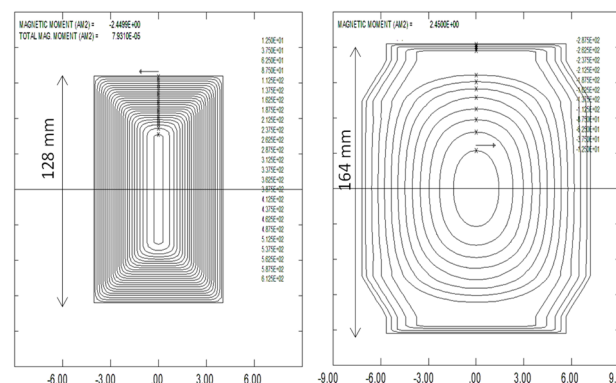


Figure 7: Expansion plans for ASSM, left: main coil, right: shield coil. Bottom scale numbers are in cm unit.

電磁力も小さく、1g 以下にできる。

この導体位置の Inside-ASSM が発生するステアリング磁場 B_{ST} を、Fig. 8 に BL 積分布(左、主コイル導体位置も示す)と 4 点の軸方向磁場分布(右)で示す。左図は、 B_{ST} (左図で上方)を式(5)で、紙面垂直方向に積分した BL 積を、ビームダクト断面内の等高線分布で示した。中心軸上では $0.994E-3$ Tm であり、等高線($1.0E-6$ Tm/線)で示すように、断面内でほぼ一様である。これは式(3)の係数 C_i を調整した結果である。紙面上 Y 方向磁場成分(B_{ST})の分布をダクト断面内 4 力所(左図番号参照)で示す。両端部では、接続線の影響が大きく、磁場の変動が大きいが、左図のように BL 積の一様性は良い。

Figure 9 は周囲の漏れ磁場強度分布で、等高線(磁場強度 10, 1.0, 0.1 μ T) で示す。ASSM 中心から 20 cm 程度離れると 1.0 μ T 以下であり、磁気シールドがよく設計できている。しかし、実機では製作誤差が存在し、計画通りにはシールド出来ない可能性もある。試作を通して製作誤差の影響も把握していく必要があると考えている。

3.4 製作法と試作

本 ASSM は MRI 装置の傾斜磁場コイルと比較すると、電流、サイズ共に 1/10 以下と小さい。そのため、銅板から巻き線を切り出す製作法は採用できない。そこで、絶

縁被覆を持つ導線を、3D 工作で作られた溝に配置する方法を主案と考えている。一方、本設計手法で磁気設計した ASSM が思うような磁場を発生することを確認する基本原理確認の試作も行う予定である。この段階では、導線配置パターン展開図を紙上に印刷し、印刷線に沿って導線(細いもの)を接着は位置し、巻き枠の円筒(アクリル筒)に巻き付け・接着する計画である。

4. まとめ

J-PARC では muon の磁気/電気モーメント(g-2/EDM)を、均一な磁場中で詳細に計測する実験を準備している。その入射軌道を調整する能動磁気シールドステアリング磁石 ASSM の設計手法の開発と試設計を行った。その結果、MBSM 入射部の 2 つの ASSM について BL 積、発熱量、シールド性能を満たす磁石を設計できることが解った。今後試作を通して本設計手法による ASSM の有効性を確認していく。

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] M. Abe *et al.*, "A new approach for measuring the muon anomalous magnetic moment and electric dipole moment", Prog. Theor. Exp. Phys., vol. 2019, 053C02.
- [2] 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, pp51-62.
- [3] 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.
- [4] 阿部、他、"g-2/EDM 精密計測用ミューオン蓄積超電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。
- [5] 阿部、"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、2019、pp. 155-172.
- [6] M. Abe *et al.*, "A new technique to optimize coil winding path for the arbitrarily distributed magnetic field and application to a helical confinement system", Phys. Plasmas. Vol.10, 2003, pp. 1022-1033.
- [7] M. Abe, "A design tool for MRI GCs using DUCAS with weighted nodes and initial current potentials", IEEE Trans. Magn., vol. 49, no. 12, 2013, pp. 5645-5655.
- [8] M. Abe, "A Design Technique of MRI Active Shield Gradient Coil Using Node Current Potentials and Triangular Finite Elements", IEEE Trans. Magn., vol. 50, 2014, p. 5100911.
- [9] T. Obana, T. Ogitsu, "Design of Lightweight Superconducting Magnets for a Rotating Gantry with Active Shielding", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 30, 2020, p.4400305.
- [10] A. Kameari, "Transient eddy current analysis on thin conductors with arbitrary connections and shapes", J. Comput. Physics, vol. 42, 1981, pp. 124-140.
- [11] 亀有、福本、橋爪、"講座 核融合装置における過渡電磁解析 II、3. 核融合装置における電磁解析手法"、プラズマ・核融合学会誌、Vol.72-11, 1996, p.1223.

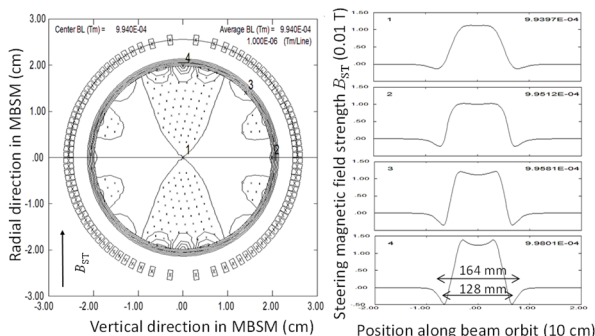


Figure 8: Magnetic field by the designed inside ASSM. Left: BL product distribution in the beam duct ($1.0E-6$ Tm/line). Right: B_y distribution in ASSM axial direction and at the numbered positions (left).

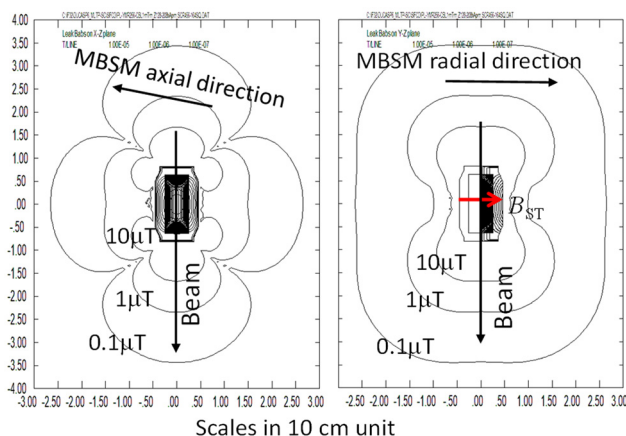


Figure 9: Leak magnetic field around the designed inside-ASSM. Left: on the plane vertical to the steering magnetic field B_{ST} . Right: on the plane parallel to B_{ST} .