

J-PARC-MR アップグレードのための新しい速い取り出し用低磁場セプタム電磁石の性能評価

THE PERFORMANCE OF A NEW FIRST EXTRACTION SEPTUM MAGNET FOR UPGRADE OF J-PARC MR

芝田達伸^{*A)}、川口祐介^{B)}、石井恒次^{A)}、Kuanjun Fan^{A)}、杉本拓也^{A)}、松本浩^{A)}

Tatsunobu Shibata^{*A)}、Yusuke Kawaguchi^{B)}、Koji Ishii^{A)}、Fan Kuanjun^{A)}、Takuya Sugimoto^{A)}、Hiroshi Matsumoto^{A)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization(KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)}Nichicon Corporation

2-3-1 Ykura, Kusatsu, Shiga, 525-0053

Abstract

J-PARC MR is upgrading the proton beam power to 750 kW. We need the low magnetic field septum magnets for fast extraction which have large aperture (more than 80 mm along vertical direction), thin septum plate (less than 10 mm), the magnetic field of 0.3 T, and small leakage magnetic field (less than a few Gauss) for MR upgrading. Then we are developing new septum magnets which of type is eddy current, and its new power supplies. The new septum magnet can have high durability, because it does not have coil of tube structure. The leakage magnetic field can be enough small (~ 1 Gauss) rather than 0.3 T, and can have thin septum shield plate (less than 8 mm). The reproducibility and stability of the flat top of the output pulse current which of width is ~ 10 μ second can be expected as order of 10^{-4} . We measured magnetic field of the new eddy current type septum magnet with its new power supply. We will report about the detail results of the new eddy current type low filed septum magnet and measurement of its magnetic fields.

1. J-PARC

大強度陽子加速器施設 (Japan Proton Accelerator Research Complex;J-PARC) は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究開発機構 (JAEA) が共同で製作運営する世界最大級の強度を誇る大型陽子加速器施設であり中性子や中間子、 μ 粒子、ニュートリノビーム等を用いた研究が行われている^{[1][2]}。J-PARCは400 MeV線形加速器 (LINAC)、3 GeV シンクロトロン (RCS) と50 GeV 主シンクロトロン (Main Ring;MR) の3基の加速器から構成される。MRにはRCSから入射される3GeVの陽子ビームのバンチを最大8個周回する事ができる。30 GeVに加速される8バンチの陽子ビームは約5 μ 秒の間に全てT2K実験用のニュートリノ実験施設に取り出される。5 μ 秒の短い時間に取り出すためこの取り出しを「速い取り出し」と呼び、取り出すために使用する電磁石を速い取り出し用電磁石と呼ぶ。MRが2017年までの目標とするビーム電力は現在の約3倍である0.75 MWである。そのためMRではバンチ内陽子数の増強と繰り返しを上げる事で大電力の達成を目指す様々な課題の克服が必要である。ビーム強度増強に伴う空間電荷効果によるビーム不安定性を緩和する事やビームハロー成分による大放射化を抑制する事、1秒周期に対応した主電磁石と電源の開発、そして後述する速い取り出し用の電磁石への改良が必要である。以下にMRの速い取り出し用電磁石 (以下出射電磁石と呼ぶ) について記述する。

2. MR 用出射電磁石

MR 用出射電磁石の配置図を図1に示す。出射用電磁石はビーム上流から5台のキッカー型電磁石と14台のセプタム型電磁石から構成される。出射用キッカー電磁石 (以下出射キッカー) はNUラインに出射する場合1台辺り0.06 Tの磁場によって合計6.1 mradの偏向を与える。出射用セプタム電磁石 (以下出射セプタム) には8台の片極性低磁場セプタム型電磁石 (詳細は後述) と2台の両極性高磁場セプタム電磁石^[5]、4台の片極性高磁場セプタム電磁石がある¹。両極性高磁場セプタム電磁石はそれぞれ0.89 T、0.99 Tの磁場により11.4 mrad、17 mradの偏向を与え、片極性高磁場セプタム電磁石は両方0.91 Tの磁場により17.6 mradの偏向を与える。出射用セプタム電磁石の出力磁場はそれぞれ異なる値であるが、出力波形は全て同じパターン波形である²。

現行機の出射電磁石は1 Hzには対応していない。そしてMR大強度化のため2012年に出射電磁石の中期計画案として数年以内の全出射電磁石の1 Hz対応化が開始された。出射キッカーは充電時間が1.8秒要するという問題があり、現在充電器増強による1 Hz対応電源開発を行っている。また出射キッカー用パルスモジュレータもパルス吸収用抵抗の増強を行っている。そして試験用新電源と試験用新パルスモジュレータを用いた1 Hz運転試験を2014年夏に予定している。出射用低・高磁場セプタムについては全て1 Hz対応の新電磁石と新電源に交換するため開発中である。以下本研究対象である

¹片極性出射セプタムは全て周回ダクトを挟んで対称に設置されている。つまりNUライン用とアポートライン用それぞれに4台の片極性低磁場セプタム電磁石と2台の片極性高磁場セプタム電磁石がある

²立ち上がり時間1.4秒、FT時間10m秒、立ち下がり時間0.93秒、合計2.34秒

* tatsunobu.tshibata@j-parc.jp

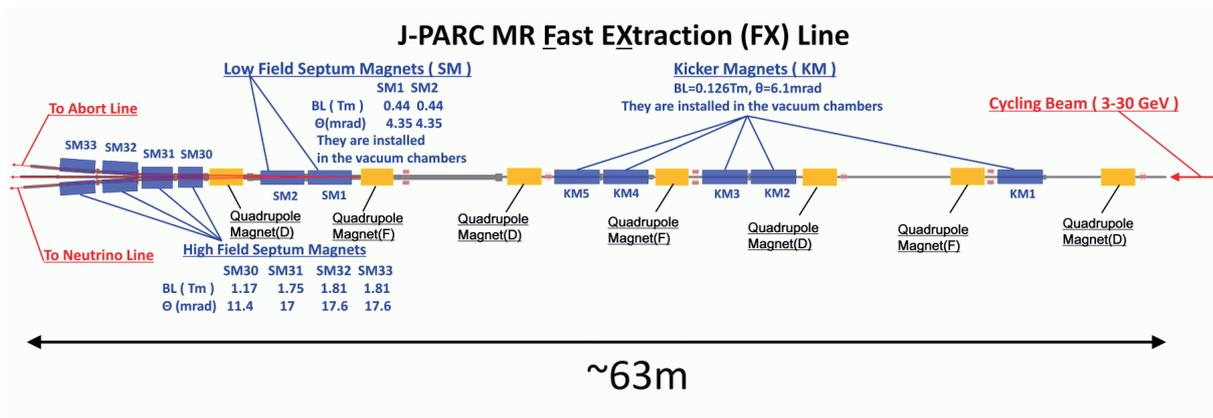


Figure 1: The layout of the Fast Extraction Magnets in 50 GeV Main Ring.

出射用片極性低磁場セプトム型電磁石(速い取り出し用低磁場セプトムとも呼ばれる)について記述する。

3. 速い取り出し用低磁場セプトム電磁石

3.1 現行機と新規機

速い取り出し用低磁場セプトム電磁石は出射キッカーの下流に設置されている最初のセプトム電磁石である(以下更に低磁場セプトムと略す)。8 台の低磁場セプトムは全く同じ構造を持ち、発生磁場は 0.23 T であり、偏向角は全て 2.2 mrad である。現行機(図 2)は電流型セプトムと呼ばれる型の電磁石である³。コの字型磁極の磁

がある。ホロコン表面は導体であるため、コイル同士の絶縁を保つため表面にセラミック溶射を施しているが、パターン波形のため磁極同士の電磁力による振動に対してセプトムコイル部のセラミック溶射の耐久性に不安が残る。また強度増強に伴って大きくなるビームハロー部のビーム損失による放射化を少しでも減らすために磁極間の大開口化が必要になり現在の 71mm(V)×80 mm(H)では充分ではなくなる。また周回ビームラインへの漏れ磁場も磁極内磁場の 10^{-4} 程度にする必要がある。

新しい低磁場セプトムは上記の課題を克服するため渦電流誘導型セプトム電磁石(Eddy カレント型)が選ばれた。Eddy カレント型であるためセプトムコイルはなく渦電流を発生させるためのセプトム板がある。セプトムコイルがないためにセラミック溶射部の耐久性問題が解決する。セプトム板に挟まれた中央に周回ビームライン用の空間があり、両側には対称なセプトム電磁石があり磁場の向きは互いに逆である。コイルにはホロコンを使用せず幅 74 mm、厚さ 9 mm の無酸素銅板を使う。コイルの巻き数は 2 ターンにした。Eddy カレント型である事とセプトム板と周回ビーム領域の間に磁気シールドを追加している事で漏れ磁場を 10^{-4} に下げることが期待できる。また最適化の必要はあるがセプトム板の厚さを 7 mm 程度に薄くできるという利点がある。磁極開口部の大きさは 80 mm(V)×140 mm(H) となり現行機よりも大きい。但し磁極の開口部が大きくなるため発生する磁極出入口の大きな漏れ磁場を減少させるために鉄製と銅製の端部シールドを設置した磁極の材質には珪素鋼板の一種であるハイライトコアを使用した。現行機は合計 4 台のセプトム型電磁石から構成させているが、新規機は 2 台で構成される。ビームの偏向角は現行機の 4 台分と同じ 8.7 mrad(4.35 mrad/台)にする必要があるため、新規機 1 台当たりの積分磁場は 0.44 Tm となる。磁極長は 1.560 m、磁場は 0.35 T である。一方供給電圧、電流は 6 kV×11 kA と大電流になる。新規機も真空槽に納められる予定であり、1 機の真空槽に 1 台の電磁石が入る。そのため新規機も現行機と同様ビームダクトは存在しない。新規低磁場セプトムの電磁石は 2012 年に製作が開始され 1 台が先行機として 2014 年 2 月に完成した。図 3 に 2014 年 8 月時点での写真を示す。全長は 2 m、2 つの磁極が周回ビームラインを挟んで対称に設置されており両方の銅板コイルは直列に接続され

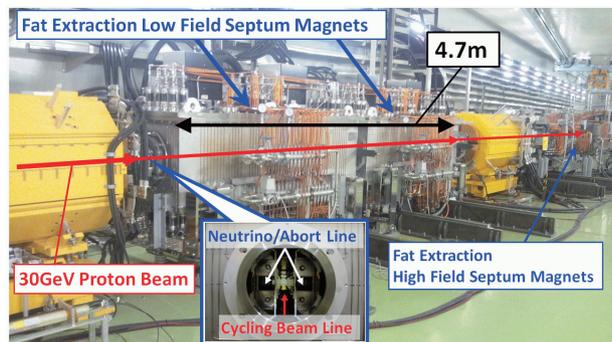


Figure 2: The current low field septum magnets for fast extraction of 30 GeV proton beam. There are two vacuum chambers, which two septum magnets are installed in one vacuum chamber.

極開口部にリターンコイルとセプトムコイルがそれぞれ 4 ターン巻かれている。コイルとしてホローコンダクタ(以下ホロコン)を用いている。印加電圧は 144 V、通電電流は 3,210 A のパターン波形である。セプトム板の厚さは 9.5 mm であり、周回ビームラインへの漏れ磁場は磁極間磁場に対して 10^{-3} である⁴。そして現行機は出射セプトムの中で唯一真空槽に納められている。真空槽に納められている理由はビームダクトを不要にしてセプトム板を薄くする事とアパーチャーを大きくする事である。陽子ビームの大強度化実現のために幾つかの課題

³現行機は 2005 年に製作された

⁴磁場 0.23 T の場合漏れ磁場は 2.3 G

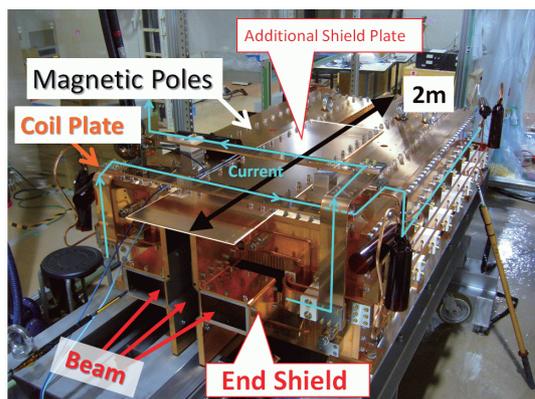


Figure 3: The new Eddy current type low-field septum magnet for Fast Extraction.

ている。ここで製作当初図中の追加シールドは存在しなかった。そして周回ビームライン上を跨いでいる銅板コイル (渡り導体と呼ぶ) の電流が作る磁場が周回ビームライン内に漏れ磁場として大きく影響している事が判明した。そのため銅製天板シールドを追加した。但し追加であるため天板シールドの寸法の最適化はしていない (次節参照)。

Eddy カレント型セプタム電磁石は渦電流により漏れ磁場を消去するため短パルスによる励磁電流が必要である。そこでパターン波形ではなく時間幅の短い半正弦波を使用する。時間幅は ~ 1 m 秒、FT は $\sim 10 \mu$ 秒である。FT の平坦度を上げるため半正弦波を 1 次高調波として逆位相の 3 次高調波を合成し生成し出力される。FT 部分の平坦度調整は 1 次高調波と 3 次高調波の出力タイミング調整によって行う。そして FT の再現性を向上するためパターン充電電圧波形、出力電流波形の波形情報をパルス毎に制御ソフト内に取り込み出力電流の波高値、FT 部分の平坦度を微調整する。これにより期待される磁場の FT 部の再現性並びに平坦度の精度は平均値に対して 10^{-4} である。この仕様は現行の電源では対応ができないため電源も新規に製作した。図 4 に新電源の基本回路図を示す⁵。新規電源は充電器、コ

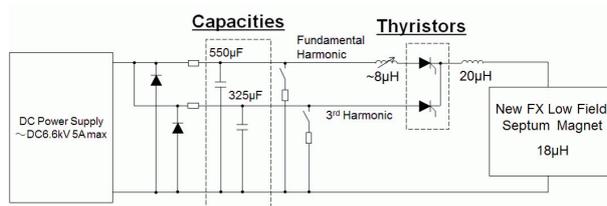


Figure 4: The circuit diagram of the new power supply.

ンデンサバンクとサイリスタを用いたスイッチングバンクから構成されている。充電器は定格出力 $6\text{kV} \times 5\text{A}$ の DC 電源を 2 台使用したパターン充電⁶により 2 回路のコンデンサバンクに充電を行い、各回路のサイリスタを ON することで電磁石にパルス電流を出力する。出

⁵ 図 4 は充電器 1 台と制御部がない 2014 年 8 月時点での図である

⁶ パターン充電とは充電用電源からコンデンサへの充電する時の出力電圧を時間に伴って変化させる方法。充電電圧を常に一定に保つ方法は DC 充電でありパターン充電ではない

力される電流レベルは充電器の充電電圧のレベルにより決定し、最大 6kV (出力電流約 20 kA) に設定が可能である。新規機用電磁石電源の製作は 2012 年に開始され 2013 年 12 月に納入された。新低磁場セプタム電磁石と新規電源は J-PARC-MR の第 3 電源棟に仮設置された。調整された出力波形の実例を図 5 に示す。現在電源の制

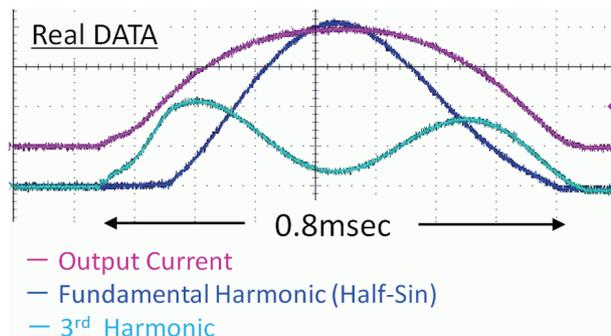


Figure 5: The real waveform of the output current, fundamental harmonic and 3rd harmonic.

御部を改修中であるが新規低磁場セプタムの出力磁場測定を行い新規電磁石の性能評価を行った。電磁石と電源の納入時にまだ真空槽は製作中であったため大気圧中での通電試験になり、そのため電磁石はクリーンルーム内に設置された。2 台の真空槽の製作は 2013 年に開始され 2014 年 5 月に納入された。以下に新規機の動作試験とその結果について記述する。

4. 新低磁場セプタム電磁石の性能評価

4.1 性能評価の内容と手法

性能評価として以下の 3 項目を挙げる。

1. 周回軌道上への漏れ磁場測定
渡り導体の電流磁場の影響と天板銅板シールド効果の確認を行う。漏れ磁場の水平、垂直、ビーム軸方向の磁場分布測定 (マッピング)。
2. 磁極内磁場測定
NU ライン、アボートライン用磁極内磁場測定を行いビーム軸方向の磁場分布 (マッピング) の評価。両磁極の対称性の評価。FT の平坦度の評価。
3. 連続運転での磁場の再現性の評価

一項目目については天井銅板シールド無しと 3 通りの厚さの天井銅板シールドを用いて測定した。漏れ磁場の位置依存性は周回軌道中心と中心から上下左右 30 mm の位置の合計 5 箇所をビーム軸上に沿って磁場測定を行う。二項目目については両磁極中心位置の 1 箇所をビーム軸に沿って磁場測定を行い磁場分布を評価する。また両磁極の構造は完全対称であるため発生磁場の絶対値は同じである事を測定によって確認する。FT の平坦度が 10^{-4} で安定しているかを確認する。三項目目は本来制御回路が完成しフィードバックが可能な条件で評価が可能な項目である。よってこの項目については今回行わない。

磁場測定用センサーにはサーチコイル⁷を用いた。サーチコイルの起電力電圧波形 $V(t)$ の時間積分 (式 (1)) から磁場を計算する事ができる。今回は立ち上がり時の 1 点 ($t_s=0$) から決まった FT 上の 1 点 (t_{FT}) までの時間積分を用いて FT 上の 1 点の磁場 ($\equiv B_{FT}$) を測定した。ここで漏れ磁場 (数 Gauss 以下) と磁極内磁場 (最大 3000 Gauss) の絶対値は大きく異なるため、それぞれに適したサーチコイルを用いた。

$$B_{FT} = \frac{1}{NS} \int_{t_s=0}^{t_{FT}} V(t) dt \quad (1)$$

ここで N はコイル巻数、 S はコイル断面積、 t_{FT} は FT の時間である⁸。サーチコイルは 3 台の電動スライダによって X-Y-Z 方向に移動可能である。電動スライダ操作ソフトは Windows の LabVIEW2009 (Ver.9.0) を用いて構築した。サーチコイルの出力電圧波形はオシロスコープを用いて記録する。ここで今回は漏れ磁場と磁極内磁場測定には別々のオシロスコープを用いた。漏れ磁場測定には LeCroy 製 WaveRunner 6030 (垂直分解能 8bit) を用いた。磁極内磁場測定には LeCroy 製 HRO66Zi (垂直分解能 12bit) で用いた。それぞれの垂直分解能は 8 ビット (0.4%), 12 ビット (0.02%) である。漏れ磁場は絶対値が小さいので 1 Gauss に対して 0.004 Gauss であり測定精度には問題ない。一方 12 ビットの精度は測定したい 10^{-4} と同等の精度であるため、十分な精度での測定は難しい。そのため今回は FT の安定度測定も行わなかった。

性能評価は J-PARC-MR の第三電源棟内で行った。充電電源に必要な入力 3 相 AC400 V は MR アポート用四重極電磁石に用いる電源ラインを用いた。そのため性能評価は MR の通常運転期間中から外れた 4 月、7 月に行った。本試験では充電電源は 1 台のみ使用し最大 3 kV (出力電流約 10 kA) で行った。理由は電磁石が大気圧内にあるためコイル間やコイル-コア間の絶縁距離不足のため高圧による放電を避けるためである。また冷却水設備不足のため電源及び電磁石に冷却水の供給が出来ないため、連続通電による温度上昇による各部の故障を防ぐために現場モードによる単発出力で試験を行った。そのため磁場の各測定値での印加電流のレベルに再現精度が悪くなる。そこで測定磁場に平均電流と測定電流の比をかけて補正した。以下に各項目の試験結果について記述する。

4.2 試験結果と考察

4.2.1 渡り導体の電流磁場の影響と天井銅板シールド効果の確認

測定結果を図 6 に示す。グラフの横軸はビーム軸に沿った位置である。測定位置に対して端部シールド、磁極、渡り導体の位置が対応するように示してある。この結果から天板シールド無しでは渡り導体の位置で最も高い磁場が存在する事がわかる。この事から渡り導体の電流磁場による影響は小さくなく無視できない。一方天井銅板シールドを使用した 3 通りの磁場により磁場の大きさは大幅に軽減する事が出来た。

⁷ピックアップコイルとも言う。コイルに発生する誘導起電力を利用する単純な磁場センサー。

⁸漏れ磁場測定コイルでは $NS=0.089$ 、磁極内磁場測定コイルでは $NS=0.014$

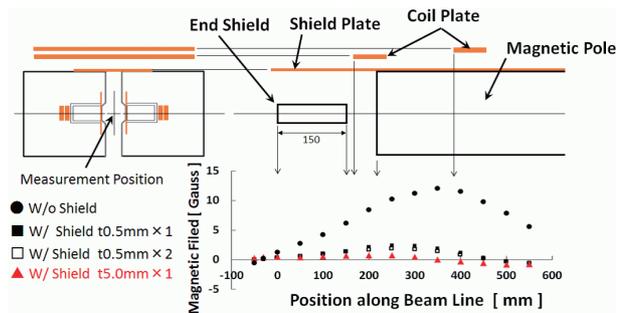


Figure 6: The measured leakage fields at the center of cycling beam position along the beam line without and with some difference shield plates.

また、シールドの厚みを大きくする事でより遮蔽効果が得られ、5 mm 厚天板シールドの結果が最も磁場が小さくなった。今後天板シールドの最適な厚さ、細かい形状等を考える。

4.2.2 漏れ磁場の水平、垂直、ビーム軸方向の磁場分布測定の評価

測定結果を図 7 に示す。ビーム軸方

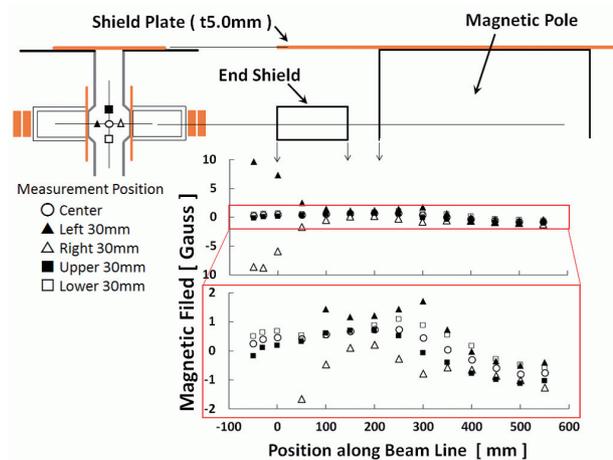


Figure 7: The measured leakage fields at the center of cycling beam position along the beam line which the t5.0mm shield plate is installed.

向に沿った測定結果は 2 つの問題がある事がわかる。一点目は左右の位置を測定した結果が端部シールドの中央付近から電磁石を離れる方向に移動するに従って磁場が大きくなる事である。この事から渡り導体とか異なる別の漏れ磁場も影響を受けている事がわかる。横からの漏れ磁場である事から端部シールドが漏れ磁場を誘発している可能性が考えられるが現時点では決定的な証拠はない。しかし端部シールド周りの 3 次元磁場測定や追加シールド、端部シールドのデザインの見直し等が必要である可能性はある。二点目は測定箇所全てにおいて ± 0.3 Gauss 以上の位置が存在する事である。0.3 Gauss は新規機の生成磁場の 10^{-4} に相当するので、漏れ磁場が理想以上の値存在している事を示す。また磁場は位置依存性を持つ事がわかる。ビームへの影響は本来 BL 積を用いて評価されるので今後構造の詳細測定による追

調査が必要であり、漏れ磁場を更に軽減させる工夫も必要である。

4.2.3 磁極内磁場測定 測定結果を図 8 に示す。左

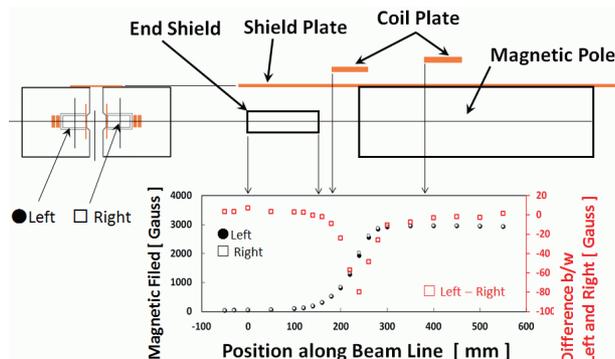


Figure 8: The measured magnetic fields at the center of magnetic poles along the beam line.

右の磁極内中心位置の磁場をビーム軸に沿って測定した結果と、左右の磁場の差を示す。この結果から2つの事が言える。1点目は位置350mm以上の位置では左右両方ともに磁場が平坦になる事である。その値に大きな差はなく平坦部の平均値が2950 Gauss に対して±20 Gauss(0.7%)程度のはらつきがある。このばらつきはオシロスコープの分解能以上の誤差である。系統誤差の原因として考えられる事はサーチコイルやオシロスコープのノイズである。他に補正因子の精度が系統誤差になっている可能性もある。2点目は左右の磁場の差が磁極の境界付近で最大80 Gauss 発生している事である。80 Gauss という大きさから考えると渡り導体の寄与ではなく磁極非対称な箇所が含まれている可能性が考えられる。実際電磁石の部品の製作不良があり、現在左右非対称の構造となっている位置と一致する。今後系統誤差の原因を追求し測定精度を 10^{-5} 程度にする事が必要である。また非対称性の原因を追求し、解決する事が必要である。今後連続通電を行い印加電流の再現性を改善することで原因の切り分けを行う。

5. 今後の予定

現在新規機用電源は出力安定性を向上するフィードバック機構の改修を行っており、まもなく完了する。改修後の電源を用いる事で出力安定性が 10^{-4} になると期待されている。今後は連続運転によってフィードバック機構を含んだ出力安定性の検証を行う。更に長時間運転による装置や出力安定性試験を行う。また今回見つかった問題を解決し、更に高い精度での磁場測定を行う。一方納入された真空槽のベーキングを行った後に新規低磁場セプタム電磁石を2014年秋以降にインストールし、MRにインストールする最終的な状態での通電試験を行い、定格出力試験を行う。MRへのインストールは2015年を予定している。

6. まとめ

J-PARCの30 GeV-主シンクロトロンは陽子ビーム出力電力増強のために1 Hz 繰り返しを目指す。MR 用出

射電磁石も1 Hz 運転対応の電磁石への交換や改善または追加を実行中である。本報告は出射用低磁場セプタム電磁石(低磁場セプタム)の動作試験についてまとめた。2014年3月までに先行機として新規低磁場セプタム電磁石と電源が製作され性能評価を開始した。新規低磁場セプタムは渦電流誘起型(Eddy 電流型)電磁石である。電磁石を導入する真空槽は2014年5月に納入されたため通電は大気圧で行った。磁場測定の結果、渡り導体の電流磁場の効果、端部シールド付近での新しい漏れ磁場が見つかり、左右の磁極内磁場に非対称な磁場が見つかった。また測定精度もまだ改善の必要がある事がわかった。今後は見つかった問題の解決と連続運転による安定性の確認、電磁石の真空槽への導入後の実機試験を行い、最終的に2015年にMRに導入する事を目標に進めて行く。

参考文献

- [1] <http://j-parc.jp/>
- [2] T.Koseki, OHO seminar 2010, <http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtx4.html>
- [3] 小特集 大強度陽子加速器施設 J-PARC 日本物理学会誌 Vol.66, No.1, 2011
- [4] F.Naito 1GeV リニアック検討資料, PLA-93-1.1993/07/28
- [5] R.Shingaki et al., Proc. of Symp. on Acc. Sci. and Tech., 2003