

PF-AR 用新キッカー及びセプタム電磁石の磁場測定

MAGNETIC FIELD MEASUREMENTS OF THE NEW KICKER AND SEPTUM MAGNETS FOR PF-ADVANCED RING

上田 明[#], 浅岡 聖二, 本田 融, 長橋 進也, 中村 典雄, 野上 隆史, 高木 宏之, 内山 隆司
Akira Ueda [#], Seiji Asaoka, Tohru Honda, Shinya Nagahashi, Norio Nakamura, Takashi Nogami, Hiroyuki Takaki,
Takashi Uchiyama
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

From July 2016 we are constructing a new beam transport (BT) line for the Photon Factory Advanced Ring (PF-AR). The new BT line was designed to transport the full energy 6.5-GeV beam directly from the LINAC, and the top up injection will be possible for the PF-AR. We designed and produced new kicker and pulsed septum magnet systems for this project. Two pulsed septum magnets and three kicker magnets are used for the injection of the 6.5-GeV beam. The kicker magnets were designed as a window frame type ferrite core magnet. The septum magnets were constructed with a passive type magnet, a copper eddy current shield and a silicon steel magnetic shield. The magnetic fields of these magnets have been measured by the search coil method. We paid attention to evaluating eddy current losses of the metal coated ceramic duct or the SUS beam duct in the magnetic field measurement.

1. はじめに

2016年7月よりPF-Advanced ring (PF-AR)では、直接入射路[1]、[2]の建設工事が始まっている。

現在の3GeV電子ビーム用入射路に代わるこの直接入射路は、6.5GeVのfull energy電子ビーム用に設計されている。そのため現在PF-ARで行っている3GeVから6.5GeVの加減速が必要無くなり、ライナックからの電子ビームを他の加速器とバンチごとに振り分ける事によりTop-up運転が可能となる。

このPF-AR直接入射路の建設に伴い、新たに6.5GeV,Top-up入射対応のキッカー及びセプタム電磁石システムが設計・製作された。

ここでは、これら新規に製作されたキッカー及びセプタム電磁石システムの概要と磁場測定の結果を報告する。

2. キッカー及びセプタム電磁石の配置

この直接入射路は、現在使用している入射路とは別に建設された新トンネル内に設置される。新トンネルはライナックから北上し直接PF-AR南西部に繋がり、少ない曲げ角で6.5GeV電子ビームの輸送を可能としている。この直接入射路建設に伴い入射点もこれまでの南東部から南西部に移動する。

Fig.1に直接入射路に接続する新入射点とキッカー電磁石及びセプタム電磁石の配置を示す。入射路の先端には、DCセプタム電磁石(S0)[3]と2台のパルスセプタム電磁石(S1,S2)が配置され、電子ビームはそれぞれ3degreeずつ合わせて9degree偏向されPF-AR ring内に導かれる。また3台のキッカー電磁石が入射点の前後に配置され、入射時にパンプ軌道を形成する。キッカー電磁石の偏向角は6.5GeV電子ビームに対して最大1.8mradである。

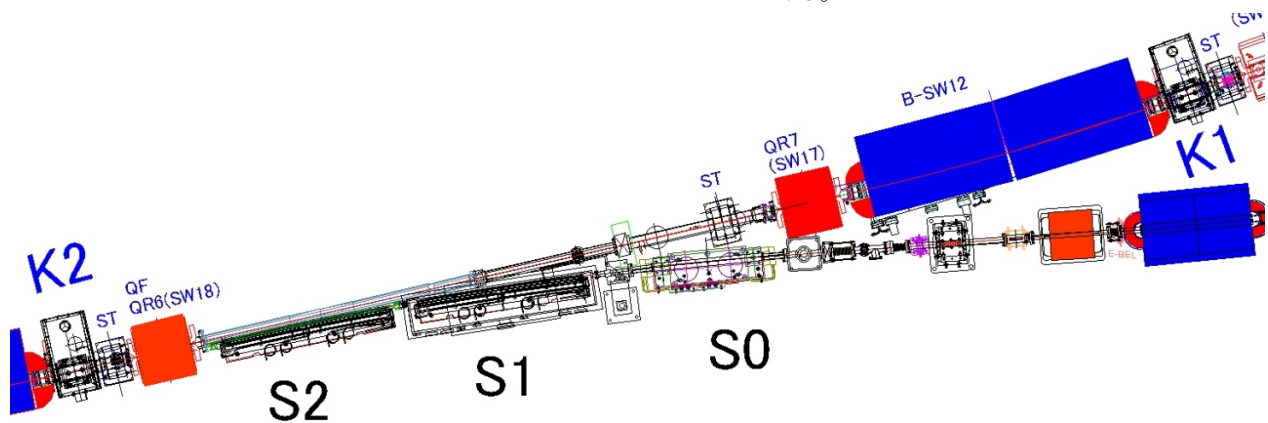


Figure 1: The new injection point at the southwest side of the PF-AR. There are two pulsed septum magnets (S1 and S2) at end of the BT line and three kicker magnets before and behind the new injection point.

[#]akira.ueda@kek.jp

3. キッカー電磁石と電源

新規に製作されたキッカー電磁石は、フェライトをコアとするウィンドーフレーム型キッカー電磁石である。Figure 2 に示されるようにキッカー電磁石本体は、架台を兼ねたマッチングボックス部の上部に設置され、全体をシールド板で覆われている。

蓄積電子ビームはキッカー電磁石の Gap 内に設置されるセラミックスダクト内を通る。セラミックスダクトには、ダクトのインピーダンスを下げるために $3\mu\text{m}$ のTiコーティングが施されている。

パルス電流は、電源部のキャパシタンスに充電された電荷をサイラトロン(e2v 社製 CX1175C)のスイッチングにより開放し発生する。このパルス電流は、地上部に設置され電源部から高電圧ケーブル(25Ω ケーブル $\times 2$ 本(12.5Ω))により地下の加速器室内に伝送されマッチングボックスを経由して電磁石に流れる。キッカー電磁石電源の発生する電流パルスはパルス幅 $2.4\mu\text{sec}$ 、最大電流 3500A 、最大繰返し $12.5\text{pulse per second}$ である。

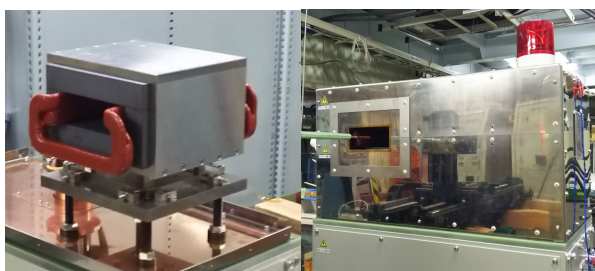


Figure 2: The kicker magnet. The main body (left) is covered with shield box (right). The search coil is insert in the magnet gap for magnetic field measurement and the XYZ stage is reflected in the shield box (right).

キッカー電磁石電源により発生される電流パルスを Figure 2 に示す。PF-AR の周回時間は $1.257\mu\text{sec}$ であるためキッカーの磁場パルスのパルス幅は、 $2.514\mu\text{sec}$ 以内であればよい。しかし、セラミックスダクトのコーティングにより磁場波形が電流波形より伸びる事を考慮して電流波パルスのパルス幅は $2.4\mu\text{sec}$ とした。

キッカー電磁石電源のサイラトロンは e2v 社製 CX1175C を使用しているが、一般にマルチギャップのサイラトロンは回復時間が遅く今回使用したサイラトロンの回復時間は、約 $50\mu\text{sec}$ である。

そのためサイラトロンと直列に Origin electric 社製の高電圧ダイオードを接続し逆電流を防止している。しかし、このダイオードも逆回復時間が $0.5\mu\text{sec}$ あり、Figure 2 に示すよう電流パルスには大きなアンダーシュートが発生しリングングする。

このリングングにより蓄積電子ビームによけいな振動を与える事が懸念される。しかし PF-AR はシングルバンチ運転専用加速器であるため、蓄積ビームは $1.26\mu\text{sec}$ ごとにしかこない事になる。このリングングの節にちょうど蓄積ビームのタイミングが来るように、マッチングボックスのインピーダンスを 12.5Ω から 25Ω に変更して調整した。メインの電流パルスが歪んでいるのは、このミスマッ

チングの影響による。

キッカー電磁石システムの主なパラメータを Table 1 に示す。

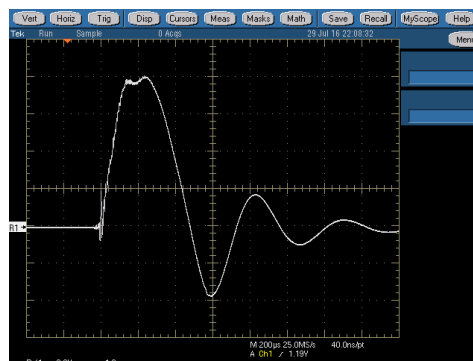


Figure 3: the current pulse shape of the kicker magnet. The large ringing wave is preceded after main pulse.

Table 1: Parameters of the Kicker Magnet Systems

Maximum peak current	3500 [A]
Maximum DC voltage	45 [kV]
Maximum repetition rate	12.5 [p.p.s]
Current pulse width	2.4 [μsec]
Magnetic field pulse width (with ceramic duct)	2.5 [μsec]
Magnet gap height	52 [mm]
Magnet length	250[mm]
Magnet gap width	126 [mm]
Number of coil turns	2[turn]
Inductance of the magnet	4.7 [μH]
Material of the magnet	Ferrite : CMS10 Ceramic Magnetics

4. キッカー電磁石の磁場測定

4.1 磁場測定のセットアップ

キッカー電磁石の磁場は、サーチコイルにより測定された。このサーチコイルは、位置が動かせるようにXYZステージに取りつけられた。(Figure 2 右図参照)

キッカー電磁石により励磁されたパルス磁場は、サーチコイル内に以下の式であらわされる誘導起電力を発生する。

$$V = -\frac{d\Phi}{dt} = -S \frac{dB}{dt}$$

ここで ϕ はコイルを貫く磁束、Sはコイルの面積、Bはコイル上の磁束密度である。

キッカー電磁石の磁場測定で使用したサーチコイルには、幅 5mm 長さ 500mm , 1turn のコイル (long coil) と中

心位置にある 5 mm×5 mm, 1turn (short coil) のコイルが取り付けられている。

以下の式に示すように、このサーチコイルにより、short coil で発生した誘導電圧を積分し面積Sで割る事により磁束密度Bを long coil で発生した誘導電圧を積分するしコイルの幅wで割る事によりBLを同時に測定する事ができる。

$$B = -\frac{1}{S} \int V dt$$

$$BL = -\frac{1}{w} \int V dt$$

測定では、オシロスコープの演算機能を使用し直接磁場パルス波形を観測した。

また、Long coil の幅は、マイクロメータを用い線径を考慮して校正され校正値は 5.279mm である。また、short coil は、面積が正確な基準コイルを用い校正され、校正値は、2.945e-5m²である。

4.2 磁場測定の結果

磁場測定は、セラミックスダクトが無い状態とある状態で測定し比較した。Figure 3(upper)に示すようにセラミックスダクトが無い状態では電流波形(緑)と磁場波形(赤)は正確に一致する。しかしセラミックスダクトをキッカー電磁石内に挿入すると Ti コーティング上に発生する渦電流により Figure 3(lower)のようにパルスのピークが遅れパルス幅が広がる。パルス幅は、セラミックスダクトが無い状態が 2.386 μ sec であるのに対し、セラミックスダクトありでは、2.546 μ sec となる。また磁場のピークは、電流のピークに対して 0.059 μ sec おくれる。

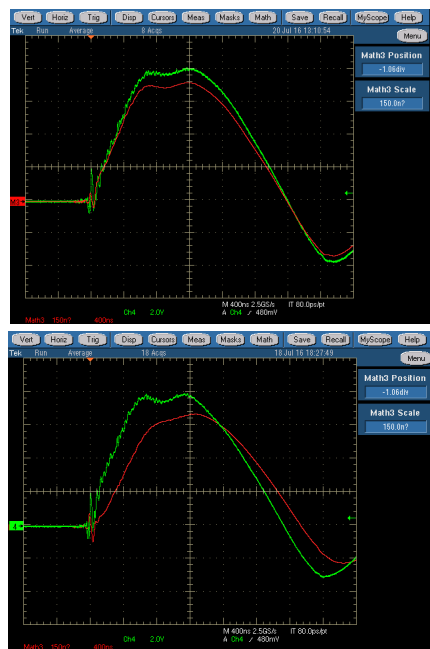


Figure 4: the kicker pulse without ceramics duct (upper) and with ceramic duct (lower). Lower wave form is warped by eddy current effect of the Ti courting.

次に電流に対する磁場の変化、及びビーム進行方向にサーチコイルを動かす事によりビームの進行方向の磁場分布を測定した。Long coil により BL と short coil により中心磁場が同時に測定できるため、effective length が計算できる。さらに short coil で測定した磁場分布を積分する事によりBLが求まる。Effective length は、long coil での測定から 287 [mm]、磁場分布を積分した値から 292[mm]となる。

電流値と蹴り角の関係は、この effective length を考慮して

$$\theta \text{ [mrad]} = 6.21e-4 \times I \text{ [A]} - 4.14e-2$$

となり、セラミックスダクトがある場合と無い場合を比較する事により、Ti コーティングの渦電流による減衰は 3.6% と評価される。(Figure 4 に励磁曲線及びビーム進行方向の磁場分布を示す。)

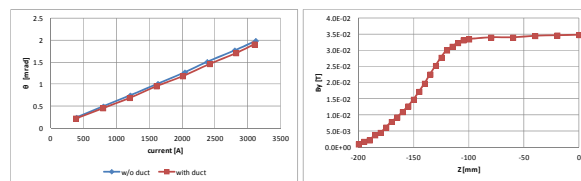


Figure 5: The excitation curve of the kicker magnet (left) and the magnetic field distribution along the beam line.

3 章で示したように、PF-AR は、シングルバンチ専用加速器のためメインパルスの後ろに続くリングは蓄積ビームの周回時間 1.26 μ sec ごとにしか影響しない。

メインのパルス直後のアンダースhootがゼロクロスした位置(C点)を基準としてタイミングを合わせると、Figure 5 に示すA~Eの位置が蓄積ビームのタイミングである。ここで磁場パルス(赤)のピーク(B点)を100%とした場合に各点での蹴り角は、Table 2 のようになり、パルスのピーク以外での蓄積ビームへの振動は最大 3.6%である。

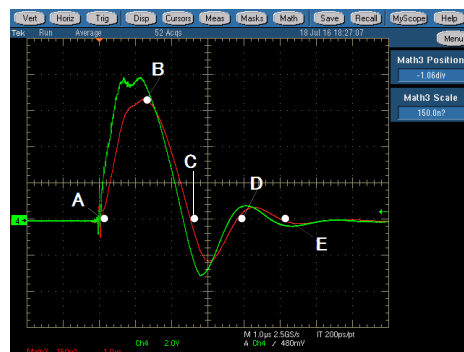


Figure 6: beam timings in the kicker pulse.

Table 2: Kick Angle at Electron Beam Timings

A	B	C	D	E
3.4%	100%	0%	0.8%	2.3%

5. セプタム電磁石と電源

新規に製作されたセプタム電磁石は、2 mm厚の銅製渦電流シールドと 0.35mm 厚の珪素鋼板製磁気シールドのセプタム板を持つパッシブタイプのセプタム電磁石である。

二台のセプタム電磁石のうち上流にある septum I (SI) は、真空槽内に設置されるが、入射点に設置される下流の septum II (SII)は、Gap 内に 0.3mm 厚の SUS 製薄肉真空パイプを挿入し大気中で使用される。

どちらの電磁石も長さ 1.5m、偏向角は 3degree である。

電流パルスは、キッカー電磁石と同じように電源内のキャパシタに充電された電荷をサイリスタのスイッチングにより開放し形成される。電流パルスは、地上部の電源部から高電圧ケーブル (25 Ω × 6 本) により地下加速器室内に伝送されマッチングボックス経由してセプタム電磁石に導かれる。

Figure 7 にセプタム電磁石を示す。右の SII 電磁石は、Gap からの磁場が蓄積リング側に漏れないように 40 mm セプタム板を延長している。また Gap 内に 0.3 mm 厚の SUS の薄肉真空パイプを挟み込んでいる。

セプタム電磁石電源の発生する電流パルスはパルス幅 100 μ sec、最大電流 8000A、最大繰返し 12.5pulse per second である。

セプタム電磁石システムの主なパラメータを Table 3 に示す。



Figure 7: septum I (left) and septum II (right) magnet. Septum II magnet has an extended septum plate and tin vacuum pipe within the gap.

Table 3: Parameters of the Pulsed Septum Magnet Systems

Maximum peak current	8000[A]
Maximum DC voltage	3[kV]
Pulse width	100 [μsec]
Number of coil turns	1[turn]
Magnet gap height	10 [mm]
Magnet length	1.5 [m]
Magnet gap width	23[m m]
Inductance of the magnet	7[μH]
Material of the magnet	silicon steel:35H600 NSSMC

6. セプタム電磁石の磁場測定

6.1 磁場測定のセットアップ

セプタム電磁石もキッカー電磁石と同様にサーチコイルにより磁場を測定した。サーチコイルは、狭いセプタム電磁石 Gap に挿入できるように 2 mm のポピンに 50ts 巻いたものを使用した。コイルの面積は標準コイルと比較する事により校正され校正値は 2.505e-4m² である。

6.2 磁場測定の結果

2 台のセプタム電磁石は、SIを真空槽内、SIIは、0.3 mm SUS 製薄肉真空パイプをGap内に挿入し大気中使用する。磁場測定は、薄肉真空パイプがある状態と無い状態で測定した。

Figure 8 に薄肉真空パイプ無し (SI に対応) と薄肉真空パイプあり (SII に対応) の場合の電流波形 (青) と磁場波形 (赤) を示す。キッカー電磁石と同様に薄肉真空パイプを挟むとその渦電流効果により電流波形よりピークの位置が遅れ、ピークの高さが減衰する。電流波形のピークからの遅れは、9.1 μ sec、また減衰量は、励磁曲線より 3.7% と見積もられる。

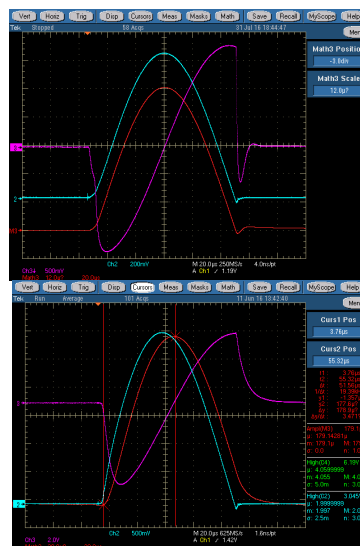


Figure 8: the septum pulse without the thin vacuum pipe (upper) and with the thin vacuum pipe (lower). The blue line is a current pulse, the red line is a magnetic field pulse and the rose line is a signal of the search coil. Lower wave form is warped by eddy current effect of the thin vacuum pipe.

ビーム進行方向にサーチコイルを動かす事により進行方向の磁場分布を測定した。この磁場分布を積分した値より effective length は、1506[mm]となる。

電流値と蹴り角の関係は、この effective length を考慮して薄肉ダクトが無い場合 (SI) は、

$$\theta [\text{degree}] = 4.92e-4 \times I[\text{A}] - 2.65e-2$$

となり、薄肉真空ダクトを挿入した場合 (SII) では

$$\theta [\text{degree}] = 4.74e-4 \times I[\text{A}] - 1.79e-2$$

となる。(Figure 9 に励磁曲線及びビーム進行方向の磁場分布を示す。)

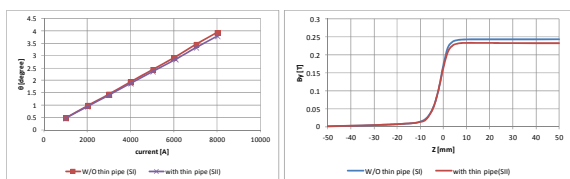


Figure 9: The excitation curve of the septum magnet (left) and the magnetic field distribution along the beam line.

セプタム板を 40 mm 延長した場合と延長しない場合の蓄積ビームへの影響を見るために蓄積リング側、セプタム電磁石 Gap 後方にあたる位置の漏れ磁場を測定した。

ビーム進行方向をZとして、0 点をセプタムコアのエッジとした。Z方向はセプタム板側面の-20 mmからビーム進行方向に 100 mmの位置まで、X方向は、セプタムGap 中心を 0 としてセプタム板側面の位置としてX=15mm、キッカーバンパ軌道の高さとしてX=20 mm、蓄積ビームの位置として X=45mmを測定した。

Figure 10 に示すように、セプタム板を延長する事により、Gapからの漏れ磁場は効果的に低減し最大でも 25gauss 程度である。

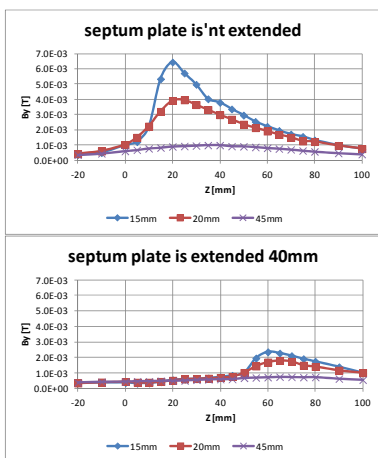


Figure 10: the leakage field from the magnet gap. The leakage field behind the septum magnet is reduced by the extended septum plate.

パッシブタイプのセプタム電磁石は、渦電流シールドを持ち、セプタム板の側面に磁場が漏れないように構造をもつ電磁石である。しかし、セプタムシールド板内部を通過した渦電流が側面に達する事により Figure 11 に示すように電流波形の比べて遅い成分の漏れ磁場が発生する。

Figure 12 に 2 mm厚の銅製渦電流シールドのみの場合とその外側に 0.35mm厚の珪素鋼板を置いた場合の漏れ磁場をセプタム板の位置から外側には離れた位置で測定した結果を示す。セプタム板が銅製の渦電流シールドのみの場合には、セプタム板近くで 250gauss 程度の漏れ磁場が発生する。しかし、渦電流シールドの外側に 0.35 mmの珪素鋼板製磁気シールドを配置すると、漏れ磁場は、3gauss 程度まで落ちる事がわかる。

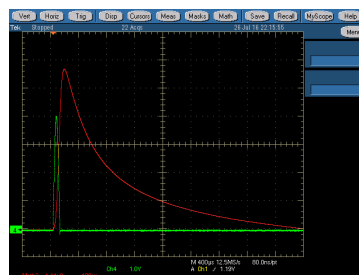


Figure 11: the leakage field (red) beside the septum plate. The leakage field is occurred by eddy current of the septum plate after septum current pulse (green).

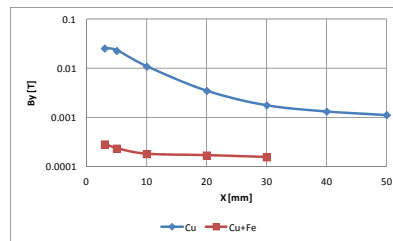


Figure 12: the leakage field beside the septum plate. The leakage field is reduced effectively by 2mm copper and 0.35mm silicon steel septum plate.

7. まとめ

PF-ARの直接入射路改造に伴い 6.5GeV, Top-up 入射対応のキッカー電磁石及びセプタム電磁石システムが設計・製造された。

各電磁石は、サーチコイルを用いて磁場測定を行われた。励磁曲線や電磁石中心での磁場分布を測定すると共に、キッカー電磁石はセラミックスダクトの Ti コーティングによる磁場減衰、そして、メインのパルス波の後の振動の影響を含めて評価し、セプタム電磁石は、SU S薄肉真空ダクトによる磁場の減衰及びセプタム板側面、電磁石 Gap からの漏れ磁場を測定した。

磁場測定の結果、どちらの電磁石も問題なく仕様を満足する事がわかった。

これらキッカー電磁石及びセプタム電磁石は、電源と共に 2016 年 10 月までに PF-AR に設置される予定である。

参考文献

- [1] H. Takaki *et al.*, “PF-AR 新ビーム輸送路建設計画”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014, pp. 990-994.
- [2] S. Nagahashi *et al.*, “PF-AR 直接入射路の建設”, MOP075, in these proceedings.
- [3] S. Nagahashi *et al.*, “PF-AR 直接入射路のための電磁石と電源の更新”, TUP115, in these proceedings.