

MAGNETIC FIELD MEASUREMENT OF A PULSED SEXTUPOLE MAGNET FOR A BEAM INJECTION OF THE PF RING

Hiroyuki Takaki^{1,A)}, Norio Nakamura^{A)},
Yukinori Kobayashi^{B)}, Kentaro Harada^{B)}, Shinya Nagahashi^{B)}, Tsukasa Miyajima^{B)}, Tohru Honda^{B)}

^{A)} ISSP, Univ. of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8581, Japan

^{B)} KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Abstract

We have measured a magnetic field of a pulsed sextupole magnet (PSM) to demonstrate a new scheme of a beam injection at the Photon Factory storage ring (PF-ring) in KEK. The designed PSM has a length of 0.3m, a sextupole strength $K_2 = B''L/B\rho$ of 13m^{-2} and a pulse full width of $1.2\mu\text{sec}$ in a half-sine waveform. The result of the field measurement satisfied the requirement for the PSM.

PFリング入射用パルス6極電磁石の磁場測定

1. はじめに

パルス6極電磁石 (PSM) を用いた新しい入射システムをPFリングに導入して試験する為に、現在その開発を進めている。この新しい入射システムを使うと、通常用いられている数台のキッカー電磁石による入射用のローカルバンブを作る必要がなく、1台のPSMで入射が可能となる[1-2]。PMSによって、入射ビームは磁場中心からの距離の2乗に比例する力でキックを受けキャプチャーされるのに対して、蓄積ビームはほぼゼロ磁場の磁極中心を通過するので、与えられるキックは弱く、蓄積ビームの入射時の振動は抑制されると考えられる。通常用いられているローカルバンブによる入射方式の場合は、バンブ内に6極電磁石などの非線形磁場を発生させるものが存在すると、キッカー電磁石のパルス励磁内のすべてのタイミングでバンブを閉じさせることが困難であり、結果として多バンブビーム運転では、入射時に蓄積ビームがコヒーレント双極振動することを避けることはなかなか難しい[3]。したがって、連続入射でユーザ運転を行なうトップアップ運転では、蓄積ビームを振動させないようにするという観点から、PSMを用いた入射システムは非常に有効になると期待できる。

今回製作したPSMの基本パラメータを表1に示す。磁極長は設置スペースを考慮して300mmとした。強い磁場を出す為に磁極のボア半径は33mmと小さくしているが、入射ビームシミュレーションによる結果から、このPSMシステムがPFリングの物理的なオーバーチャを制限しないようなサイズとしている。磁極は、厚さ0.15mmの硅素鋼板を高精度の金型で打ち抜き、その板を200枚積層して製作した。コイルは1ターンで、直径15mmの銅を用いた。電磁石の冷却方式は自然空冷である。磁極の形状は、図1に示すように円形のセラミックチェンバーに沿う形状になっている。これは、磁極に6極磁場の等ポテンシャル面を持たせて正確な6極磁場を作ることより

表1: パルス6極電磁石の基本パラメータ

Core length	[mm]	300
Bore radius	[mm]	33
Number of coil turns		1
Magnetic field at x=15mm	[Gauss]	400
Peak current	[A]	3000
Inductance	[μH]	4.3
Pulse width	[μsec]	1.2 (2.4*)

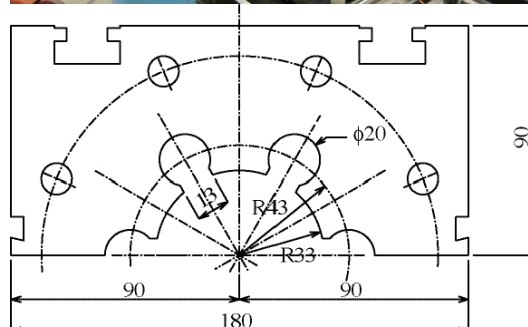
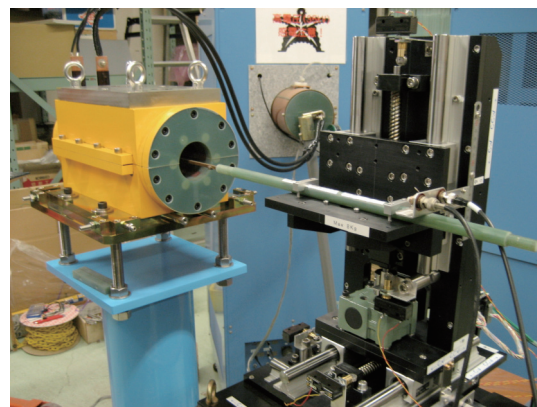


図1: パルス6極電磁石の外観 (上図黄色) と断面図 (下)。上図PSMの手前には磁場測定用のサーチコイルと自動計測用のXYZステージ。

¹ E-mail: takaki@issp.u-tokyo.ac.jp

も、入射ビームが入射直後に通過する位置での磁場の垂直成分を少しでも強くするようにした結果である。PFリング入射時に必要とされるPSMの磁場は、シミュレーションの予測から、1ターン目に入射ビームがPSMを通過する位置（ビーム中心から水平方向に15mmの場所）で400Gであり、これは6極磁場の強さを $K_2=B^*L/B\rho$ と定義すると $13m^2$ に相当する。なお、PFリングの周回時間は $0.624\mu\text{sec}$ であるが、予算の関係上、入射試験用のパルス電源には、パルス幅が $2.4\mu\text{sec}$ の既設電源の使用を予定している。入射シミュレーションの結果、チューンを選ぶことで $2.4\mu\text{sec}$ のパルス幅でも問題無く入射出来ることが分かっている[2]。

本報告では、製作したPSMの磁場測定の結果について報告する。

2. 磁場測定のセットアップ

PSMの測定のセットアップを図2に示す。使用したパルス電源は、既設のパルス電源であり、共振充電方式で、波形は $2.4\mu\text{sec}$ のハーフサイン、充電電圧は最大40kVである。PSMのインダクタンスは、電磁石とケーブルを合わせて $4.3\mu\text{H}$ と見積もられ、 16.7kV の充電電圧に対してピーク電流は3000A出力された。パルス電源の駆動には、TTLレベルの充電トリガーと、 10msec 遅延させたTTLレベルの放電トリガーを用いる。充電は 3msec 程度で設定電圧に到達するが、余裕をみて 10msec 確保している。放電の繰り返し周波数は、最大 25Hz まで可能であるが、今回の磁場測定では、繰り返し 1Hz の周波数で行った。発生したパルス電流は、電圧/電流比0.1のCT（ピアソン110A）でモニタし、PSMで発生した磁場は1ターンのサーチコイルを使って測定した。パルス磁場によってサーチコイルには以下の式で表される誘導起電力が発生する。

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NS \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

ここで、 Φ はコイルを貫く磁束、 S はコイルの面積、 N はコイルのターン数、 B は磁束密度、 V は発生する誘導起電力である。サーチコイルには $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ のショートコイルと $5\text{mm} \times 600\text{mm}$ のロングコイルの2種類を用いた。ショートコイルでは、磁石のZ方向（進行方向）の各点の磁場を、ロングコイルで積分磁

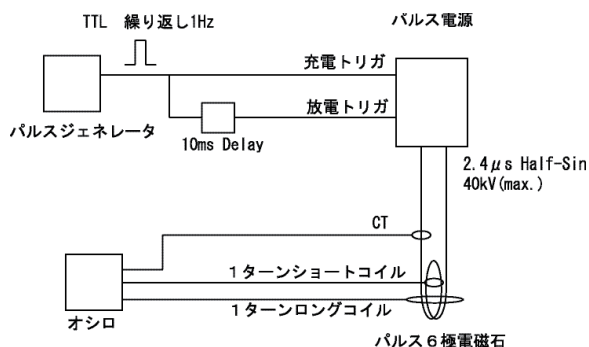


図2：磁場測定のセットアップ。

場を測定した。それぞれのコイルは、長さ80cm幅5mmに整形したG10の棒に固定し、さらにその棒をパルスモータでリモート制御可能なXYZステージ（X方向とZ方向には $1\mu\text{m/pulse}$ 、Y方向には $0.2\mu\text{m/pulse}$ ）に固定して、自動計測ができるようにした（図1写真）。測定座標に関しては、ビーム進行（Z軸）方向のゼロ点をPSM磁石の中心にとり、磁極端部からの距離を測定して決めた。X-Y方向のゼロ点はショートコイルの出力が最小となる点とした。

測定シグナルに入る高調波ノイズをできるだけ落とす為に、サーチコイル及びCTのモニタのケーブルには、 2MHz のローパスフィルターを入れ、更にケーブルの一部をフェライトコアに巻いた。全て信号は 50Ω ターミネーションで測定した。測定に用いたオシロスコープのサンプリングレートは、 100MS/sec に設定した。

観測した典型的な信号波形を図3に示す。図には $2.4\mu\text{sec}$ のCT電流波形とショートコイルおよびロングコイルからの誘導起電力が示されている。図4には、それらの誘導起電力を積分し、さらにコイル面

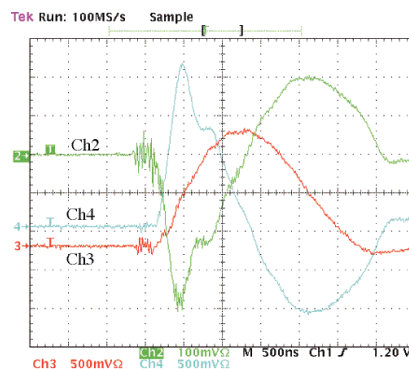


図3：サーチコイルで観測した磁場とCTでモニタした電流の典型的な波形。この時のピーク電流は3000A、中心から水平方向に15mm離れた場所でのシグナル。Ch2（緑）がショートコイル（-20dB）、Ch3（赤）が電流（-40dB）、Ch4（青）がロングコイル（-40dB）である。括弧内は信号に加えた減衰器の値。

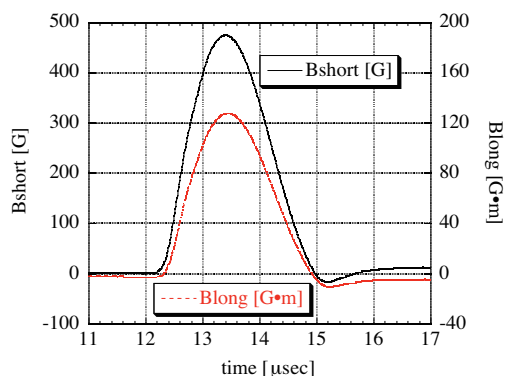


図4：サーチコイルに発生した誘導起電力の積分波形。実線（黒）がショートコイルで破線（赤）がロングコイル。

積で規格化した磁場波形が示されている。図では、ショートコイルの波形はGauss表示、ロングコイルの波形はGauss・m で表示してある。この積分波形のピークの値を10回平均してPSMのピーク磁場とした。

3. 測定結果

ピーク電流3000AでPSMを励磁した時のロングコイルの測定結果と2次元磁場計算コードPOISSON[4]を使用して計算した結果の比較を図5に示す。図中のPOISSON結果には、磁石長の300mmを乗じてGauss・mとしてある。PSM入射に必要な磁

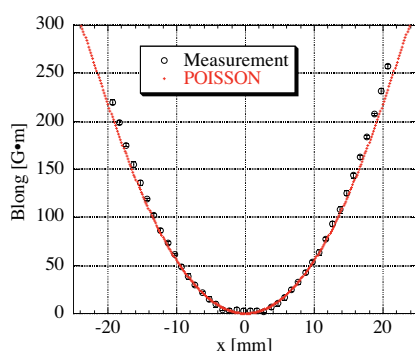


図5：ロングコイルの測定結果とPOISSONの計算結果の比較。

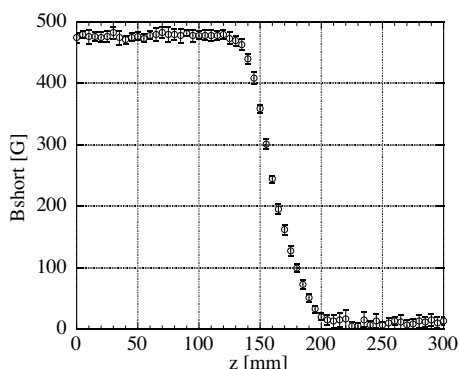


図6：ビーム軸方向の磁場分布。ゼロ点はパルス6極電磁石の中央。

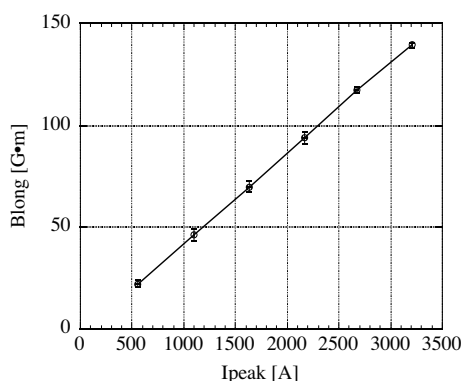


図7：パルス6極電磁石の励磁曲線。x=15mmでの位置で測定。

場強度は、中心から水平位置15mmの場所で400Gであり、測定されたPSMの磁場強度は必要とされる値をクリアしている。また、磁場分布は放物線になり、蓄積ビームが通る中心付近での磁場がほとんどゼロになっているのが分かる。これはPOISSONの結果と一致する。測定値がPOISSONの計算値より若干高め

に値が出るのは実効長が300mmより長い為であると考えられる。図6はショートコイルで測定された進行方向の磁場分布を示している。図は、ピーク電流3000A、磁場中心から水平に15mmの位置で測定したものである。測定装置の関係で一度に全長を測定できていないが、磁石の中心からの進行方向に300mmの範囲で測定されている。中心の位置決め精度は0.5mm以下である。この結果から、PSMの実効長は320mmあることが分かった。ロングコイルとショートコイルの関係からも実効長を求めることができるが、その結果については現在解析中である。

ピーク電流値を500Aから3200Aまで変化させた時のPSMの励磁曲線を図7に示す。図は、コイルを磁場中心から水平に15mm場所にセットした時の、ロングコイルで測定した結果を示している。入射に必要なとされる3000A付近までは磁場はリニアに上昇しており、磁場が飽和していないことが分かる。

4. まとめ

PFリングで新しい方式のビーム入射試験を行う為に、パルス6極電磁石を製作しその磁場測定を行った。入射に必要な6極成分の強さは K_2 で 13m^2 であり、磁石長300mm、2.5GeVのビームエネルギーとすると、水平方向15mmの位置で約400Gとなる。今回使用した、 $2.4\mu\text{s}$ のハーフサインのパルス電源では、この磁場は十分に確保できており、設計磁場性能を満たしていることが分かった。また、測定した水平磁場分布も2次元磁場測定コードPOISSONの結果と良く合っており、水平方向の磁場分布も放物線を得る事ができた。ビーム進行方向の磁場分布についても十分な実効長を確保できている。励磁曲線も必要とされる磁場強度までは磁場が飽和する事無く励磁できていることが分かった。

パルス6極電磁石のPFリングへのインストールは2007年冬を予定しており、2008年の運転から実際のビームを使ってPFリングへの入射実験をする予定である。

参考文献

- [1] Y. Kobayashi and K. Harada, Proc. of the EPAC 2006, Edinburgh, p.3526.
- [2] H. Takaki *et al.*, Proc. of the 2007 PAC, Albuquerque, USA, MOPAN034.
- [3] H. Tanaka *et al.*, Nucl. Inst. Meth. A 539, 547 (2005).
- [4] POISSON/SUPERFISH, Los Alamos National Laboratory Report No. LA-UR-96-1834 (revision 14 March 2000).