

BUMP SYSTEM FOR THE SWITCHING POLARIZING UNDULATORS AT THE BL-16 OF THE PF-RING

Kentaro Harada¹, Yukinori Kobayashi, Shinya Nagahashi, Takashi Obina
Light Source Division, Photon Factory, Institute of Materials Structure Science,
High Energy Accelerator Research Organization, KEK
1-1, Oho, Ibaraki, Tsukuba, 305-0801, Japan

Abstract (英語)

At the BL-16 (beam line No.16) of the PF ring, the user experiments with the fast photon polarization switching are intended. In order to realize it, two APPLE II type undulators and 10Hz bump kicker system for the electron orbit switching will be installed. The system consists of the five identical kicker magnets and power supplies. The length of the kicker magnet is 15cm and the core is the lamination structure of the 0.5mm thickness silicon steel. The capacity of the power supply is 5kW ($\pm 50V$, $\pm 100A$). We adopt the stainless steel vacuum duct of the 2mm thickness. The eddy current effect is so small that the attenuation and retardation of the magnetic field is negligible for 10Hz operation. The system is designed in 2006, will be manufactured in 2007. The bump system with one insertion device will be installed in March, 2008. In this paper, the configuration and the parameters of the bump system are shown.

高速スイッチング可変偏光アンジュレータ用電磁石システム

1. はじめに

放射光の偏光を高速に切り替えながら測定を行うという、高速偏光スイッチング実験がPFリングBL16 (Beam Line16番)において要望されている^[1]。ロックインアンプを用いた高精度の実験^[2]のためには、最低でも10Hz程度のスイッチング周波数が必要であるが、可変偏光アンジュレータの位相を機械的に変化させてそれを行うのは困難であり、また、電磁石を用いて変化させる方法もあるが、アンジュレータの周期長などに限界がある。そこで我々は、2台の挿入光源と軌道スイッチング電磁石を用いた案を採用することとした。

電子軌道による偏光スイッチングの概略を図1に示す。PFリング南長直線部にAPPLE II型の可変偏光アンジュレータを2台並べ、片方を右円偏光モード、もう一方

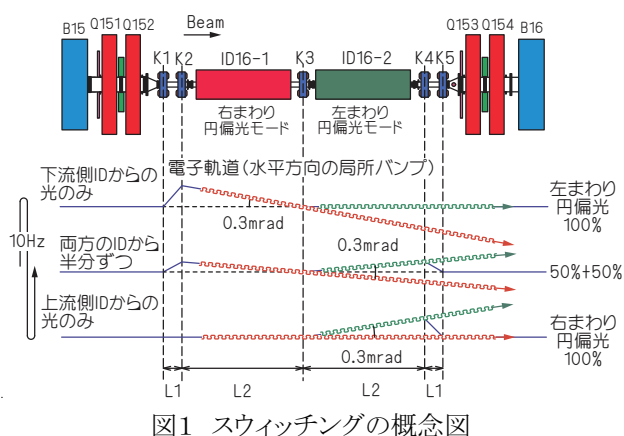


図1 スwitchingの概念図

を左円偏光モードとする。一方の挿入光源内で電子軌道に0.3mradの角度バンプを作ると、その挿入光源からの光をビームラインから遮ることができるので、2台の挿入光源の中で10Hzで互い違いに0.3mradの角度バンプを立てれば、ユーザー側から見ると10Hzで右偏光と左偏光が切り替わったように見え、偏光スイッチングが可能となる。ここでは、それを実現するための電磁石及び電源について述べる。

2. 電磁石及び電源のパラメータ

挿入光源内で電子軌道に10Hz、0.3mradの角度バンプを作るための電磁石及び電源のパラメータについて述べる。図1に示したキッカー間の距離を $L_1=0.5m$ 、 $L_2=3.5m$ とすると、光軸を分離するために必要なバンプ角度を $\theta=0.3mrad$ として、各キッカーの薄レンズ近似での蹴り角は以下ようになる。

$$\theta_{K1,K5} \approx (\theta L_2 / 2L_1)(1 \pm \cos \omega t)$$

$$\theta_{K2,K4} \approx -(1 + L_2 / L_1)(\theta / 2)(1 \pm \cos \omega t)$$

$$\theta_{K3} = \theta$$

ここで、K5、K4に対しては±のマイナス符号をとり、 $\omega=20\pi$ [rad/sec]はスイッチングの角周波数である。必要な最大蹴り角は

$$\theta_{K1max} = \theta_{K5max} = 2.1mrad$$

$$\theta_{K2max} = \theta_{K4max} = 2.4mrad$$

$$\theta_{K3} = 0.3mrad$$

である。

¹ kentaro.harada@kek.jp

偏向電磁石の磁場は真空の透磁率 μ_0 [NA⁻²]、電流I[A]、コイル巻き数N[ターン]、磁極ギャップをh[m]とすると、 $B[T] = \mu_0 NI/h$ と書ける。磁極の面積をS[m²]とすると、インダクタンスは $L[H] = BS/I$ 、必要な電源電圧は $V[V] = RI + L di/dt$ と書ける。ただしR[Ω]は電磁石とケーブルを合わせた抵抗である。

具体的なパラメータであるが、まずは磁極ギャップを決める為のビームアパーチャとダクトの厚みについて述べる。既存の16番直線部の真空ダクトのビームに対する垂直方向アパーチャは15mmであり、それを維持することとした。真空ダクトの材質と厚さについては、スイッチング周波数10Hz程度を考えているため、2mm厚のSUS材質の真空ダクトを採用することとした。過去に行ったステアリング電磁石の応答測定からは、3mm厚のSUSダクトでは10.2Hzの正弦波励磁で磁場の減衰はなし、位相の遅れは0.21°であった。なお、周波数25Hzの時に位相の遅れが1°に達し、その時の磁場は1.37dB減衰であった。さて、ダクトの厚さを2mm、クリアランスを片側1mmずつ取ることとし、電磁石ギャップはh=21mmとした。電磁石のコア長を15cm、コイルは上下16ターンずつで合計32ターンとした。電磁石のパラメータ及び励磁に必要な電流と電圧を表1に示す。電流波形が完全な正弦波の場合、表に示した通りスイッチング周波数10Hzで必要な電源電圧は13.7Vと予想される。電源容量は将来的に周波数を上げる為の余裕も考慮し、5kW (±50V、±100A)とした。

入射ビームに対する影響であるが、バンプによる軌道の振幅は最大で約±1mmであり、入射ビームの振幅約±2cmに比べ非常に小さい。入射ビームに対してバンプはほとんど影響を与えないものと思われる。

表1 電磁石のパラメータ

ビームエネルギー	E [GeV]	3
最大蹴り角	θ [mrad]	2.4
最大磁場	B [T]	0.16
磁極垂直ギャップ	h [mm]	21
磁極水平幅	w [mm]	110
鉄芯長	l [mm]	150
コイル巻き数	N [turns]	32
インダクタンス	L [H]	1.0x10 ⁻³
必要最大電流	I [A]	83.5
抵抗	R [Ω]	0.1
周波数	f [Hz]	10
必要最大電圧	V [V]	13.7
硅素鋼板厚	t [mm]	0.5

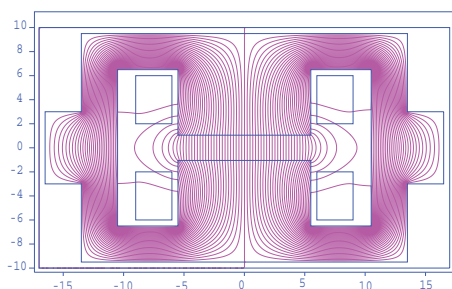


図2 電磁石の断面形状と磁力線

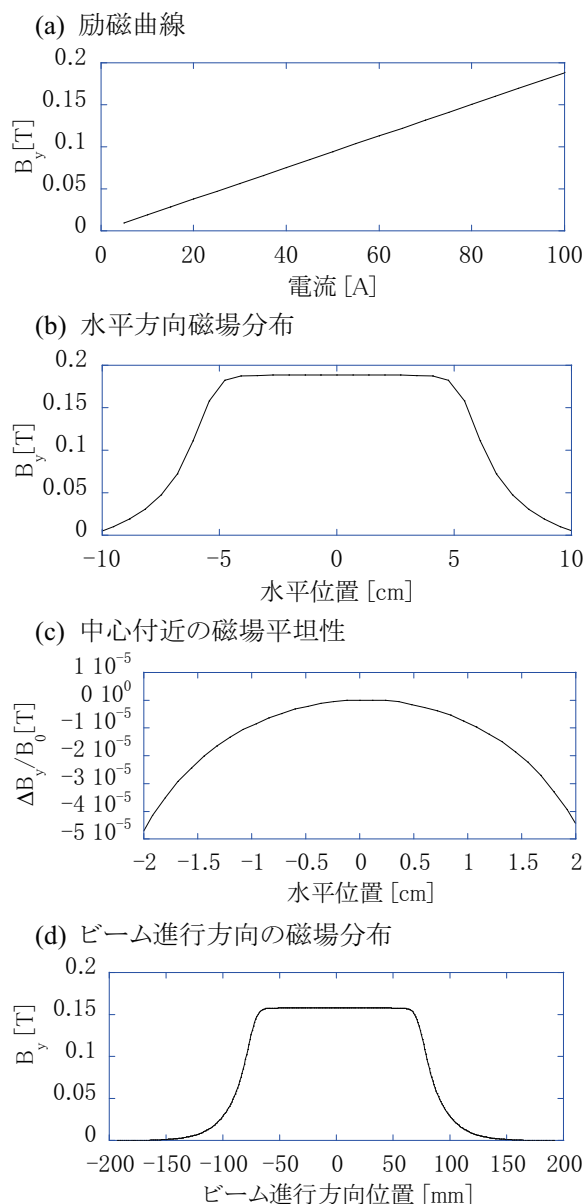


図3 磁場計算結果

3. 電磁石の磁場計算結果

電磁石の断面形状を図2に示す。図3-(a-c)に2次元静磁場計算コードPOISSON^[3]による磁場計算結果を、図3-(d)に3次元静磁場計算コードRADIA^[4]による計算結果を示す。励磁曲線図3-(a)から、電流100Aで強さ0.18Tの B_y (垂直方向磁場)が得られることが分かる。また、鉄芯の飽和の効果は見られない。(b)には電流100Aの場合の B_y の水平方向分布をしめす。磁極の幅が11cmあるため、入射ビームの通る振幅約±2cmの範囲まで磁場がおおよそ平坦であることが分かる。(c)にビーム軸付近の磁場の平坦性を示す。スイッチング運転中にバンプされた蓄積ビームは最大で約±1mmの振幅を持つが、その範囲では磁場は 1×10^{-5} 以内の均一さを保つことが分かる。

最後に(d)に B_y のビーム進行方向分布を示す。磁石コア($\pm 75\text{mm}$)の外側で磁場がゼロになるまで、およそ磁極ギャップ 21mm の2倍以上の距離が必要であることが分かる。その範囲に漏れ磁場を吸い込む要素が存在すると、積分磁場の減少や位相遅れの原因となる。電磁石は銅板を巻いてコイルとしているが、コイルには鉄芯から片幅 50mm のはみ出しがある。幸いその範囲の真空ダクトには形状変換やアブソーバなど特別な要素が存在しない為、漏れ磁場の吸い込みによる電磁石5台の積分磁場と位相の遅れの個体差は防げられると思われる。

4. 誤差の影響と補正

バンパキッカー電磁石本体の誤差の影響について述べる。電磁石3台でバンパの高さが最も大きくなった時、電磁石の誤差により発生するCODと分散関数の歪みを表2に示す。誤差は標準偏差を指定したガウス分布の乱数によって与えられ、それぞれの場合において10通りの平均値を計算した。(a)は誤差なしのリングに対し $200\mu\text{rad}$ の回転誤差を与えた場合で、水平方向の磁場

表2 バンパキッカー電磁石の誤差の影響

		COD [μm]		$\Delta\eta$ [mm]	
		max	RMS	max	RMS
(a) 回転 $200\mu\text{rad}$	水平	5.E-04	2.E-04	1.E-05	5.E-06
	垂直	3.44	1.68	0.13	0.06
(b) COD+回転	水平	5.E-02	2.E-02	5.E-03	2.E-03
	垂直	7.25	3.56	0.28	0.13
(c) $\Delta\theta 0.05\%$	水平	12.46	4.56	0.22	0.07
(d) $\Delta\theta 0.1\%$	水平	15.95	5.84	0.28	0.08

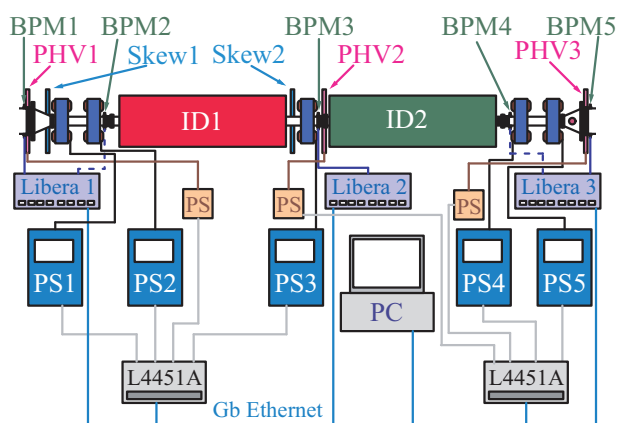


図3 制御系(案)のブロック図

“BPM”はbeam position monitor、“PHV”は積層構造の水平垂直両用のステアリング電磁石で、速い軌道フィードバックに用いられる。“Skew”は同じく速いカップリング補正用のスキュー4極電磁石、“Libera”はBPMの信号処理装置、“PS”は電磁石電源、“L4451A”は電流設定用の任意波形発生器である。

はほとんど影響を受けず、バンパは閉じるが垂直方向にRMSで $1.7\mu\text{m}$ のCODが発生している。(b)は誤差入りのリングでCOD補正を行った後に同じ回転誤差を与えた場合で、(a)よりも発生する垂直CODは大きく、RMSで約 $3.6\mu\text{m}$ となっている。(c)は蹴り角に 0.05% の誤差がある場合、(d)は蹴り角誤差を(c)の2倍の 0.1% にした場合である。いずれも最大で $10\mu\text{m}$ 以上のCODが発生しており、これは問題となる大きさである。ここでは位相のずれ 1° は 10Hz の場合、 0.3msec であるが、蹴り角 0.1% の誤差はそれ以下の大きさである。現実には誤差磁場の他に、挿入光源の磁場の非線形性や高次磁場の影響なども考えられる為、タイミング及び電流波形制御は慎重に行う必要があるが、それに加えて予め速い軌道補正の方法を考えておく必要がある。分散関数の歪みについてはいずれも小さく、ビームサイズの揺らぎなどが問題になるほどの量ではない。

図3に暫定的な制御系のブロック図を示す。磁場誤差の影響や挿入光源のバンパに対する影響の補正は、フィードフォワードで予め小さく抑えておき、残りを速いフィードバックで抑えるという二段構えで行う予定である。水平方向のフィードフォワードに関してはキッカー電磁石の励磁電流波形を変化させることで行う。その為にL4451Aという4chの波形メモリ機能付きDACを2台用いる予定である。バンパ軌道の測定はバンパの内側に存在する3台のBPM(図中のBPM2~4)で行う予定で、局所的な速い測定及び補正の為に個別に信号処理系が接続される予定である。フィードバック補正のためにはバンパ外側のBPM(図中のBPM1,BPM5)で測定を行い、速いフィードバック用のステアリング電磁石(PHV1~3)で補正を行うことになっている。また、挿入光源に起因する水平垂直のベータatron振動のカップリングが問題になる^[1]場合に備え、補正の為にスキュー4極電磁石の設計を行っている。

バンパ電磁石及び電源は現在製造中であり、2007年末までに納入されることになっている。その後、2008年の始めに磁場測定を行い、春のシャットダウン中にリングに設置される。同時に挿入光源が1台設置されることになっている。その後、2008年度にバンパや挿入光源の磁場の影響に関するスタディを集中して行うことになっている。早期に2台目の挿入光源が導入され、スイッチング運転を可能にすることが必要である。

参考文献

- [1] 小林幸則, “高速スイッチングに対するリング軌道の安定化”, 「新BL-16高速可変偏光スイッチング軟X線分光ビームラインの検討」報告, KEK Internal 2005-7
- [2] 可変偏光アンジュレータを用いた偏光スイッチング及びその利用実験に関する文献は数多くあるが、ここでは最新の1例を挙げるに留める。C. Sanchez-Hanke, et al., “The use of fast-modulated elliptically polarized soft x-rays in the detection of small polarization signals”, Proc. of SRI 2007, to be published
- [3] http://laacg1.lanl.gov/laacg/services/serv_codes.phtml
- [4] <http://www.esrf.eu/Accelerators/Groups/InsertionDevices/Software/Radia>
- [5] C. Steier, et al., “Studies of the nonlinear dynamics effects of APPLE-II type EPU at the ALS”, Proc. of EPAC 2006