

パルス 4 極磁石を用いた PF-AR 入射システム

原田 健太郎、小林 幸則、宮島 司

高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

パルス 4 極電磁石を用いた PF-AR (Photon Factory Advanced Ring) における新しい入射システムを検討した。PF-AR 南直線部に磁場勾配 3T/m、パルス幅 2.4μsec のパルス 4 極電磁石を 1 台設置し、振幅 15mm の入射ビームを 1.35mrad 蹴って、入射ビームの振動の振幅をおよそ半分に減少させることで入射が可能となる。この新入射システムにおけるパラメータの最適化方法と、パルス 4 極電磁石の設計について述べる。

1 導入

第 3 世代放射光源リングは、アンジュレータ主体の放射光源であり、そのアンジュレータの特性を最大限に生かすために、低エミッタンスおよび低エネルギー分散となるようにデザインされている。しかし、低エネルギーの低エミッタンスリングでは、バンチ内電子の衝突によるタウシェック効果によってビーム寿命が数時間程度と短くなってしまうことが避けられない。また、光源のエネルギーによらず運転中のビーム電流の減少に伴うダクトや光学素子の温度変化がビーム及び光の安定性に与える影響も問題になっている。これらの問題を解決する手段の一つとして、ビームの入射頻度を増やし、例えば数分おきに少しずつ入射を行い、ビーム電流を一定にするという TOP-UP 入射が提案されてきた。実際、APS(Advanced Photon Source)[1],[2]や SLS (Swiss Light Source) では、既にユーザー実験の際に使用され、最近では、SPRING8 や台湾の SRRC[3]でも試験的に導入されつつある。しかしながら、TOP-UP 入射では、入射の度に蓄積ビームが大きく振動してしまうため、ユーザーは入射直後にデータ採取を中断させざるを得ず、すなわち数分おきに数秒間から数十秒間、実験を中断しなければならない状況にある。

入射の際には入射ビームの軌道を中心軌道に近づけてやる操作が必要であるが、現在一般的に行われている電子蓄積リングにおける入射の方式では、そのためにパルス偏向電磁石 (キッカー) を用いている。偏向電磁石の磁場は場所によらないので、入射の際には蓄積ビームも同時に蹴られてしまう。蹴られた蓄積ビームがリング全体で大きく振動してしまうのを防ぐためには、入射点より手前で予め蹴っておき、全体として閉じたバンプを作る必要がある。ところが、数台用いられるキッカーの磁場誤差、タイミングのずれ、あるいは入射部に存在する非線形磁場 (6 極磁石など) の影響で、現実にはバンプを通過するすべてのバンチに対して完全にバンプを閉じさせることは非常に困難である。従って現在、バンプの漏れ出しを防いで蓄積ビームの振動を抑えるために、より高精度のキッカー製作、ジッタの少ないタイミング系の開発、非線形磁場の影響の少ない配置等の努力がなされている状況である。

4 極電磁石は、磁極中心は磁場がゼロで、中心からの距離に比例して磁場が強くなっていくという性質を持った電磁石である。入射ビームは中心軌道からずれて入射さ

れるが、蓄積ビームは中心軌道 (4 極電磁石の中心) に存在しているため、パルスの 4 極電磁石を励磁した場合、入射ビームは通過位置に比例した磁場を感じて蹴られるが、蓄積ビームは電磁石の中心を通っているために何も感じない。ここで我々が提案するパルス 4 極電磁石[4],[5]を用いた新しい入射方式は、入射ビームのみをパルス 4 極電磁石で蹴って入射を可能にする方式である。ローカルバンプを立てず、しかも 1 台のパルス 4 極電磁石しか用いないので、従来の入射方法における数々の問題は原理的に回避される。さらに、従来の入射方法ではセプタム内壁のために入射ビームの振幅は一定以下にはならなかったが、このシステムにおいてはパルス 4 極電磁石を何台も設置することで、振幅をどこまでも減らすことが可能である。

本研究においては、PF-AR に 1 台のパルス 4 極電磁石を設置し、入射ビームの振幅を従来の方法によった場合と同程度まで抑えることで、入射を行うことを目的とする。現在 PF-AR では電流を 65mA 以上蓄積することが不可能であり、その原因は蓄積ビームの振動に伴う航跡場が入射ビームを蹴り落とす現象であろうと言われている[6]。パルス 4 極電磁石のみを用いて入射を行えばこの問題は解決する可能性があり、さらに従来の入射システムと併用すれば、数値的に航跡場の効果を見積もることも可能になると期待される。

2 パルス 4 極磁石の設置場所

2.1 入射エミッタンス

入射ビームの振動は大きく、厳密には線形振動ではないが、その振動の大きさはおよそ Courant-Snyder 不変量を用いて表すことができる。この量は、式 (1) のように書くことができる。これを便宜的 (入射) エミッタンスと呼ぶことにする。

$$\epsilon_{inj} = \frac{1}{\beta} (x^2 + (\alpha x + \beta x')^2) = X^2 + P_x^2 \quad (1)$$

ここで、 x 、 x' は入射ビームの実際の位置とその傾き、 α 、 β はツイスパラメータであり、規格化した位相空間における座標は

$$X = \frac{x}{\sqrt{\beta}}, P_x = \frac{\alpha x + \beta x'}{\sqrt{\beta}} \quad (2)$$

で表される。PF-AR の場合、入射点 (セプタム出口) において $x=48\text{mm}$ 、 $x'=7\text{mrad}$ 、 $\alpha=-2.9$ 、 $\beta=18.3$ であり、 $\epsilon_{inj}=130.7\text{mm-mrad}$ となっている。(セプタムの内壁は $x=35\text{mm}$ に存在する。) 一方、現在の入射は、パルス偏向電磁石 4 台を用いたパルスバンプによって、蓄積ビームは入射点で $x=22\text{mm}$ 、 $x'=2.8\text{mrad}$ の軌道を通る。このバンプによって入射ビームのエミッタンスは $\epsilon_{inj}=37.3\text{mm-mrad}$ まで減少するため、バンプが立ち下がった後もセプタム内壁に当たることなく蓄積ビームに捕獲される。従ってパルス 4 極電磁石によって入射ビームのエミッタンスをこの値と同じかより小さくすることができるならば、ビーム入射が可能と判断できる。

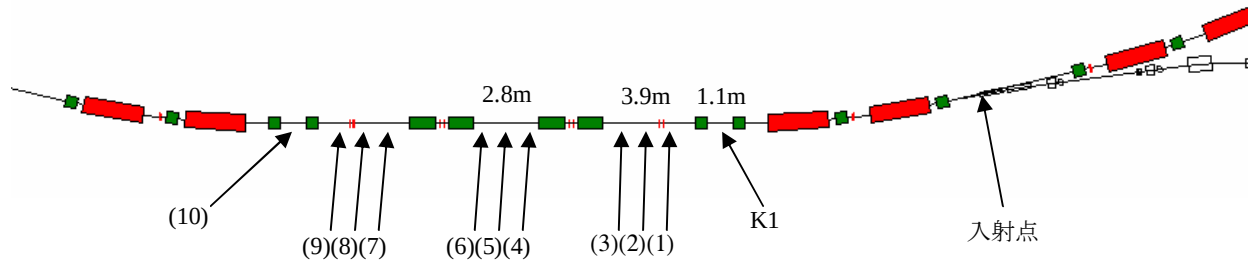


図1 PF-ARの入射点と南直線部の配置

2.2 パルス4極磁石の配置

PF-ARの入射点近傍のラティスを図1に示す。図中の矢印(5)が真南の衝突点（ラティスの対称点）である。図に示すように、パルス4極電磁石設置場所の候補として、入射点よりも下流の直線部の(1)から(10)までを考えた。これは水平方向のチューンの進みおよそ0.25に相当し、入射ビームの振幅がゼロから負（入射点と逆方向）の最大値をとるまでの区間に相当する。（入射点から(1)までのチューンの進みもおおよそ0.25である。）図2にそれぞれの場所における位相空間内の座標、パルス4極電磁石で蹴った後の座標を示す。ここで座標（横軸と縦軸）は前節で定義

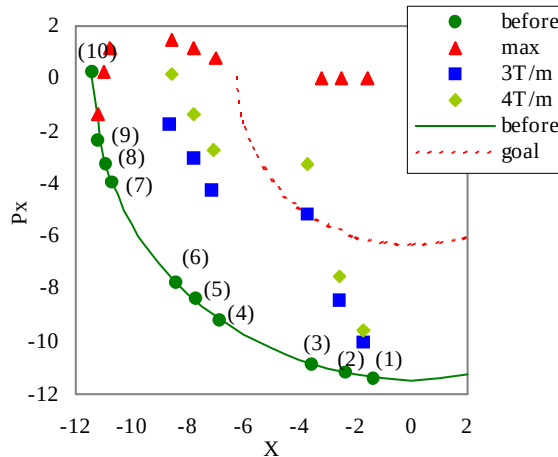


図2 パルス4極電磁石による入射エミッタンス

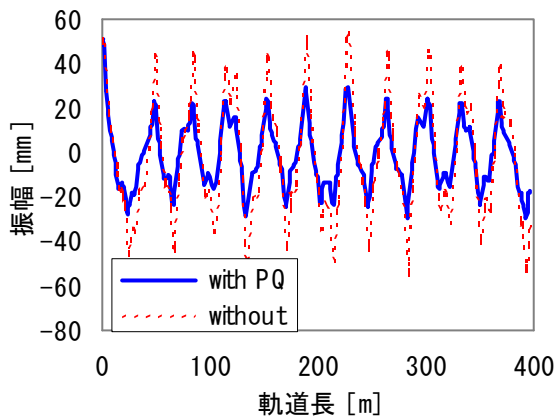


図3 入射ビームの振動

“with PQ”（太い実線）はパルス4極電磁石ありの場合を、“without”（細い点線）はなしの場合の入射ビームの振動を表す。

した規格化座標である。チューンの進みがおおよそ0.25なので、ビームは位相空間内の円弧上を1/4周だけ動く。ビームのエミッタンス（振動のCourant-Snyder不変量）の大きさはこの位相空間内では同心円で表され、図中で“before”の円弧（実線）はキッカーなしでの入射エミッタンス130.7mm-mradを表し、“goal”は現在の入射方法でのビームの入射エミッタンス37.3mm-mradを表す。現実的な蹴り角のパルス4極電磁石を設置し、この点線の円内にビームを持てることができれば、入射が可能になると考えられる。

4極電磁石は振幅に比例した磁場で、ビームを蹴る。その時の蹴り角は、式（3）で与えられる。

$$\theta = B'L\Delta x \quad (3)$$

ここで、 B' は4極電磁石の磁場勾配、 L は長さ、 Δx はその場所の入射ビームの振幅、 θ は蹴り角である。以下では長さは30cmとする。電磁石ではキックを与えるため、ビームの振る舞いを位相空間で見た場合、位置 X の変化はなく、 P_x のみが変化する。（なお、実空間の傾き x' はゼロにできるが、 α がある場所では P_x はゼロにはならないため、必ずしも $x'=0$ がエミッタンス最小の条件ではないことに注意。）蹴った後の入射エミッタンスをどこまで小さくできるかという観点からは、振幅 X ができるだけ小さい場所にパルス4極電磁石を設置するのがよいが、振幅が小さい場所では非常に大きな磁場勾配を必要とする。図2においてmax（▲）は蹴り角の最大値を考えない場合に到達可能な最小エミッタンスを表す。例えば(1)の場所に設置した場合に蹴った後のエミッタンスは最小値2.3 mm-mradとなるが、この場所の入射ビームの振幅は4mmしかなく、必要な磁場勾配は27T/mと非常に大きくなる。同じく図中で3T/m（■）、4T/m（◆）はそれぞれその磁場勾配で到達できる最小エミッタンスを示す。磁場勾配が最小で入射が可能である最適解は、蹴った後に入射可能エミッタンスギリギリの値になるような場所を探すことである。図より、(3)の場所（入射ビームの振幅約15mm、以後PQ3と記述）で磁場勾配3T/mの場合が最適であることが分かる。従って、PQ3（具体的には南衝突点手前の4極電磁石QC2Sから20cm上流に離れた場所）にパルス4極電磁石を設置することとする。図3にPQ3の場所に3.0T/mのパルス4極電磁石を設置した場合の入射ビームの振動を示す。入射エミッタンスがおおよそ1/4に減少するため、入射ビームの振幅はおおよそ半になる。これは、4台のパルス偏向電磁石を用いた現在の入射におけるビーム振動とほぼ同じ振幅である。

3 パルス4極電磁石の設計

PF-ARの周回時間は1.2μsecであることから、2周目に戻ってきた入射ビームを蹴らないようにするため、パル

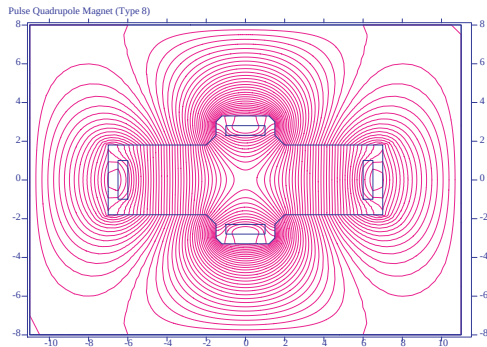


図4 パルス4極電磁石の断面形状

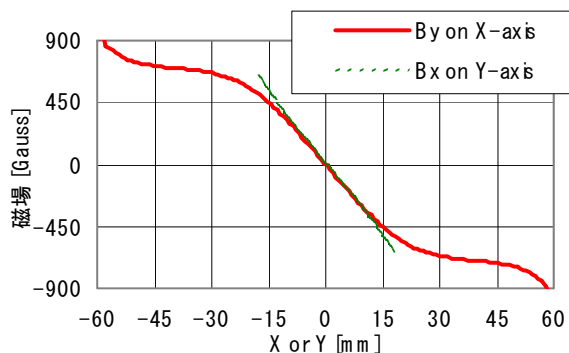


図5 パルス4極磁石の磁場分布

コイルの電流を 2000A とした場合。X=±15mm で $B_y = \pm 450$ Gauss の磁場が出ている。

ス4極電磁石のパルス幅（半サイン波形のパルスを想定）は $2.4\mu\text{sec}$ 以内とする。必要な磁場勾配は前節より 3.0T/m 、これは振幅 15mm の場所で 450Gauss の磁場に相当する。磁極長を 30cm とすると、蹴り角 θ は 1.3mrad となる。これらの条件を満たすパルス4極電磁石及び電源の設計を行った。

パルス電源の電圧を一般的なパルス偏向電磁石と同程度に抑えるためには、パルス4極電磁石のインダクタンスをそれらと同程度にする必要がある。4極電磁石には最低でも偏向電磁石の2倍で4本のコイルが必要である為、コイルの巻き数は1ターンとした。コイルの電流値をあげずに垂直磁場勾配を大きくするため、垂直方向の電磁石コアのギャップをできるだけ狭めたい。そこで、PF-AR で垂直方向のビームのアパーチャを決めている挿入光源 NE1 のギャップ全幅 20mm と同程度の垂直方向のアパーチャが確保されるまで、電磁石のギャップを狭めることとした。すなわち、NE1 においては $\beta_y = 3.1\text{m}$ 、PQ3 では $\beta_y = 3.9\text{m}$ であるので、PQ3 で現状の垂直方向のアパーチャが確保されるためには、ダクト内径として 23mm 以上とすればよい。したがって、ダクトに用いるセラミックの厚さを 5mm、クリアランスを片側 1.5mm とすると、コアのギャップは 36mm 以上となる。この条件で設計した電磁石の断面形状を図4に示す。2次元電磁場計算コード POISSON を用いて計算した軸上の磁場分布を図5に示す。コイルの電流は 2000A の時であるが、振幅 15mm の場所で 450Gauss の磁場が得られていることが分かる。また、磁束が集中する部分における最大の磁場はおおよそ 2000Gauss であり、0.1~0.15mm 厚の珪素鋼板の積層構造で電磁石を製造する場合に問題が

生じない範囲に収まっていると考えている。この磁場分布の計算結果からインダクタンスを求めるとおおよそ $3\mu\text{H}$ となり、必要な電源電圧はおおよそ 20kV-30kV となる。

4 結論

1台のパルス4極電磁石を用いて、蓄積ビームを全く蹴らずに入射を行うという、新しい入射システムを検討した。まずこの新システムを PF-AR に設置することを想定し、現実的に設置できる範囲で、最適な場所とその場合に必要な磁場勾配を求め、具体的に電磁石の設計を行った。

パルス4極電磁石の特徴は振幅に比例した蹴り角をビームに与えることであり、中央を通る蓄積ビームは蹴られない。4極電磁石によって入射ビームは、その位置は変わらず傾きが小さくなるだけであるため、もともと傾きの小さい場所では効果的に働かない一方、振幅の小さい場所では蹴る為に大きな磁場勾配が必要となる。従って、振幅、傾きとも適当に存在する場所がパルス4極電磁石の最適な設置場所となり、PF-AR においては PQ3 すなわち南衝突点手前の4極電磁石 QC2S から 20cm 上流の点が最適であることが分かった。電磁石の長さを 30cm、磁場勾配を 3.0T/m とすると入射ビームの振幅はおおよそ現在のパルス偏向磁石を用いた入射における入射ビーム振幅と同程度まで小さくでき、入射が可能となることが分かった。ダクトの垂直方向の内径を現在のビームの物理口径と同程度に仮定して電磁石の設計を行った結果、コアのギャップを全幅で 36mm とし、コイルの電流 2000A、巻き数 1 ターンで必要な磁場勾配を出せることが分かった。また、インダクタンスの計算値は $3\mu\text{H}$ となり、必要となる電源電圧はパルス幅を PF-AR 周回周期の2倍である $2.4\mu\text{Sec}$ にした場合に 20-30kV となった。現在、PF-AR の PQ3 地点にはバンチ純化用のキッカーが挿入されており、2004年の夏にそれを真南の直線部（スタディ用の BPM は撤去）に移設し、実際にパルス4極電磁石とセラミックダクトを PQ3 地点に挿入する予定である。また、実際に製作する電源としては、最大電圧 30kV、出力電流 4000A で、繰り返し 25Hz に対応できるようにすべく検討を行っている。

参考文献

- [1] L. Emery, *et al.*, "TOP-UP OPERATION EXPERIENCE AT THE ADVANCED PHOTON SOURCE", Proceedings of PAC 1999, p200
- [2] L. Emery, *et al.*, "RECENT OPERATIONAL DATA ON CONTINUOUS TOP-UP OPERATION AT THE ADVANCED PHOTON SOURCE", Proceedings of PAC 2001, p2599
- [3] T. S. Ueng, *et al.*, "TOP-UP MODE OPERATION AT SRRC", Proceedings of PAC 2000, p1874
- [4] S. Nakata, *et al.*, "Design of the injection system by half resonance into a superconducting electron storage ring", Proceedings of PAC 1989, p260
- [5] Y. Li, *et al.*, "Design, simulation and test of pulsed Panofsky quadrupoles", Proceedings of PAC 1999, p3360
- [6] T. Fujita, *et al.*, "DETECTION OF WAKE FIELD USING TEST-BUNCH METHOD AT PHOTON FACTORY ADVANCED RING", Proceedings of PAC 2003