

■第13回日本放射光学会奨励賞受賞研究報告

パルス4極電磁石による入射システム

原田健太郎 (高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光源研究系)

放射光源リングでは、蓄積電流は時間とともに減ってゆく。ユーザー実験に必要な光の強度を保つには、定期的に電流値を回復させる為の入射を行う必要がある。かつては1日に数回、ユーザー実験を中断して入射を行うのが一般的であったが、最近ユーザーが実験を続けたまま、数分おきに注ぎ足し入射を行うというトップアップ入射が主流になっている。既存の入射システムの場合、入射ビームのタイミングに合わせ瞬時的かつ局所的に蓄積ビームの軌道を移動させる(局所バンプを作る)という操作が行われる。トップアップ入射では、ユーザー実験に影響を与えない為に、局所バンプを入射点付近だけに作り、その他の場所への軌道の変動(バンプの漏れ)をできる限りなくすことが望ましいが、既存の入射システムでそれを行うことは非常に苦労が多い。また、6極電磁石などの配置によっては原理的に不可能な場合すらあり、その様な時は入射中に蓄積ビームがリング全体で振動し、光の強度が変動してしまう。この問題を簡単かつ安価に解決する為、我々はパルス4極電磁石を使った新しい入射システムを開発し、高エネルギー加速器研究機構の大強度放射光源リング(PF-AR)に原理実証の為の試験器を導入、入射蓄積に成功した¹⁾。ここでは、まず入射の原理と既存の入射システムについて述べ、次にパルス4極電磁石を使った新しい入射方法について述べる。なお、加速器を専門とする研究者向けの詳しい内容及び参考文献については、日本語の解説²⁾と英語の論文³⁾を参照していただきたい。

入射の原理と既存の入射システム

蓄積リング内の電子は曲げられると放射光を出す。電子は放射光の為に、エネルギーが減少し、振動の振幅が減少し、一方で新しい振動が励起される(放射励起に関してはここでは触れない)。電子が出す放射光は電子の運動方向に向かって放出される為、例えば電子が設計軌道に対して斜めに飛んでいる場合、放出される光子も斜め方向に出て行くが、その時、電子の斜め方向の運動量を減少させる。放射光によって失われたエネルギーはRF空洞による加速で補われるが、加速の方向は常に設計軌道に平行な方向である。従って、放射光を出して加速されて、という繰り返しにより、電子の斜め方向の運動量が減少してゆき、電子の振動が減衰する。この効果を放射減衰という。一般に、入射ビームの振動の大きさはおよそ1~3 cm、放射減衰の時間はおよそ数十msであり、蓄積リング数万周回に相当する。

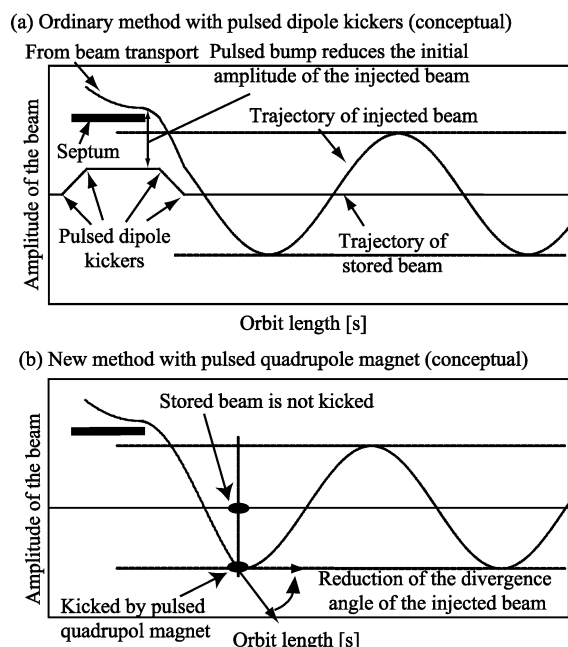


Fig. 1 Schematic drawing of the beam injection. Ordinary injection scheme with pulsed dipole kickers is shown in (a), and the new scheme with pulsed quadrupole magnet in (b). The pulsed local bump of the stored beam by the injection kickers effectively reduces the initial amplitude of the injected beam for the ordinary system. On the other hand, the pulsed quadrupole magnet reduces the divergence angle of the injected beam without exciting the dipole oscillation of the stored beam.

さて、入射ビームは蓄積リングの外側から来る為、何もしないと入射ビームの初期振幅はダクトの大きさ(リングの物理アパーチャ)を超える。入射ビームを蓄積する為には、入射ビームの振動をダクトの内側に収め、入射ビームがリングを安定に周回できるようにする必要がある。それができれば、放射減衰の効果で入射ビームの振幅は徐々に減ってゆき、やがて蓄積ビームと混ざり合うことになる。入射ビームの初期振幅は蓄積ビームの軌道との間の距離で決まるが、従来の入射システムでは、入射ビームの初期振幅を実効的に減らす為、蓄積ビームの軌道を一時的かつ局所的に入射ビーム側にずらすという操作を行う(Fig. 1-a)。その為にキッカー電磁石という高電圧かつ大電流のパルス偏向電磁石を複数台(通常4台以上)用いるのだが、その調整は容易ではなく、また、6極電磁石の配置によっては、原理的に蓄積ビームの振動が励起されてしまうこともある。そこで、我々は蓄積ビームの軌道変化を必要とし

ない新しい入射システムを開発した。

パルス4極電磁石を用いた新しい入射システム

蓄積リングでは、一般的に4極電磁石はビームの集束に用いられる電磁石である。それは、広がってゆく電子ビームを、中心からの距離に比例した磁場で内向きに蹴ることで、幾何光学における凸レンズの様に集束させる働きをもつ。蓄積ビームと入射ビームに対してパルスの4極電磁石を用いれば、電磁石中央を通る蓄積ビームを蹴らず、大振幅で振動している入射ビームのみを蹴ることができる。入射ビームがある振幅を持っている場所で、ビームの向きを設計軌道に平行にできれば、入射ビームはその振幅を実効的な初期振幅として新たに振動を始めることになる (Fig. 1-b)。すなわち、パルス4極電磁石を1台使うだけで、従来の入射システム同様に入射ビームの振幅を実効的に減らし、蓄積リングの安定領域に収めることができるのである。さらに、実際の蓄積リングにおける調整の際には、磁場の強さはそれほど精密にあわせる必要はなく、閉軌道の歪 (COD) を補正して蓄積ビームの軌道がパルス4極電磁石の中央を通るようにするだけでよく、それらは従来の入射システムに比べて非常に容易である。

ただし、パルス4極電磁石は蓄積ビームに対して重心振動は励起しないが、パルスの蓄積ビームを集束する為、ビーム形状の振動を励起する。これを防ぐ為には、パルス4極電磁石を複数台用いて補正を行うか、あるいはより高次の電磁石 (例えば、6極電磁石) を用いるという方法がある⁴⁾。また、入射ビームの振動はリングのオプティクスに依存するため、パルス4極電磁石を1台だけ設置した場合、入射点からパルス4極電磁石までのオプティクスを大きく変えると入射が困難となる場合がある。

パルス4極電磁石の最適化

パルス4極電磁石は、入射ビームの発散角を減らすことで振動の大きさを減少させる。入射ビームをリングのアーチャ内に収めるという条件から、必要な発散角変化量が決まる。入射用のパルス4極電磁石の、蓄積リング軌道上における設置場所は、振動している入射ビームがその変化量以上の発散角をもつ場所に限られる。一方、パルス4極電磁石の磁場の強さは入射ビームの振幅に比例して増大するため、入射ビームに対してある一定の角度減少を与えるのに必要な磁場の強さは、その場所のビームの振幅に依存する。この両者の釣り合いにより、パルス4極電磁石の最適な設置場所が決まる。

PF-ARは周長377 m、単バンチ運転に特化した放射光利用専用の蓄積リングである。入射ビームのエネルギーは3.0 GeV、その後、6.5 GeVまでビームを加速してユーザーランとなる。入射直後の蓄積電流はおよそ60 mAである。PF-ARの場合、パルス4極電磁石を設置するのに最適な場所は、入射点から約15 m下流、リング南対称点

Table 1 Parameters of the pulsed quadrupole magnet

Core length [mm]	300
Vertical gap of the pole [mm]	36
Horizontal gap of the pole [mm]	102
Coil turn number [turn]	1
Power supply voltage [kV]	20
Designed (maximum) field gradient [T/m]	3 (6)
Designed (maximum) current [A]	2000 (4000)
Pulse width [μ sec]	2.4
Calculated inductance [μ H]	1.8
Thickness of silicon steel [mm]	0.15

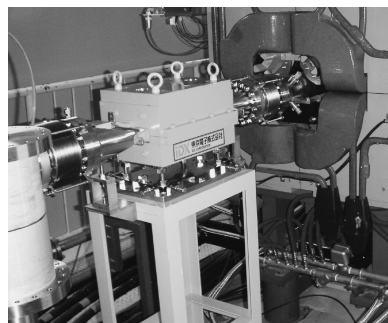


Fig. 2 Picture of the pulsed quadrupole magnet in PF-AR tunnel.

手前の4極電磁石 (QC2S) 付近となった。必要なパルス4極電磁石のパラメータを Table 1 に示す。強い磁場を効果的に発生させる為、電磁石の磁極の間隔をできるだけ狭くするとともに、電源電圧を低く抑える為、一巻きコイルを用いることでインダクタンスを小さくした。入射ビームは水平方向に振幅15 mmの場所を通過し、パルス4極電磁石によって約1.3 mrad蹴られることになる。

入射スタディの結果

マシンスタディを行うため、まずはパルス4極電磁石と電源を組み合わせ、励磁試験と磁場測定を行った。設計通りの性能が出ていることを確認した後、PF-ARトンネル内に実際に設置した (Fig. 2)。ビームを使ったスタディを開始したその日の内に、入射効率はそれほどよくないものの入射に成功し、リングに電子ビームが蓄積された。また、蓄積ビームと入射ビームの軌道を補正し、設計値に近づけた結果、入射時の蓄積ビームの振動はほぼ抑制され (Fig. 3)、入射効率も従来のシステムと同程度まで改善された。

PF-ARの高周波加速 (RF) 空洞には多セル空洞が採用されており、短い直線部で効率的にビームを加速できる反面、高次モードによるビーム不安定性の問題が避けられ

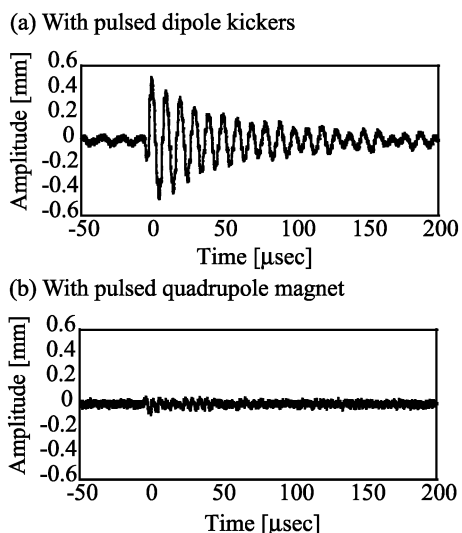


Fig. 3 The oscillation of the stored beam at the injection by pulsed dipole kickers (a) and pulsed quadrupole magnet (b). The maximum amplitude of the excited coherent dipole oscillation is about 0.6 mm for the case with dipole kickers and 0.1 mm for the case with pulsed quadrupole magnet.

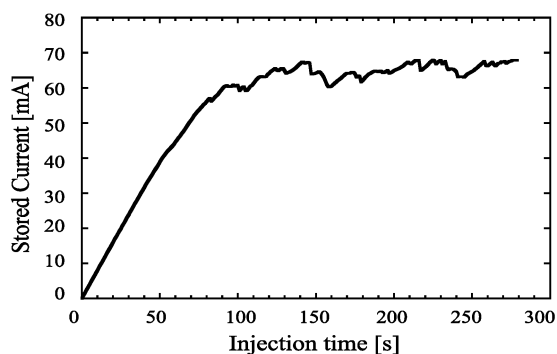


Fig. 4 Stored current history for the injection with a pulsed quadrupole magnet. The maximum stored current at the single bunch mode is 68 mA after various fine tunings.

ない。入射の際、ビームを蓄積してゆくと、不安定性が励起され、蓄積ビームサイズが増大する。パルス4極電磁石の磁場は振幅に比例して増加する為、ビームサイズが大きくなるとその裾を強く蹴ることになり、蓄積ビームの一部を失ってしまうことになった。この場合、蓄積可能な最大電流値はおよそ30 mAとなる。不安定性を抑えるため、主にRF関連のパラメータの調整を続けた結果、蓄積ビームの不安定性と蓄積電流増加に伴うビームサイズ増加

を抑えることに成功し、ほぼ安定して60 mA以上まで蓄積することが可能になった (Fig. 4)。

謝辞

本研究は個人で行ったものではありません。放射光源研究系電磁石・入射グループの皆様、特に共同研究者、推進者であるグループリーダーの小林幸則准教授に深く感謝いたします。セラミックダクトや形状変換の設計、製作、電磁石のリングへの設置などに関しては真空グループの方々に大変お世話になりました。また、マシンスタディでは、RFグループの皆様、AR共同チームのビーム診断グループの方々、東大物性研SOR施設の皆様など、大変多くの方々にお世話になりました。もちろん、LINACやKEKBの方々の協力なしにもスタディはできませんでした。最後に、パルス4極電磁石による入射の有効性をすぐに理解し、予算獲得に尽力して頂きました放射光源研究系前主幹の小林正典名誉教授、そして常に我々を励まし助言して下さいました現主幹の春日俊夫教授に感謝いたします。どうもありがとうございました！

参考文献

- 1) 原田健太郎, 小林幸則: “パルス4極電磁石による入射システム”, PF NEWS Vol. 26 No. 1 May, 2008.
- 2) 原田健太郎, 小林幸則: “(解説) パルス4極電磁石による入射システム”, 加速器学会誌, 2巻3号, 2005年10月.
- 3) K. Harada, Y. Kobayashi, T. Miyajima and S. Nagahashi: “New injection scheme using a pulsed quadrupole magnet in electron storage rings”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 10, 123501 (2007).
- 4) H. Takaki *et al.*: “Development of a pulsed sextupole magnet system for beam injection at the photon factory storage ring”, Proc. of PAC 2007, pp. 230-232 (2007).

● 著者紹介 ●



原田健太郎

高エネルギー加速器研究機構 物質構造
科学研究所 放射光源研究系 助教

E-mail: kentaro.harada@kek.jp

専門: 放射光源

【略歴】

2002年3月, 東京大学大学院理学系研究科博士課程単位取得後退学, 4月より現職, 博士(理学)。