

パルス4極電磁石による入射システム

原田健太郎, 小林幸則
物質構造科学研究所 放射光源研究系

New Injection System Using A Pulsed Quadrupole Magnet

Kentaro HARADA, Yukinori KOBAYASHI
Light Source Division, Photon Factory, Institute of Materials Structure Science

1. はじめに

蓄積リングを周回する電子は、ダクト内の残留ガスとの散乱、電子ビーム同士の衝突による散乱、制動放射によるエネルギー損失等によって失われ、徐々に減ってゆく。高エネルギー加速器研究機構のPF-AR(Photon Factory Advanced Ring)では時間とともに減っていくビーム電流値を回復する為、1日に2回、入射器(線形加速器)で3 GeVまで加速された電子をリングに注ぎ足している。入射器で加速され、ビーム輸送路でリングまで運ばれた電子を蓄積リングに注ぎ足すことを入射と呼んでいる。一般に入射を行う為には、セプタム電磁石とキッカー電磁石という2種類のパルス偏向電磁石が使われるが、入射されるビームと既に蓄積されたビームの電荷とエネルギーが等しい場合、電磁気力を使って両者を同じ軌道に重ねることはできない。すなわち、入射ビームをリングの周回軌道に乗せると、蓄積ビームは同じ量だけ蹴られて、軌道から外れてしまう。そこで、入射には様々なテクニックが駆使されることとなる。ここではまず、キッカーとセプタムを使った通常の入射の原理を説明し、次に我々が考案したパルス4極電磁石を使った新しい入射方法について述べる。それからPF-ARに設置したパルス4極電磁石のパラメータを述べ、最後にマシンスタディの結果について述べることにする。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[1]と英語の論文[2]を参照して欲しい。

2. 従来入射方法

ユーザー運転中に行われている通常の入射では、入射の瞬間にキッカー電磁石とセプタム電磁石という2種類の電磁石をパルスの励磁する。セプタム電磁石はビーム輸送路の出口、すなわちリング入射点直前に設置されている電磁石であり、入射ビームの軌道の向きを蓄積リングの設計軌道とほぼ同じ向きにする為に用いられる。一般に、入射点においては蓄積ビームと入射ビームの間の距離はおよそ数cmであることが多いが、セプタムでは入射ビームのみを曲げ、蓄積ビームには影響を与えない様にする必要がある。そこで、入射ビームと蓄積ビームの間をセプタム(横隔膜の意味)板という銅板で区切り、電磁石をパルスの励磁することによる渦電流の効果を利用して磁場を遮蔽している。

さて、蓄積リングを周回する電子ビームには4極電磁石による集束力が働いているが、それは中心軌道からずれた電子を中心方向へ引き戻す線形の復元力である。従って、蓄積リング中のビームの運動は、線形の範囲では重りにつけたバネと等価であり、その調和振動的な振動をベータトロン振動と呼んでいる。入射ビームは中心軌道から数cm離れたところで蓄積リングに入射されることになるが、その位置を初期振幅として、蓄積リング内では大振幅のベータトロン振動を始める。ただし、入射点のすぐ手前にはセプタム板があり、蓄積リング側から見ると、入射ビームはその外側から振動を開始することになるので、そのまま何もしていないでいると、入射ビームは何周かして戻って来た時、セプタム板に衝突して失われてしまうことになる(Fig. 1)。これでは電子ビームをリングに蓄積させることはできないので、衝突を回避させる為に、高速(数マイクロ秒)でパルス動作するキッカー電磁石が使用される。キッカー電磁石は実効的に入射ビームの初期振幅を減らす為に用いられる。

キッカー電磁石は入射点に局所バンプを形成する様に配置される為、大抵の場合、2台が入射点上流、2台が下流という様に4台配置される。入射ビームに対しては、下流の2台のキッカー電磁石により、ベータトロン振動の振幅を小さくするという働きをしながら(Fig. 2)、すでに蓄積されているビームに対しては、上流の2台のキッカー電磁石と組み合わせる局所バンプを形成し、ビームロスを回避するという操作を行っている。入射ビームの振動の振幅を、

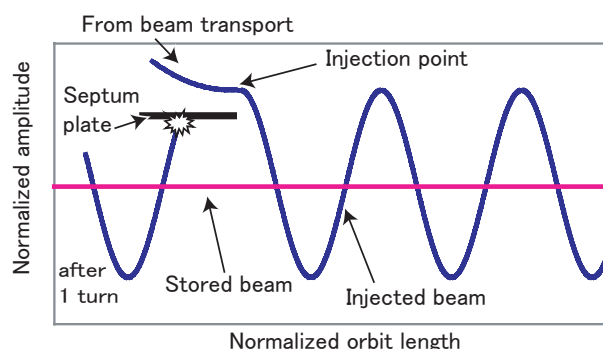


Figure 1
Schematic drawing of the betatron oscillation of the injected beam only with septum magnets. The injected beam may be lost at the septum wall within few turns because of the large betatron oscillation.

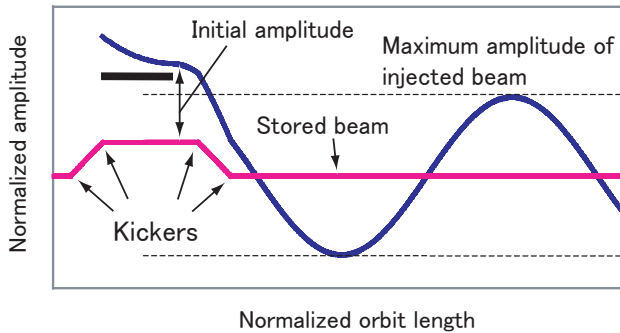


Figure 2
Schematic drawing of the betatron oscillation of the injected beam with dipole kickers. The pulsed local bump of the stored beam by the injection kickers effectively reduces the initial amplitude of the injected beam.

キッカー電磁石によって効果的に小さくすることができれば、入射ビームは入射点に戻って来てセプトムに衝突することなく、周回し続けることができる。そして、入射された大振幅のベータトロン振動を行う電子ビームは、放射減衰によって徐々に減衰し、やがて蓄積ビームと混じり合う。ここで、放射減衰について少し述べておく。蓄積リングを周回中の電子が放射光を出すと、光子は電子の進行方向の運動量を減少させる。減少する運動量が設計軌道に沿った方向ではなく、電子の進行方向の運動量である為、ベータトロン振動している電子が放射光を出すと、設計軌道に垂直な方向の、余計な運動量が減少する。運動量（エネルギー）の減少分はRF空洞による加速で補われるが、RF空洞の加速は常に設計軌道に平行である。従って、放射光を放出して運動量が減少し、RFで加速され、という過程で、振動の振幅は指数関数的に減衰してゆくのである。減衰にかかる時間は一般に数ミリ秒、数万周程度になる。蓄積リングにおいて真空ダクトなどに衝突せずにリングを周回できる口径をアパーチャというが、放射減衰の効果の為、電子・陽電子蓄積リングにおける入射では、入射ビームをとにかくアパーチャ内におさめることができれば、入射ビームは数万周回後は蓄積ビームと混ざり合うことになる。

さて、従来の入射方法の困難な点は、入射時に数台のキッカー電磁石を使って蓄積ビームの軌道をパルス的にセプトムに近づけなければいけないという点にある。数マイクロ秒でパルス動作するキッカー電磁石を高精度で製作する難しさ、電磁石の個体差、電磁石をパルス的に励磁する為の高圧パルス電源の製作や取り扱いの難しさ、励磁タイミングも含めた調整の難しさなど、キッカー電磁石システムは技術的に容易なものではない。さらに、最近主流になりつつある top-up 運転においては、入射中もユーザー実験が継続される為、キッカー電磁石を慎重かつ精密に調整し、蓄積ビームの軌道変動が局所バンプ以外に漏れ出ることを防がなければいけない。しかしながら、キッカー間に6極電磁石などビームの振幅に非線形な蹴り角を発生させる電磁石が存在すると、原理的に全ての高さに対してバンプを閉じることができなくなる場合がある。すなわち、入射区

間に6極電磁石があるPFリングの様なリングの場合、蓄積リングでは通常マルチバンチ運転時はリングの中に数百の電子の塊（バンチ）が周回しているが、入射ビームが打ち込まれるバンチ以外のバンチに対してはキッカーによって振動が発生してしまうのである。PFリングでは入射区間の6極電磁石を常時OFFにすることでこの問題を解決したが、非線形要素の配置の対称性が要求される通常の第3世代放射光リングでは、この様な対応はなかなか困難な課題である[3]。そこで、我々はキッカー電磁石による蓄積ビームのバンプを不要にし、その上さらに使用するパルス電磁石はセプトムを除いて1台のみで十分であるという、パルス4極電磁石を使った新しい入射方法を考案し、そのシステムを開発した。

3. パルス4極電磁石を使った入射方式

4極電磁石は通常ビームを集束する為に使われるが、中心軌道から外れて振幅を持つ電子に振幅に比例した線形の蹴り角を与える電磁石である。電子が外側に行くほど磁場は強くなり、磁極中心では磁場はゼロとなる特徴をもつ。すなわち、パルス4極電磁石を使うと、電磁石中心を通る蓄積ビームを蹴らずに、大きな振幅を持つ入射ビームのみを蹴ることができる。パルス4極電磁石で入射ビームを蹴り、設計軌道に対するビームの発散角を減らすことでベータトロン振動を抑制し、セプトムで決まる物理アパーチャに収めることができれば、入射ビームは無事に蓄積されることとなる（Fig. 3）。ちなみに、パルス4極電磁石は蓄積ビームに対してコヒーレントな重心振動は励起しないが、集束力として働くのでコヒーレント4極振動は引き起こす。実際、パルス4極電磁石を励磁すると蓄積ビームの断面形状が瞬時的に変化し、放射減衰によって減衰するまでビームが瞬くこととなる。これを防ぐには、パルス4極電磁石を複数台用いるか、より高次の電磁石を用いるというアイデアがある[4]。

パルス4極電磁石の位置と蹴り角を決める為の詳細な定式化についてはここでは省略し、概略のみを述べるにとどめる。まず、パルス4極電磁石は入射ビームのベータトロン振動において、振動の腹と節になる場所近傍に設置する

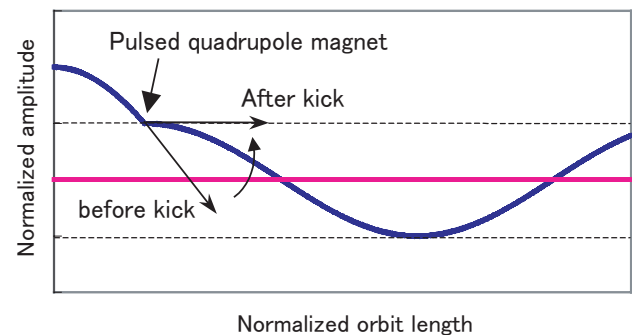


Figure 3
Schematic drawings of the betatron oscillation of the injected beam with pulsed quadrupole magnet. The pulsed quadrupole magnet can reduce the divergence angle of the injected beam without exciting the dipole oscillation of the stored beam.

ことは不適當である。それは、振動の腹の部分ではビームの発散角はゼロなので、減らすことができず、逆に発散角最大となる振動の節では、ビームの振幅がゼロである為に4極電磁石の磁場もゼロとなり、蹴ることができない。よって、パルス4極電磁石は入射ビームの振動に適当な有限の振幅と発散角がある場所に設置するのが最適となる。さて、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、減少させるべき発散角の最低値が決まる。入射ビームがその最低値以上の発散角を持つ部分に設置しなければ、その場所でたとえビームの発散角をゼロにしたとしても、入射は不可能となる。結局、入射ビームの振動で、アーチャの条件から決まる発散角の条件が満たされ、さらに電磁石の強さが現実的である程度の大きさの振幅も同時にある様な場所が、電磁石を設置するのに最も適した場所となるのである。

4. PF-AR 入射用パルス4極電磁石の製作

計算の結果、PF-AR においてパルス4極電磁石を設置するのに最も適した場所は、入射点から約15m下流、リング南対称点手前のQC2S付近であることが分かった(Fig. 4)。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には、電磁石の磁極の間隔を狭くする必要がある。PF-ARの場合、リング内で最小の垂直方向の物理アーチャは挿入光源NE1の真空ダクトであり、それよりも狭くないぎりぎりの値として、セラミックダクトの垂直方向の内幅を23mmとした。ダクトの厚さを5mm、クリアランスを片側1.5mmとした結果、磁極の間隔は36mmとなった(Fig. 5)。コイルは1巻きとし、インダクタンスをケーブル込みでおよそ4μHと小さく抑えた。それでもパルス幅はPF-ARの周回周期の2倍である2.4μsであり、必要な磁場勾配3T/mを得る為に必要な電流は約2000A、電源電圧は20kVとなった。

パルス電磁石は、磁場一定の電磁石と異なり、渦電流の効果が顕著である。その為、真空ダクトについては金属製のダクトでは磁場が遮蔽されてしまう為、高価なセラミック(陶器)製にする必要がある、割れやすいので取り扱いには細心の注意が必要となる。電磁石の磁極についても、絶縁された薄い金属板を貼り合わせた積層構造にしないと磁場が出ない。また、架台や真空ダクトなど電磁石に近い場所にある金属製の物は全て電磁石の励磁の際に高電圧で帯電してしまう為、きちんと磁場を遮蔽するか、インピーダンスの小さな接地線を接続し、電圧を逃がす必要がある。

Table 1 Parameters of the pulsed quadrupole magnet

Core length [mm]	300
Vertical gap [mm]	36
Horizontal gap [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 [μs]	2.4
Calculated inductance [μH]	1.8
Thickness of silicon steel [mm]	0.15

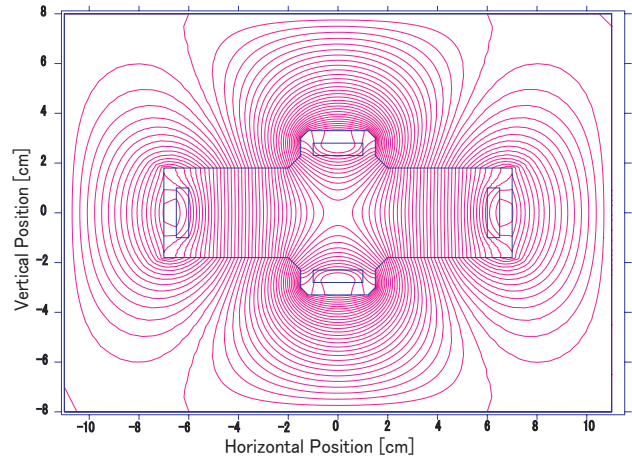


Figure 5 Cross sectional view of the pulsed quadrupole magnet. The magnetic field lines are calculated by the two-dimensional code POISSON.

真空ダクトについては渦電流の効果だけではなく、電子ビームの影響もきちんと考慮しなければいけない。電子ビームが加速器を周回する際、ダクトは一般に金属製である為、ダクト上にはビームと同時に鏡映電荷が走っている。従って、ある部分でダクトの材質(抵抗値)が突然変化するとそこで発熱が起こることになる。その為、セラミックダクトの表面には電気伝導を確保して発熱を防止する為のTi-Moコーティングがなされている。また、パルス4極電磁石内のダクト形状はその周辺のダクト形状と異なるが、真空ダクトの断面形状の変化は鏡映電荷による発熱の原因となるだけでなく、その部分で電磁場が発生して電子ビームに悪影響を及ぼす可能性がある。従って、発熱と余計な電磁場の発生を抑える為に形状を緩やかに変える形状変換部なども必要となる。

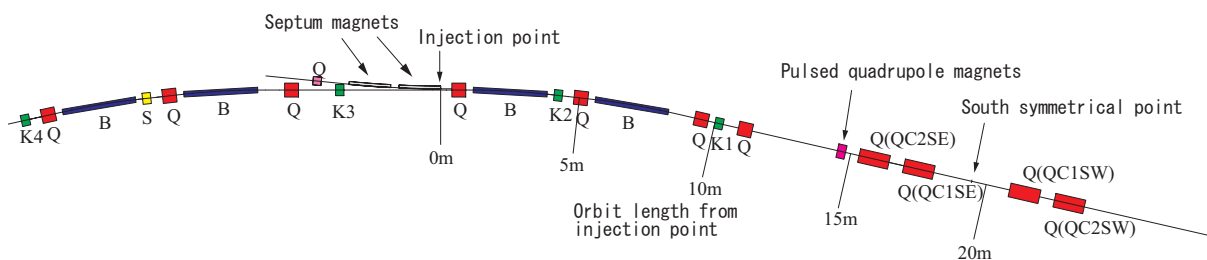


Figure 4 Lattice configuration around the pulsed quadrupole magnet in the PF-AR.

5. 入射スタディ結果

パルス4極電磁石と電源を組み合わせ、最初に励磁試験と磁場測定を行って設計通りの性能が出ていることを確認した。その後、電磁石をPF-ARトンネル内に設置し、ビームを使ったスタディを開始した。入射のマシINSTAディでは、まずパルス4極電磁石の励磁のタイミングを入射のタイミングにあわせる必要があった。具体的には、入射の約100 μs前に入射直前トリガ信号が入射器から送られてくるが、そのトリガ信号を基準に、適切な遅延の後にパルス4極電磁石を励磁することになる。精確な遅延時間は、リング南直線部に設置されている壁電流モニターで入射ビームを検出して測定された。入射ビームとパルス4極電磁石のパルス磁場が最大になるタイミングをあわせることにより、入射効率は非常に悪いもののすぐに入射に成功し、リングに電子ビームが蓄積された。

次に、蓄積ビームの振動を抑制すると同時に入射効率を改善させる為、パルス4極電磁石内の軌道を補正し、セプタム電磁石の強さを調整した。蓄積ビームと入射ビームの両方がパルス4極電磁石においてほぼ理想的な軌道を通る様になった結果、蓄積ビームの振動はほぼ完全に抑制され (Fig. 6)、入射効率も従来のシステムと同程度まで改善された。ただし、それ以外のリングのパラメータを調整しない場合、蓄積電流が少ない場合は従来の入射キッカーと同程度の入射効率が得られるものの、蓄積電流が増えるに従って入射効率がおちてゆき、30 mA蓄積したところでそれ以上の蓄積ができなくなってしまった。これがスタディ開始以来、つい最近まで解決できなかった課題であった。

最初の入射の成功から、継続的にパルス4極電磁石による入射マシINSTAディを行ってきた結果、ついに入射が滞る原因が概ねわかってきた (まだ完全解明ではないが)。ここではその原因を簡単に述べる。入射が滞る原因は入射ビームが失われる為ではなく、蓄積電流の増加と共に不安

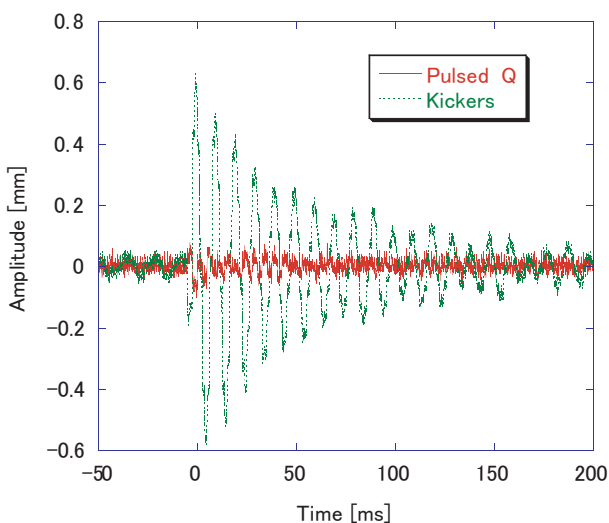


Figure 6
Typical horizontal coherent dipole oscillation of the stored beam. The maximum amplitude of the excited coherent dipole oscillation is about 0.6mm for the dipole kickers (dashed line) and 0.1 mm for the pulsed quadrupole magnet (solid line).

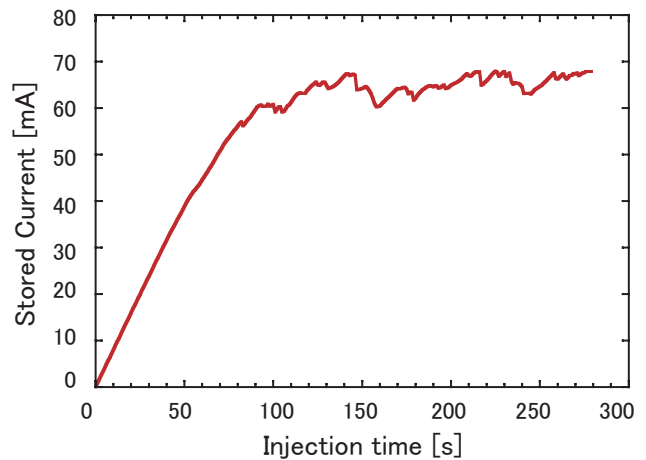


Figure 7
Stored current history for the injection with a pulsed quadrupole magnet. The maximum stored current at the single bunch mode is 68 mA for the pulsed quadrupole magnet after various fine tunings.

定性によって蓄積ビームサイズが増大し、入射されて蓄積されるビームと同じ量の蓄積ビームがパルス四極電磁石の励磁によって失われる為であった。従来のキッカーにおいても同じ現象が起きるが、パルス偏向電磁石の場合は水平・垂直方向の位置に依らずに磁場が一定であるのに対し、パルス4極電磁石は水平・垂直両方向の振幅に比例して磁場が強くなる為、ビームサイズ増大の影響をより受けやすく、その結果、従来のキッカーに比べてビーム損失が起りやすくなっているのではないかと予測し、ほぼその通りの実験結果が得られている。このビーム損失は、リングのパラメータ (主にRF電圧) の調整によって、ビーム不安定性による蓄積ビームサイズ増大を抑制すれば、従来の入射システムと同程度に抑えることができ、その結果、現在の最大電流値である60 mA以上の電流値の蓄積ができることも判明した (Fig. 7)。

6. 結論

電子蓄積リングにおけるパルス4極電磁石を使った新しい入射方式を考案し、そして電磁石システムを開発・製作し、PF-ARにおいて世界で始めて実ビームを用いた実証に成功した。4極電磁石は水平方向のビーム振幅に比例した磁場を出す電磁石であり、それをパルス的に用いることによって、蓄積ビームの重心振動を励起することなく、入射ビームのベータatron振動を抑制することができる。実際、通常使われているキッカー電磁石4台の代わりにパルス4極電磁石を1台使うだけで入射が可能になることが実験で示された。Top-up運転に対して、または入射の為に長い直線部を確保することが難しい小規模リングの入射に対して、パルス4極電磁石は非常に効果的であると思われる。

7. 謝辞

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、放射光源の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INSTAディに

おける各種計測ではビーム診断グループの方々にお世話になりました。放射光源において真空内に設置する新しいハードウェアを必要とするマシンスタディは、予算的には競争的資金だけで賅うには規模が大きすぎ、また、時間的にも準備と製作で数年、マシンスタディで数年かかるのがごく普通であり、場合によってはそれでは済まないことも多い。予算的にも人的にも過酷なほど厳しい昨今、系内外の多くの人々の協力と優しい視線があって初めて本システムの開発が可能になったと思っています。皆様に感謝いたします。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いただい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くださいました現主幹の春日俊夫教授に感謝いたします。

引用文献

- [1] 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
- [2] K. Harada, Y. Kobayashi, T. Miyajima, S. Nagahashi, "New injection scheme using a pulsed quadrupole magnet in electron storage rings", Phys. Rev. ST Accel. Beams **10**, 123501 (2007).
- [3] H. Tanaka, T. Ohsima, K. Soutome, and M. Takao, "Suppression of injection bump leakage caused by sextupole magnets within a bump orbit ", Nucl. Instr. and Meth. A **539**, 547 (2005).
- [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).

(原稿受付：2008年4月8日)

著者紹介

原田健太郎 Kentaro HARADA



物質構造科学研究所 助教
〒305-0801
茨城県つくば市大穂1-1
TEL: 029-864-5200(PHS4734)
e-mail: kentaro.harada@kek.jp
略歴：2002年物質構造科学研究所助手。理学博士。
最近の研究：可変偏光アンジュレータ高速スイッチングシステムの開発, ERL周回部のラティス最適化。

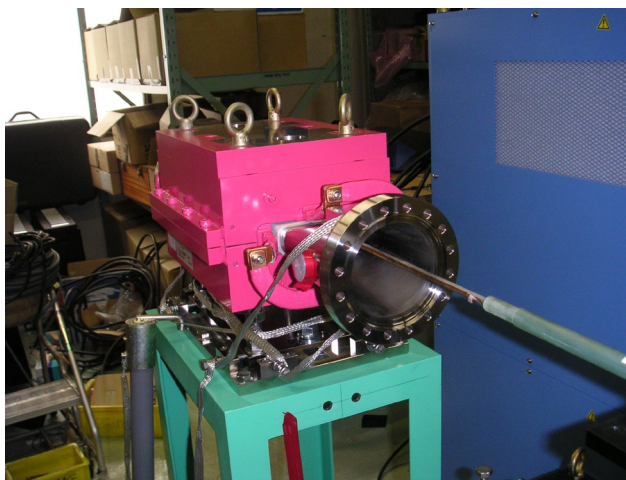
趣味：音楽鑑賞, 演奏。

小林幸則 Yukinori KOBAYASHI



物質構造科学研究所 准教授
TEL: 029-864-5200(PHS4551)
e-mail: yukinori.kobayashi@kek.jp
略歴：2001年物質構造科学研究所助教授。理学博士。
最近の研究：蓄積リングおよびERL周回部のラティス設計および非線形ビーム力学の研究。

趣味：読書。歴史(古代史が多い)のものが好きである。



新しく設置された4極電磁石。



4極電磁石の中に入っているセラミックダクト。