

## 話題

## 電子蓄積リングにおける パルス多極電磁石を使ったビーム入射

高木 宏之<sup>\*1</sup>・上田 明<sup>\*2</sup>・帯名 崇<sup>\*2</sup>・小林 幸則<sup>\*2</sup>・島田 美帆<sup>\*2</sup>・高井 良太<sup>\*2</sup>  
長橋 進也<sup>\*2</sup>・中村 典雄<sup>\*2</sup>・原田 健太郎<sup>\*2</sup>・本田 融<sup>\*2</sup>・宮島 司<sup>\*2</sup>

### Beam Injection with a Pulsed Multi-pole Magnet in an Electron Storage Ring

Hiroyuki TAKAKI<sup>\*1</sup>, Akira UEDA<sup>\*2</sup>, Takashi OBINA<sup>\*2</sup>, Yukinori KOBAYASHI<sup>\*2</sup>, Miho SHIMADA<sup>\*2</sup>, Ryota TAKAI<sup>\*2</sup>,  
Shinya NAGAHASHI<sup>\*2</sup>, Norio NAKAMURA<sup>\*2</sup>, Kentaro HARADA<sup>\*2</sup>, Tohru HONDA<sup>\*2</sup> and Tsukasa MIYAJIMA<sup>\*2</sup>

#### Abstract

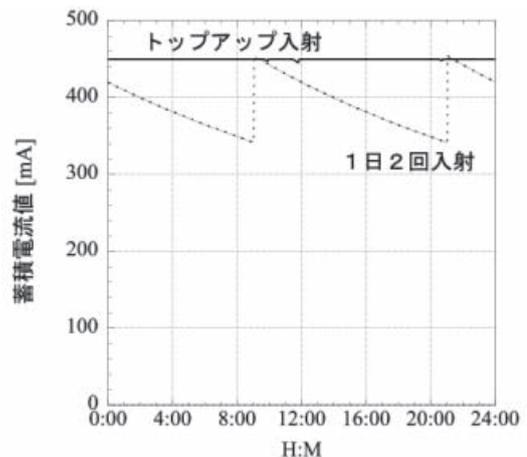
As “top-up” injection is widely used in synchrotron radiation sources, it has become very important to suppress stored beam oscillation during beam injection. To minimize this oscillation, many methods have been proposed. A pulsed multi-pole magnet injection system is one of the promising candidates and has been studied for many years at KEK. In this article, we summarize this pulsed multi-pole magnet injection system focusing on the difference between the pulsed quadrupole magnet installed in the Photon Factory Advanced Ring and a pulsed sextupole magnet in the Photon Factory.

#### 1. はじめに

近年、蓄積ビームの電流値を一定に保つために頻繁に少量の電子ビーム入射を行う“トップアップ入射”を実施もしくは検討中である放射光施設が、世界中で増えて来た<sup>1,2)</sup>。トップアップ運転が行われる以前は、**図1**に示すように入射回数が決まっており、放射光実験ユーザーは入射中には実験を中断し、入射が終わるのを待って実験を開始していた。これに対してトップアップ運転では、常に少しずつビーム入射を行い蓄積電流値が一定になるようにする。ビームを注ぎ足す方法としては、蓄積電流値がある電流値以下になったら入射を行うという方法や、蓄積電流値に関係なく前回の継ぎ足し入射からある時間が経過したらという方法がある。どちらの場合でも、従来の運転と比べて頻繁に入射を行うため、トップアップ運転では入射中も放射光ユーザーは実験を行うのが一般的である。

トップアップ入射のアイデアは古く、本誌7巻1号の解説記事にもあるように、放射光源における最初の実験は1990年にSORTECで行われている<sup>3)</sup>。トップアップ運転を放射光実験のユーザー運転に取り入れたのはAPSが最初であり、2001年に開始された<sup>4)</sup>。現

在では世界中の多くの放射光施設がこのトップアップ運転を取り入れている。既に、ALS, ELETTRA, NSRRC, NewSUBARU, PETRA III, PF, SLS, SOLEIL, SPEAR3, SPring-8, TLS, UVSOR-IIではユー



**図1** PFにおける蓄積電流値の1日の変化. 実線はトップアップ運転(2010年10月), 点線は1日2回入射(2006年6月)を表している. 図中トップアップ入射に見える小さなディップは, PF-ARへの入射のためにPFのトップアップ運転が中断しているのが原因である.

\*1 東京大学物性研究所 Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo  
(E-mail: takaki@issp.u-tokyo.ac.jp)

\*2 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization

ザー運転に使われおり、その他、BESSY-II, ESRF, MAX IV, PLS-II, SSRF でもテスト中及び計画中である。

この新しい運転形態により、放射光ユーザーは常に一定の高い蓄積電流値での実験ができるようになり、高フラックスの実験が可能になった。さらに、放射光によるビームラインの熱負荷を一定に保つ事ができるようになったため、温度変化に起因する系統的な実験誤差を小さくすることができるようになり、長時間に渡って精密な測定をする事が可能となった。

しかしながら、加速器側はこれまでユーザーに対して光を供給していなかったビーム入射時においても光の供給を行うことになり、その結果、これまでそれほど問題視していなかった事に気を使う必要がでてきた。一つは入射時における蓄積ビームの重心振動およびビームプロファイル変動であり、もう一つは入射ビームの捕獲効率である。前者は放射光の光量の変動の原因となり、後者は入射中もビームシャッターを開けているため、放射線管理の観点から重要となる。

これらを解決する方法の一つとして、複数台のパルス電磁石を使う代わりに1台のパルス多極電磁石のみによる入射方法が近年考案された<sup>5)</sup>。このパルス多極電磁石入射は、1台のパルス電磁石を使って入射するという点で従来のバンブ軌道を使った入射に比べて省スペースであり簡単な作りになっている。既に、パルス4極電磁石 (PQM: Pulsed Quadrupole Magnet, 以降パルス4極と略す) を用いた入射試験が PF-AR で行われ成功しており<sup>6)</sup>、現在、PF においてはパルス6極電磁石 (PSM: Pulsed Sextupole Magnet, 以降パルス6極と略す) を使ったユーザー運転が行われている<sup>7)</sup>。また、BESSY-II<sup>8)</sup>、MAX IV<sup>9)</sup>、LNLS<sup>10)</sup>、UVSOR-II<sup>11)</sup>、中部シンクロトロン光利用施設 (仮称)<sup>12)</sup> においてもパルス多極電磁石を使った入射が検討されている。今回の記事では、このパルス多極電磁石を用いた入射について解説し現状と将来の課題について考えてみる。

## 2. 放射光源における電子ビーム入射

パルス多極入射の話をする前に、一般的にどのようなシステムが放射光源用蓄積リングの入射部に必要になるかを、規格化された位相空間を使って少し考えてみる。図2は規格化された位相空間である。図中の  $X$  および  $P$  は次のように定義される。

$$X = \frac{x}{\sqrt{\beta}}$$

$$P = \frac{\alpha x + \beta x'}{\sqrt{\beta}}$$

ここで、 $x$  は理想軌道からの水平方向のズレを表し、

リング外側に向かって正の値を取るものとする。 $x'$  は傾きを表し、理想軌道に平行な方向を  $x'=0$  として外側に向かって正の値を取る。図2は入射ビームをリングの外側から入射する場合を想定しており、セプタム電磁石内側の壁の位置も外側にある。入射ビームは理想軌道からの初期のズレを振幅として理想軌道の周りで振動を始めるが、その振幅が放射減衰によって  $1/e$  に減衰するためには、PF リングにおいてはリングを約1万2千周する必要がある。したがって、入射後数ターンの話をする場合には、図中に示した入射ビームが持つ初期振幅  $A$  は保存量と考えてよく、特別な力を与えない限り入射ビームは振幅  $A$  を維持したまま  $X-P$  の位相空間上を周回することになり、結果として数周する内にセプタム電磁石の壁に衝突してしまう。セプタム電磁石の壁との衝突に要する正確なターン数は蓄積リングのチューンに依存する。

入射ビームとセプタム電磁石との衝突を避けるためには、振幅  $A$  を図2の内側の振幅  $B$  の円のようにセプタム電磁石の壁より小さくする必要がある。一旦セプタム電磁石の壁に当たらない振幅となった入射ビームは、放射減衰により振幅が小さくなりやがて蓄積リングに捕獲されることになる。ここまでの議論は、セプタム電磁石が蓄積リングの物理的な口径を決めていると仮定しており、仮にその他の部分がそれを制限する場合には、セプタム電磁石の代わりにその部分に当たらないように入射ビームの振幅を小さくしてやる必要がある。

この入射ビームの振幅を小さくするシステムについて、放射光源で一般に用いられているバンブ軌道を用いた入射とパルス多極電磁石を用いた入射を比較してみる。

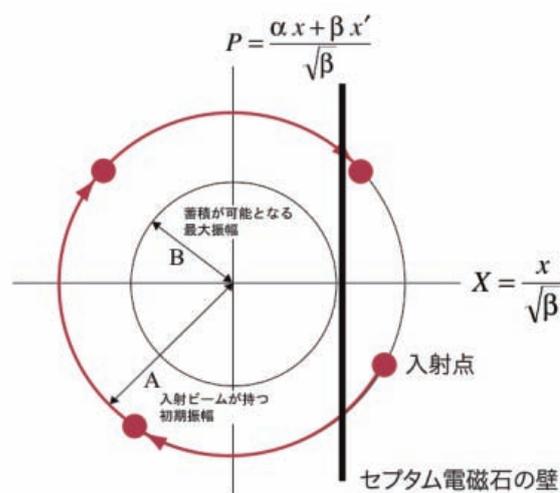


図2 規格化位相空間における入射ビームの軌道とセプタム電磁石の壁の関係。

## 2.1 バンプ軌道を用いた入射 (キッカー入射)

まずは, 放射光源用蓄積リングへの一般的な電子ビーム入射方式である“バンプ軌道を用いた入射”を図3に示す(以降この入射方式をキッカー入射とする). この入射方式では, 入射ビームが持つ初期振幅  $A$  を小さくするために図中オレンジ色で示すようなバンプ軌道を作る. これにより, 初期振幅は  $A$  から  $B$  へと小さくなる. この振幅  $B$  を蓄積リングの物理口径以下にすれば入射が可能となる. 蓄積ビームの重心振動を抑えるにあたりこの方法で重要になるのは, “バンプ軌道が全てのタイミングで閉じる”ということである. バンプは通常ハーフサインの波形で立ち上がって立ち下がる. 入射はパルス磁場のピークのタイミングで行われるが, 蓄積ビームはシングルバンチ運転で無限りピーク以外のところでもバンプ軌道上を通過している. したがって, バンプ軌道が全てのタイミングで閉じるためには, バンプを作るための4台のキッカー電磁石(図3のK1~K4)が, パルスの全てのタイミングにおいて互いに同じ比率の蹴り角を発生し続けなくてはならない. もしそれができなければ, バンプ軌道は閉じることができず, 蓄積ビームは振動を始めてしまう.

実際, このバンプ軌道の不完全さを原因とする入射時の蓄積ビームの振動が多くの放射光施設で見られる<sup>13)</sup>. 原因としては, 上で述べたキッカー間の励磁のタイミングのずれやパルス電源・電磁石の個性が原因である場合が多いが, バンプ軌道内に6極電磁石等の非線形磁場を発生させる要素があることが原因でバンプ軌道が完全に閉じないという場合もある<sup>14)</sup>.

この問題を解決する方法としては, 個体差の非常に小さいパルス電磁石と電源の製作が重要であるが, キッカー間の個性を無くすにも, 製作誤差などの技術的な限界がある. 他の解決方法として, 電磁石の数は増えるが, パルス偏向電磁石を用いて発生した蹴り残しを

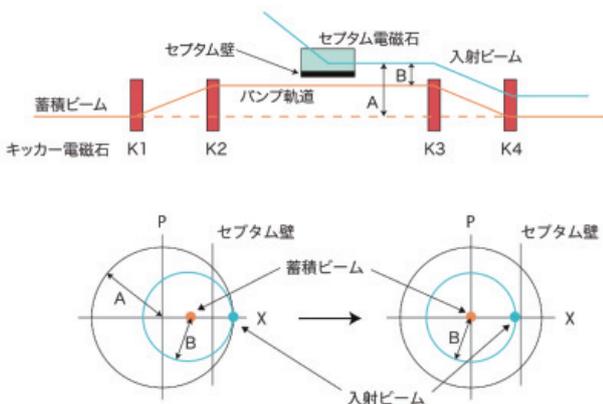


図3 バンプ軌道を用いた入射. K1~K4はキッカー電磁石.

補正しようという試みも実用化されている<sup>15)</sup>.

## 2.2 パルス多極電磁石を用いた入射

“複数台のキッカー間のタイミング不整合やそれぞれのキッカーの個性が蓄積ビーム振動原因であるならば, 入射用のパルス電磁石を1台にすれば問題は原理的に解決できるのでは”というのが, パルス多極電磁石による入射システム開発のスタートである. バンプ軌道が必要ないのであるから, 非線形磁場を持つ電磁石が近くにあったとしても全く問題にならない. またパルス電磁石の数が減るのであるから, 省スペースという点で小型のリングには有効であるという利点も持ち合わせる.

多極電磁石を利用すれば, 蓄積ビームが通過する磁極中心付近には殆ど磁場が存在していないのに対し, 入射ビームが通過する磁極中心から離れた位置に強い磁場を発生させることができる. これにより, 蓄積ビームに影響を与えることなく入射ビームだけを大きく蹴る事が可能となる. 図4はパルス多極入射を模式的に表したものである. バンプ軌道を作らず, セプトム電磁石からある位相進んだ所に1台のパルス多極電磁石を置き, 入射ビームだけをそこで蹴ってセプトムに当たらない振幅まで小さくする. したがって, パルス多極電磁石に入射ビームが到着するまでに真空ダクトに衝突していなければ, 基本的にパルス多極電磁石はリング上のどこに設置してもよい事になる. ただし, 入射ビームが磁場の弱いパルス多極電磁石の中心付近を通るような場所を設置場所を選んだ場合, 入射ビームに十分なキックを与える為には強力なパルス多極電磁石を作る必要がある. 現実的な強さのパルス多極電磁石を作るに当たっては, なるべく磁極中心から離れた場所に入射ビームがくるように位相の進み方を選ぶ必要がある<sup>5)</sup>.

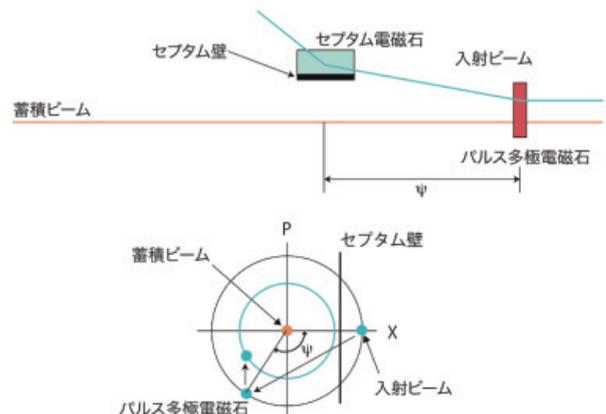


図4 パルス多極電磁石による入射.

### 3. パルス 4 極

このコンセプトの下で最初に作られたのがパルス 4 極である<sup>6)</sup>。4 極磁場は、中心からの距離に比例する磁場を持っている。したがって、パルス 4 極を設置した場所での入射ビームの軌道が中心から十分離れた位置に来るようにすると、蓄積ビームに対しては殆ど影響を与えず、入射ビームだけを蹴る事ができる。図 5 は、PF-AR に 2004 年に設置され入射実験をおこなったパルス 4 極の外観であり、図 6 は 2 次元磁場計算による磁場分布である。図 7 は水平方向の磁場分布である。入射ビームが蓄積リングのアクセプタンスの中に収まるように蹴りを与える事ができれば、入射ビームはやがて放射減衰によって蓄積リングに捕獲されることになる。4 極電磁石の良いところは、多少の製作誤差があったとしても磁極中心付近に磁場がゼロになる点が必ず 1 つ存在するところである。

図 8 は、パルス 4 極を用いた入射時に高速ゲートカメラを使って蓄積ビームのビームプロファイルを測定した結果である。ビームプロファイルは PF-AR の

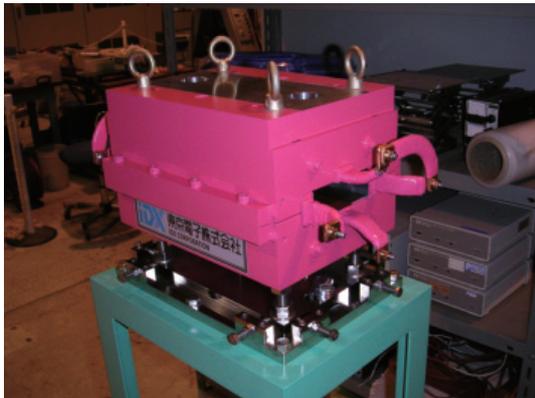


図 5 パルス 4 極の写真。

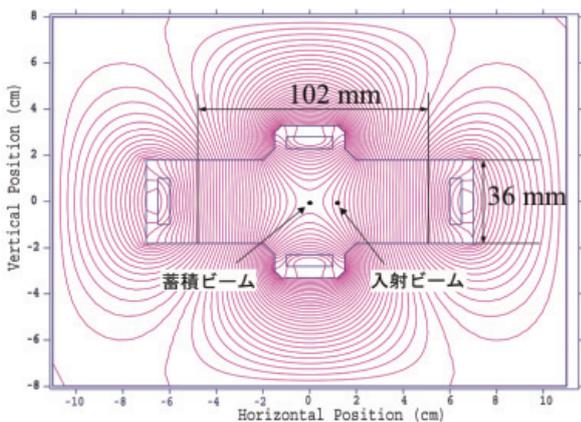


図 6 2 次元磁場計算によるパルス 4 極の磁場分布。

NW5 の偏向電磁石下流に設置した光ポートからの放射光を利用して観測した。入射時の水平方向のビーム振動が見やすいように、プロファイルは反時計回りに 90° 回転させた状態でそれを周回ごとに横軸方向に並べてプロットしている。図からわかるように、キッカー入射時には蓄積ビームが非常に大きく振動しているが、パルス 4 極入射時には、キッカー入射に比べて水平方向の蓄積ビームの振動が非常に小さくなっているのがよくわかる。しかしながら、ビームプロファイルの詳細を見ると、パルス 4 極入射では蓄積ビームの形状が細くなったり丸くなったりとプロファイルの変動が見える。これは、有限のサイズを持つ蓄積ビームが、弱いながらも中心付近の 4 極磁場を感じて 4 極振動を起こしていることが原因である。

### 4. パルス 6 極

この蓄積ビームプロファイルの変動を抑えるためには、パルス多極電磁石の極数を増やすのが簡単である。図 9 は入射ビームが感じる磁場の強さをパルス 4 極とパルス 6 極で同じにした状態で、蓄積ビームが感じる中心付近の磁場の強さがどのようになるのかを示したものである。入射ビームが中心から  $x_1$  離れた位置に来るとすると、中心から  $\Delta x$  離れた点における磁場の強

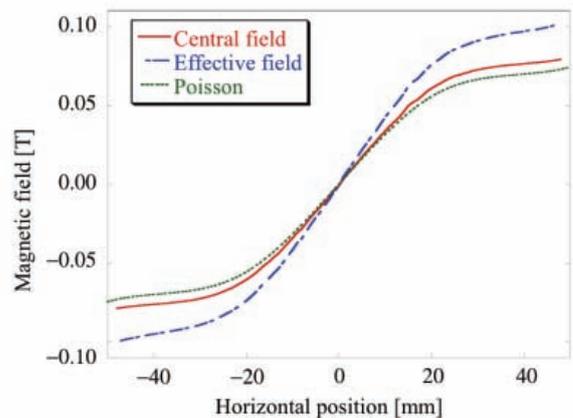


図 7 パルス 4 極の垂直方向の磁場の測定結果と 2 次元シミュレーションの結果の比較。緑線は 2 次元磁場計算値であり、赤線と青線は測定値である。

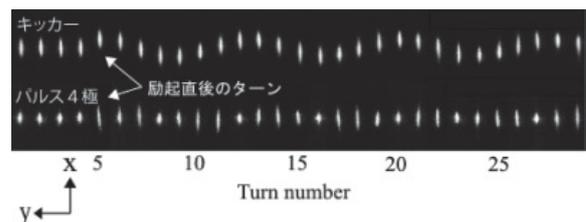


図 8 キッカーおよびパルス 4 極入射時の蓄積ビームのプロファイル。

さは、パルス4極に比べて磁極数の多いパルス6極では  $\Delta x/x_1$  となる。このように、パルス多極電磁石の極数を増やせば磁極中心付近の蓄積ビームへの影響を小さくすることができるが、磁極付近の磁場の強さは極数の乗数で増加し急激に磁場が立ち上がることになるため、磁極内での磁場の飽和が問題となり、どこまでも磁極数を増やすという訳には行かない。PFリングではパルス8極だと磁場の飽和が苦しいということで、パルス多極入射には6極を用いる事にした<sup>7)</sup>。

PFリングにおいて、パルス4極電磁石を使った場合とパルス6極を使った場合でどの程度蓄積ビームのプロファイルに影響が出るかシミュレーションを使って比較した結果が図10である。これは、エミッタンスが35 nm radでガウス分布する1000個の粒子に対してビームトラッキングを行い、同じ位置に置いたパルス4極およびパルス6極を励起した前後の蓄積ビームプロファイルをターン毎に追いかけたものである。BL-27に設置してある高速ゲートカメラによる実際の測定結果と比較するために、シミュレーションも同じ位置でのプロファイルを取り出した。両パルス電磁石共に、電磁石内で入射ビームが通過する  $x = 15$  mmの点で120 Gauss mの積分磁場が出るように設定した。設置誤差や磁場誤差は入っていない。横軸は入射の前後のターンの番号が振ってあり、パルス多極電磁石を励起

した直後のターンは6ターン目である。図10より、パルス4極入射を用いた場合は、PFリングにおいても大きなプロファイルの変動が予想されることがわかる。このビームプロファイル変動を水平及び垂直方向のビームサイズに変換してプロットしたのが図11である。パルス6極入射を使った場合には、ビームサイズの最大変動幅はパルス4極入射に比べて水平・垂直方向にそれぞれr.m.s.で約1/25および約1/8になっており、ビームプロファイルの変動を小さく出来る事が期待できる。入射トリガ以前のビームのプロファイルが若干変動しているのは、使用した粒子数に起因する。

製作したパルス6極は、ボア半径が33 mm、磁極長が300 mmとした。図12に示すのはパルス6極の外観であり、図13には磁極の断面形状および2次元磁場計算の結果を示す。パルス6極入射において重要なのは歪みのない正確な6極磁場成分ではなく、入射ビームが通過する場所での十分な磁場と、蓄積ビームが通過する磁極中心部でのゼロ磁場である。従って、より強い磁場を得るために磁極先端の形状を等ポテンシャル面にするよりは、図に示したように円形の真空ダクトに沿う形にした。これにより、入射ビームが通過する  $x = 15$  mmの位置で、等ポテンシャル面を持つ場合に比べて約20%強い磁場を出す事ができた。

磁極は渦電流の影響を受けないように、ブロックではなく0.15 mm厚の無方向性硅素鋼板の積層構造にした。真空ダクトと磁極間の隙間は0.5 mmである。コイルは15 mm  $\phi$ の銅製の1ターンコイルとした。冷却は空冷とし、ブLOWERは特に必要としない。コイルは棒状の両端にネジ穴を切り、写真に示すように、銅製の接続用部品で隣のコイルと端点で接続を行い1ターンになるようにしている。耐圧は30 kVとした。

ピーク電流を3000 Aにして、パルス磁場の垂直成分を水平面に沿って測定した結果が図14である。グラフ内の赤点は測定値であり、黒点は2次元の磁場シミュレーションコードであるPOISSONを使った計算結果である。POISSONの計算には後述する磁場の有効長を考慮して磁極長320 mmで計算している。測定結果

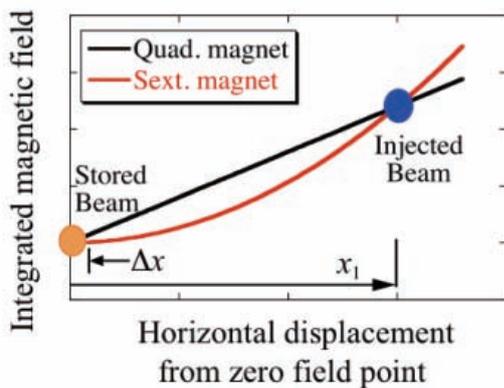


図9 パルス4極とパルス6極の水平方向の磁場分布と蓄積ビームに対する影響。

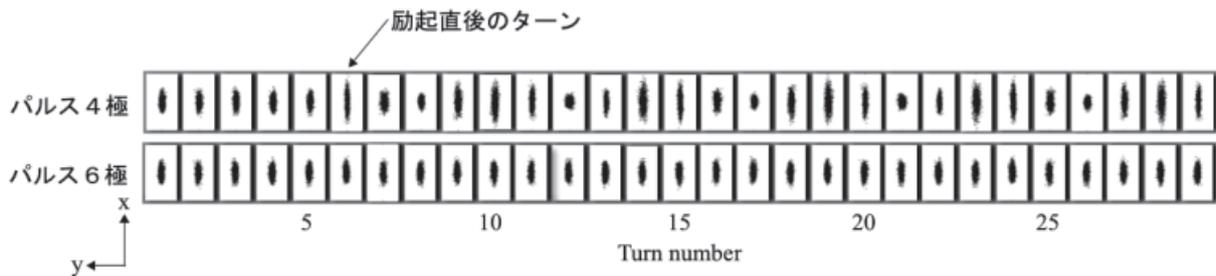


図10 パルス4極およびパルス6極入射時の蓄積ビームのプロファイルの変動をシミュレーションで比較したもの。

は設計通りの放物線の磁場が出ている事がわかる. 入射ビームが通過する中心から 15 mm のところで必要とする積分磁場 120 Gauss m 以上が出ていることが確認

できた. また, 磁極中心付近ではほぼ磁場がゼロになっているのがわかる. ただ, パルス磁場測定は非常にノイズの多い測定であり, 測定した微分波形を積分することで求めるため, 磁場が弱い所での値には大きな誤差が生じる. 製作したパルス 6 極は 2008 年に PF リングのアンジュレータ 2 番の長直線部の下流に設置した (図 15 参照).

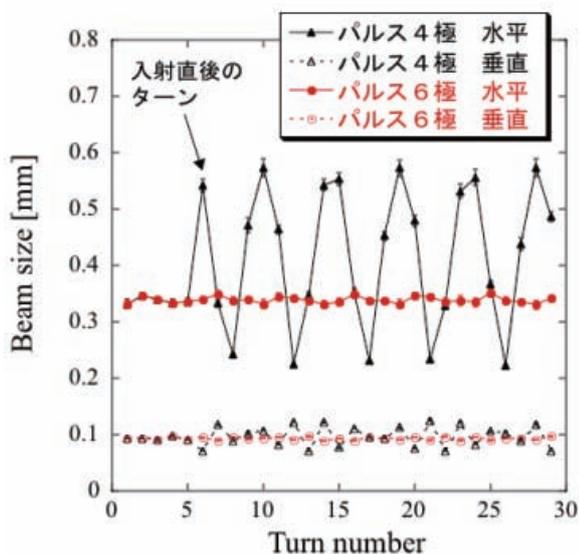


図 11 図 10 で示したビームプロファイルの変動をビームサイズとしてプロットしたもの.

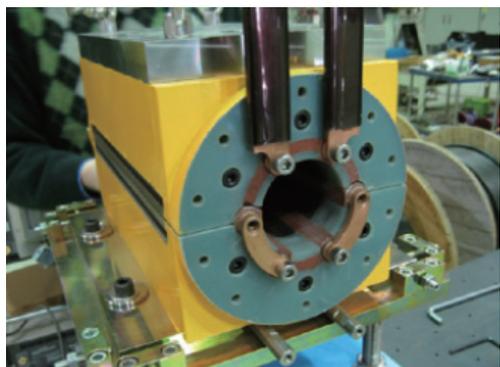


図 12 パルス 6 極の写真.

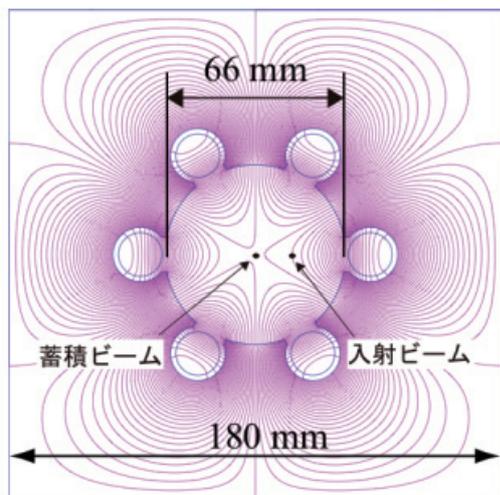


図 13 2次元磁場計算によるパルス 6 極の磁場分布.

図 16 は PF リングに蓄積した電流と入射率 (入射パルス当たりの電荷量×捕獲効率) を示している. 図中の周波数は, その時の入射の繰り返しを示しており, その入射パルス当たりの電流量を入射率として示しているため, 入射率は入射の繰り返しに依存しない値となっている. パルス 6 極を用いたマルチバンチモードの入射実験は, 入射の繰り返し周波数を 5 Hz で始めた. 実験開始時に入射率が大きく変動しているのは, 入射率が大きくなるようにビーム輸送路及びセパタム電磁

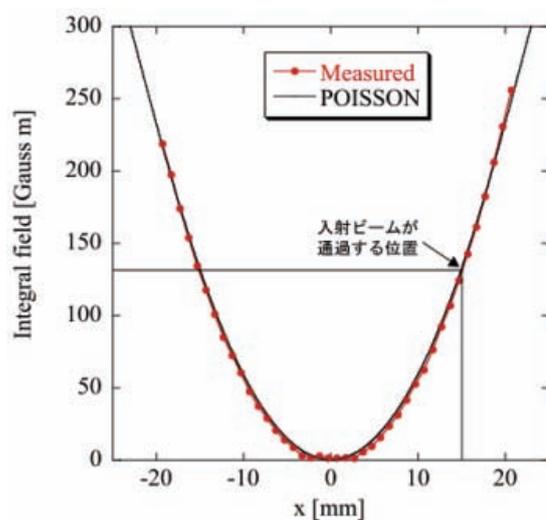


図 14 パルス 6 極の垂直方向の積分磁場の測定結果と 2次元シミュレーションの結果.



図 15 PF リングのアンジュレータ 2 番の長直線部下流に設置したパルス 6 極 (黄色).

石の調整を行ったからである。その後、パルス6極入射のまま入射の繰り返しを12.5 Hzまで上げた。次に、パルス6極入射とキッカー入射での入射率を比較するために、キッカー入射に切り替えた。入射の繰り返しを25 Hzにしたのは時間の短縮のためである。パルス6極入射時の入射率は、キッカー入射時のそれに比べて約6割程度であることが図からわかる。シミュレーションの予想では、キッカー入射による捕獲効率を1とした時にパルス6極入射時の入射率は7割前後であり、若干低めながら良い一致を示した。蓄積電流が400 mAを超えた辺りで再び12.5 Hzのパルス6極入射に切り替え、蓄積電流値が大きいところでもパルス6極入射が可能であることを確認した。入射率は初期の5 Hzに比べると少し落ちてはいるが、蓄積電流値が高い時でもキッカー入射の約6割程度で問題なく入射できた。蓄積電流値がPFリングの通常運転での蓄積電流値である450 mAになったところで12.5 Hzの入射を終了し、その後にパルス6極による450 mAでのトップアップ運転を行った。

次に、パルス6極を使った入射の重要な目的の一つであった入射時の蓄積ビームの振動が抑えられているかどうかを比較するため、キッカー入射とパルス6極入射のそれぞれで入射時の蓄積ビームの振動を測定し比較した。測定方法は、PFリング内にシングルバンチモードで電子ビームを約30 mA蓄積し、入射ビームをオフにした状態でキッカー及びパルス6極を個別に励磁した。キッカー及びパルス6極は、通常の入射時と同じだけの蹴り角で動作させる。蓄積ビームの振動はアンジュレータ16番上流に設置してあるBPMを使って、蓄積されたシングルバンチの重心振動を1周毎に

追いかけて測定した。図17の(a), (b)はキッカー入射時の蓄積ビームの振動である。(a)は水平方向、(b)は垂直方向の振動を表している。横軸はリング周回数である。入射が始まる前の状態からビーム振動を測定しており、150ターン辺りで急激に振動が起きている部分がキッカー及びパルス6極を励磁した瞬間である。励起をする前の振動幅はr.m.s.で水平方向に18  $\mu\text{m}$ 、垂直方向に12  $\mu\text{m}$ であった。キッカーを励起した直後には、水平方向に850  $\mu\text{m}$ 、垂直方向に130  $\mu\text{m}$ の最大振幅を持った振動が起きているのがわかる。なだらかに振幅が減衰しているのは放射減衰(PFリングの横方向の放射減衰時間は7.8 msecであり約12000ターンに相当)と非線形効果による重心運動の減衰によるものである。一方、図(c), (d)はパルス6極を使った入射である。(c)は水平方向、(d)は垂直方向である。入射中の蓄積ビームの振動は入射直後で、水平方向に180  $\mu\text{m}$ 、垂直方向に40  $\mu\text{m}$ の最大振幅を持った振動にまで小さくなっていることがわかる。パルス6極入射によって蓄積ビームの振動をキッカー入射に比べて抑えることができる事を証明できた。しかしながら、入射時の蓄積ビームの振動を完全にゼロに出来た訳ではない。残っている振動の主な原因は製作精度からくる磁場の誤差であることがわかっている。

次に入射時の蓄積ビームのビームプロファイルの変動を測定した<sup>16)</sup>。この測定もシングルバンチモードで行った。シングルバンチの蓄積電流値は10 mAで、パルス6極は励磁するがビームは実際には入射しない。高速ゲートカメラの撮影用ゲート時間は50 nsecとし、PFリングの周回時間624 nsecと比較して十分小さくした。ただし、使用した高速ゲートカメラの最大繰り返し周波数は10 kHzであるため、ビーム位置モニタの

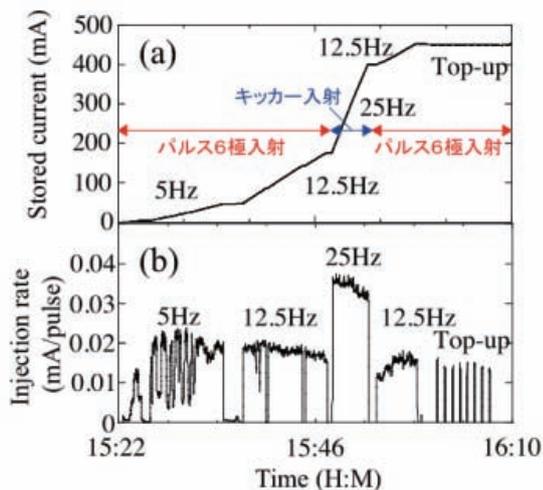


図16 パルス6極入射とキッカー入射による蓄積ビーム電流(上)と入射率(下)の比較。

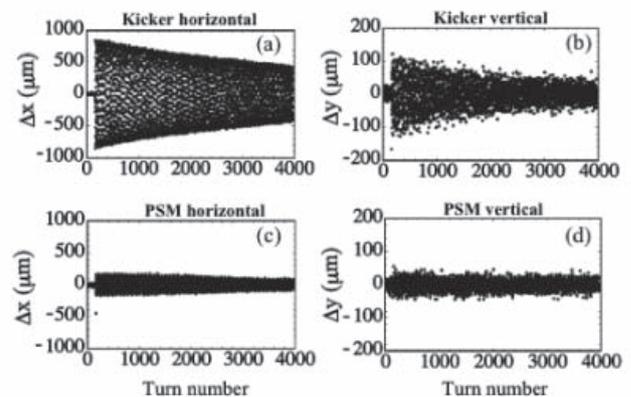


図17 入射時の蓄積ビームの重心振動をアンジュレータ16番の上流に設置したBPMを使ってターン毎に測定したもの。(a), (b)はキッカー入射時、(c), (d)はパルス6極入射時である。

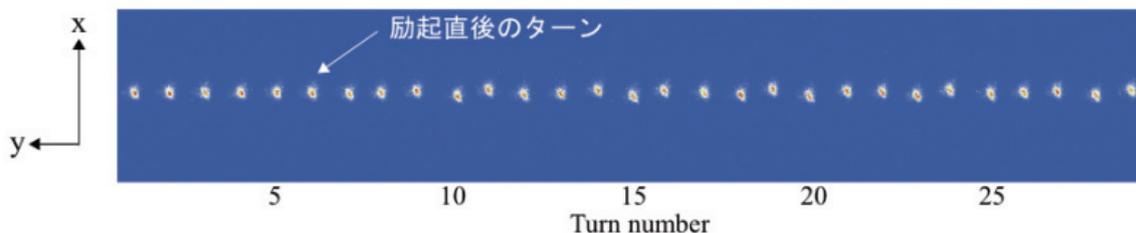


図 18 パルス 6 極入射時の蓄積ビームのプロファイル。

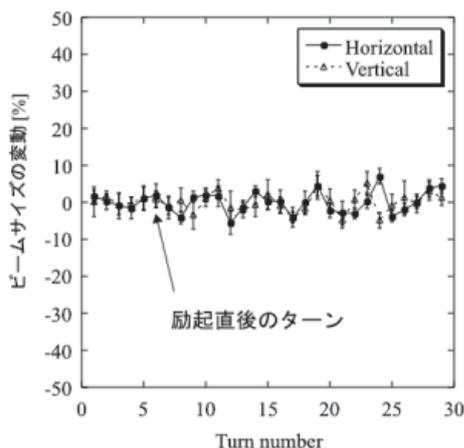


図 19 高速ゲートカメラを用いて測定したパルス 6 極入射におけるビームサイズの変動。

ように同じビームを毎ターン追いつけることはできない。したがって、プロファイルの測定には、入射トリガに対してリング周回分の遅延を加えた撮影用ゲート信号を発生させる方法を使った。蓄積ビームのビームプロファイルはパルス 6 極で蹴る前は平衡状態にあるため、短時間の実験においては同じプロファイルを持っていると仮定できる。したがって、パルス 6 極で蹴った後の蓄積ビームのプロファイルは、入射トリガからのターン数が同じなら同じ形状を再現する。図 18 はこのようにして測定したビームプロファイルをターン毎に並べたものである。パルス 6 極入射では、PF-AR のパルス 4 極入射で見ていたような蓄積ビームのビームプロファイルの変動はほとんど見えず、この結果は、図 10 で示したシミュレーションの結果とも一致している。図 18 で示したパルス 6 極入射のビームプロファイルに対してガウス分布を仮定してビームサイズを求め、励起以前のビームサイズの平均を基準としてそこからの変化率をプロットしたのが図 19 である。パルス 6 極の励起前に比べてプロファイルの変動は見えるがその大きさは  $\pm 10\%$  未満であり、図 11 に示したシミュレーションによる予想と同程度となった。これにより、パルス 6 極入射時の蓄積ビームプロファイルの変動は非常に小さいことが確認できた。

また、実際の放射光ビームラインを使って入射中の放射光の強度測定をした結果、放射光の光量の変動がキッカー入射に比べてパルス 6 極入射では格段に小さくなることを確認した<sup>7)</sup>。

## 5. パルス多極電磁石の今後

以上述べてきたように、パルス多極電磁石を用いた入射システムは、問題なく電子ビームを蓄積することが可能であり、入射時の蓄積ビームの重心振動およびビームプロファイル変動も抑える事ができる事を実験的に証明できた。しかしながら、捕獲効率はまだ十分に高いとは言えず、蓄積ビームの重心振動もさらに小さくすることが望ましい。また、磁極中心の残留磁場をどう補正するべきか等、今後も R&D を続けて行く必要がある。また、最終的な目標はユーザーが使う光が入射時に振動しないことであるため、ユーザー側の光の振動と入射時のビームプロファイルを同時に比較し残存する光量の変動の原因についての理解を深める必要がある。

蓄積ビームの重心振動に関しては、製作誤差に起因して 6 極電磁石の磁極中心付近にわずかに発生する垂直磁場成分が、蓄積ビームを振動させる可能性があることを前節で述べた。将来的には、その微弱なパルス磁場をより精密に測定する方法やその磁場を実際の運転において打ち消す仕組みを開発することも研究課題である。

また入射パラメータの変化に強いパルス多極電磁石を作ることも興味ある課題である。パルス 6 極を用いた入射を位相空間上で見てみると、最初の周回におけるパルス 6 極で蹴る直前の入射ビームは、小さな広がりしか持っていないが、パルス 6 極で蹴った直後には非常に大きな分布に変化する (図 20 参照)。これは、パルス 6 極の蹴り角が、磁場中心からの距離の 2 乗に比例して大きくなる事が原因であり、このまま周回させると、リング内の非線形磁場の影響を受けて蓄積リング内を非常に大きな分布を持ったまま周回し始め、最終的に物理口径の小さい部分に当たってビームが一

部失われる事になる. もちろん, ビーム輸送路とのオプティクスとのマッチングをきちんと取ることは重要であるが, パルス多極入射はキッカー入射に比べてセプタム出口での入射初期位相に敏感であり, このままでは誤差に対して脆弱になる. それを回避する案として, 例えば図 21 に示すような電磁石を考える<sup>17)</sup>. これは, まず 6 極電磁石を作り, 磁石の水平面に近い部分にある磁極の間隔を広げると共に上下の磁極の側まで近づけた形をしている. したがって, 新しい電磁石が作る磁場は図 22 に示すようになり, 中央では 6 極電磁石に似た磁場分布を持つが, 入射ビームが来る  $x = 15$  mm 付近では平坦な磁場分布を持つことになる. 図 22 は  $x = 15$  mm でそれぞれの電磁石が 120 Gauss m の積分磁場を持つように規格化してある. この  $x = 15$  mm 辺りの平坦な磁場分布が非常に重要であり, 図 23 に示すように, この電磁石を使って入射ビームを蹴った場合, 蹴りの前後で入射ビームが広がらないことがわかる. このような磁場を使った入射が実現できれば, 捕獲効率は更に良くなると期待できる. ただし, 図 21 に示す電磁石は, このままの形状では発生するピーク

磁場が非常に弱いため, 長い電磁石を作る必要がありコンパクト性に欠ける. 何かもうひと工夫必要などころである.

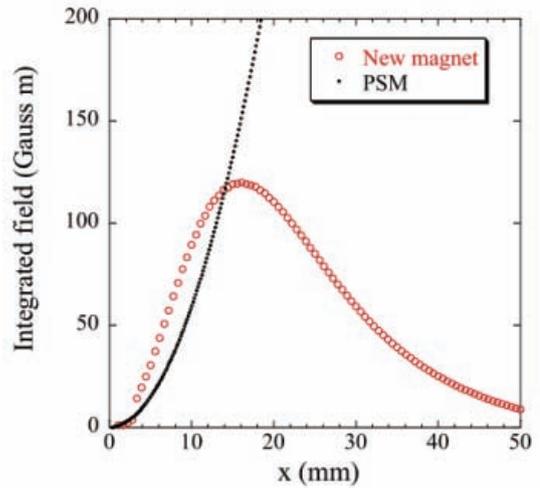


図 22 2 次元計算による水平方向の磁場分布. パルス 6 極 (PSM) が入射ビームの通過する付近 ( $x = 15$ mm) で大きな磁場勾配を持つのにに対し, 新しい電磁石の磁場勾配は緩かになっている. また, 中央付近 ( $x = 0$  mm) では両電磁石とも似たような磁場分布を持つ.

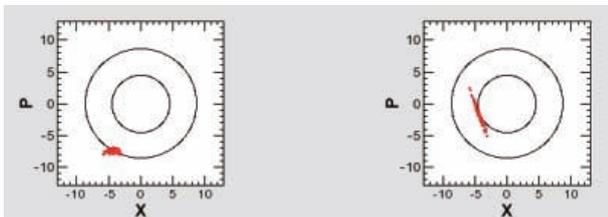


図 20 パルス 6 極で蹴られる直前(左)および直後(右)の入射ビームのプロファイルを規格化位相空間でプロットしたもの.

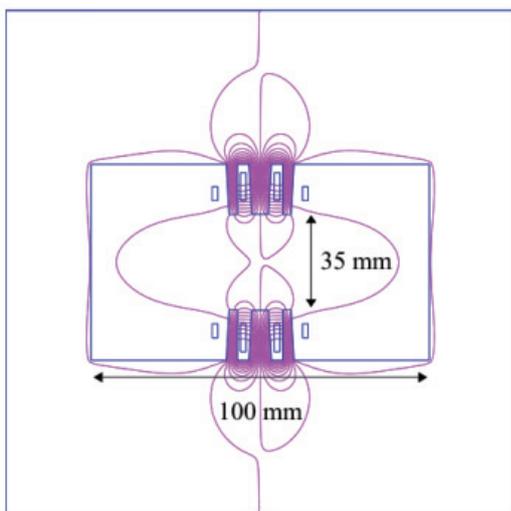


図 21 入射ビームが来る位置での磁場勾配が緩やかになるような多極電磁石の断面図.

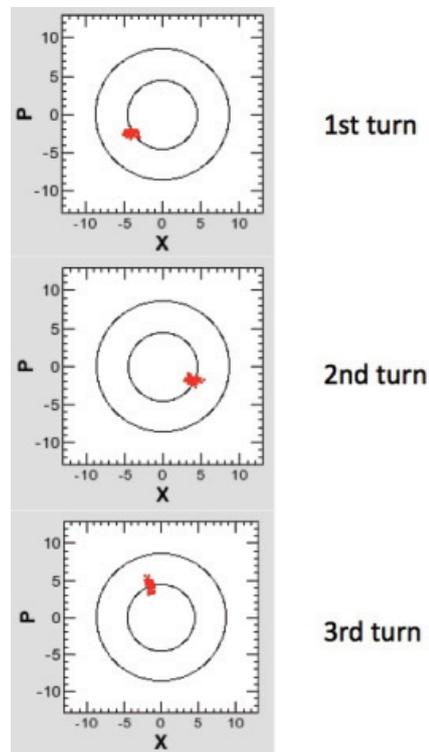


図 23 入射ビームに対して磁場の傾きが緩やかなパルス多極電磁石で入射した場合の入射ビームの振る舞い. 1 ターン目にパルス多極電磁石によって入射ビームは蹴られている. 図 20 と比べて入射ビームの位相空間上の広がりが小さくなっている.

## 6. おわりに

放射光源用蓄積リングのトップアップ運転を行うにあたり、パルス多極電磁石を使った入射は低コストかつ省スペースという点で非常に良い入射システムの候補だと言える。ただ、キッカー入射に比べて6割程度であるパルス6極入射の入射効率は更に高くする必要があり、蓄積ビームの振動ももっと小さくなることが望ましい。長期安定性については、2010年秋よりユーザー運転に使用中（東日本大震災の影響で途中使用しない時期もあったが現在は再び使用中）であり、実績を積み上げている最中である。パルス多極電磁石入射はまだ始まったばかりであり、これからも研究開発を継続して行くつもりである。今後多くの施設がこの入射システムを検討し採用することで発展が加速していくと期待している。

本研究の一部は科研費(18540304)の助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) H. Ohkuma, "Top-up operation in light sources," in Proceedings of the 11th European Particle Accelerator Conference, Genoa, 2008, p. 36.
- 2) W. Namkung, "REVIEW OF THIRD GENERATION LIGHT SOURCES," in Proceedings of the International Particle Accelerator Conference, Kyoto, 2010, p. 2411.
- 3) S. Nakamura et al., in Proceedings of the 2nd European Particle Accelerator Conference, Nice, 1990, p. 472.
- 4) L. Emery, M. Borland, "Top-Up Operation Experience at APS," in Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York, 1999, p. 200.
- 5) Y. Kobayashi and K. Harada, in Proceedings of the 10th European Particle Accelerator Conference, Edinburgh, Scotland, 2006 (EPS-AG, Edinburgh, Scotland, 2006), p. 3526.
- 6) K. Harada, Y. Kobayashi, T. Miyajima, and S. Nagahashi, Phys. Rev. ST Accel. Beams 10, 123501 (2007).
- 7) H. Takaki, N. Nakamura, Y. Kobayashi, K. Harada, T. Miyajima, A. Ueda, S. Nagahashi, M. Shimada, T. Obina, T. Honda, Phys. Rev. ST Accel. Beams 13, 020705 (2010).
- 8) T. Atkinson, et al., "DEVELOPMENT OF A NON-LINEAR KICKER SYSTEM TO FACILITATE A NEW INJECTION SCHEME FOR THE BESSY II STORAGE RING," in Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, 2011, p. 3394.
- 9) S.C. Leemann, et al., "PULSED MULTIPOLE INJECTION FOR THE MAX IV STORAGE RINGS," in Proceedings of 2011 Particle Accelerator Conference, New York, p. 2522.
- 10) X.R. Resende, et al., "STUDY OF A PULSED SEXTUPOLE MAGNET INJECTION SYSTEM FOR LNLs," in Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, 2011, p. 3212.
- 11) M. Adachi, et al., "STATUS OF UVSOR-II," in Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2011.
- 12) N. Yamamoto, et al., "ACCELERATORS OF THE CENTRAL JAPAN SYNCHROTRON RADIATION FACILITY PROJECT (II)," in Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, 2011, p. 2987.
- 13) P. Kuske et al., "PREPARATIONS OF BESSY FOR TOP-UP OPERATION," in Proceedings of the 11th European Particle Accelerator Conference, Genoa, 2008, p. 2067.
- 14) H. Tanaka, T. Ohshima, K. Soutome, and M. Takao, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 539, 547 (2005).
- 15) C. Mitsuda et al., "SUPPRESSION OF HORIZONTAL BEAM OSCILLATION BY FAST KICKER MAGNET SYSTEM IN SPRING-8 STORAGE RING," in Proceedings of the International Particle Accelerator Conference, Kyoto, 2010, p. 2552.
- 16) R. Takai, T. Obina, A. Ueda, S. Nagahashi, K. Harada, T. Honda, N. Nakamura, Y. Kobayashi, H. Takaki, "BEAM PROFILE MEASUREMENT DURING TOP-UP INJECTION WITH A PULSED SEXTUPOLE MAGNET," in Proceedings of the DIPAC2011, Hamburg, p. 305.
- 17) R. P. Filler III, D. private communication.