

## 解 説

## パルス4極電磁石を用いた新しい入射システム

原田健太郎<sup>\*1</sup>・小林 幸則<sup>\*2</sup>

## New injection system using a single pulsed quadrupole magnet

Kentaro HARADA<sup>\*1</sup> and Yukinori KOBAYASHI<sup>\*2</sup>

## 1. 導入—通常の入射システム

一般に、大型の電子蓄積リングのビーム入射システムは、セプタム電磁石とキッカー電磁石とを組み合わせたものである。キッカーとセプタムには、ともにパルス偏向電磁石が使用される。入射ビームは蓄積ビームの軌道に対してある大きな角度（例えば 100 mrad）を持った入射路を通してリングに近づいてくるが、入射点（直前）でそれを蓄積ビームの軌道とほぼ平行に揃えてやるのがセプタム電磁石である。（入射点のオプティクスによっては完全に平行でない方が最適である場合もある。）セプタムとは磁場遮蔽のための仕切り板のことで、隣り合って走る入射ビームと蓄積ビームとの間に置かれる。入射ビームの側で磁場をパルスの励磁すると、セプタム板の上で渦電流が発生し、磁場が遮蔽される。蓄積ビーム側に磁場が漏れ出さないで、セプタム電磁石では入射ビームだけを選択的に蹴ることができる。さて、セプタム電磁石の出口で蓄積ビームとほぼ平行になった入射ビームは、リングに入ると蓄積ビームの設計軌道の周りをベータatron振動し始める。セプタム電磁石だけしか励磁しなかった場合、入射ビームのベータatron振動の初期振幅は、設計軌道からセプタム板の外側までの距離となる。よって、仮に入射点以外の部分でリングのダクトに十分な広さがあったとしても、周回してきた入射ビームはセプタムまで戻ってきた時に内側からセプタム板に衝突し、失われる。（ベータatron振動数によっては1周目では失われないかも知れないが、数ターンの内に必ずセプタム部分が振動の山になり、失われる。）そこで、入射ビームを蓄積する為に入射ビ-

ームの初期振幅を実効的に減らす目的で使われるのがキッカー電磁石である。キッカー電磁石は、蓄積ビームの軌道を、入射点で入射の周回だけセプタム板に近づける。蓄積ビームの軌道は入射ビームのベータatron振動の中心軌道なので、それを局所パルスポンプによって入射ビームの軌道に近づけてやることは、入射ビームのベータatron振動の初期振幅を減らすことを意味する。キッカー電磁石を使うと、入射ビームはリングに入った後ベータatron振動中にどこにも衝突せずにリングを回り続け、放射減衰によって徐々に振幅が減り、やがて蓄積ビームと一体になって蓄積される。ただし、一時的かつ局所的に移動した蓄積ビームの軌道が、誤差や非線形性などの影響で入射点の下流で正しく元に戻せなかった場合、蓄積ビームも入射ビーム同様に中心（設計）軌道のまわりをベータatron振動することになる。現行の入射システムにおいてこの様な入射中の蓄積ビームの振動は大きな問題となっている。ここで解説を行うパルス4極電磁石を用いた入射システムは、その問題を簡単で安価に解消する為に考案されたものである。

## 2. パルス4極電磁石の利点

キッカー電磁石を使った現行の入射システムで入射中に蓄積ビームの振動が生じる原因は、主に複数台（一般的に4台）用いられるキッカー電磁石の励磁タイミングや磁場強度の誤差である。高精度のパルス電磁石を製造・制御することは単体でも難しいが、それを複数台用いてシステムを組み上げる為には、さらに多くの苦勞と時間を要する。また、マルチバンチで運転されているリングの場合、キッカー電磁石間に6

<sup>\*1</sup> 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電磁石・軌道グループ KEK-PF-Mag  
kentaro.harada@kek.jp

<sup>\*2</sup> 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電磁石・軌道グループ KEK-PF-Mag  
yukinori.kobayashi@kek.jp

極電磁石の様な非線形要素が存在すると、キッカー電磁石の磁場励磁中や減衰中に通過するバンチに対しては原理的にバンパが閉じないこともある。そこで、複数台のキッカー電磁石の代わりに1台のパルス4極電磁石を用いる新しい入射システムを考案した。パルス4極電磁石を用いた入射システムの場合、蓄積ビームの局所バンパは必要ないので、入射中の蓄積ビームの重心振動は全てのバンチに対して簡単に回避することが可能である。セプタム以外に入射に必要な電磁石は1台だけであるので、製造や制御も簡単に安価になると期待される。

4極電磁石は磁極中心で磁場がゼロとなる特徴があり、従って磁極中心を通る蓄積ビームは蹴られない。一方、中心から外れたところを通る入射ビームは、軸からの距離に比例した磁場を感じ、運動量のキックを与えられる。すなわち、パルス4極電磁石を使えば蓄積ビームの軌道を変化させずに入射ビームの傾きだけを小さくすることができるはずである。ただし、蓄積ビームは広がりをもっているので、1台のパルス4極電磁石しか導入しない場合、重心振動は回避できても4極振動は励起されてしまう。すなわち、ビームのプロファイルが周回ごとに変化し、「瞬き」をするようになる。このビームの「瞬き」を打ち消す為には、システムは若干複雑になるがもう1台のパルス4極電磁石を入射点上流に設置するなどの工夫が必要であろう。

キッカー電磁石の場合は必ず入射点を挿んで配置する必要があるが、パルス4極電磁石の場合、入射点から電磁石設置場所まで入射ビームをロスしない十分なアパーチャが確保されてさえいれば、入射ビームがある一定以上の傾き（横方向運動量）持っている場所ならどこでも置くことができる。パルス4極電磁石は場所的に既存の入射システムと全く干渉せず、両者を同時に設置することが可能である。既存のリングでの原理実証のためのマシンスタディにはそれが非常に好都合で、ユーザー運転を止めることなく実行することが可能となった。

### 3. パルス4極電磁石を用いた入射の原理

入射ビームのベータトロン振動が線形と見なしてよい場合、ベータトロン関数で規格化された水平方向座標と、ベータトロン位相で規格化された軌道長を用いると、ビームの振動は正弦振動として書くことができる。その様な記述を行った時、まずはセプタム電磁石だけを励磁した場合における入射ビームのベータトロン振動の様子を図1-(a)に、キッカー電磁石を併用し

た通常の入射の場合についての同様の様子を図1-(b)に示す。図1-(a)では周回後にセプタム板に当たってビームが失われてしまうが、(b)では入射ビームの振幅が十分に小さいため、ビームは放射減衰するまで振動を続け、そのまま蓄積される。ところで、今回マシンスタディを行ったPF-AR<sup>1)</sup>では通常の入射にキッカージャンプが導入されており、その場合を図1-(c)に示しておく。キッカージャンプを用いた方法とは、蓄積ビームに対する局所バンパを故意に閉じさせず、蓄積ビームの振動を発生させる代わりに、入射ビームの振動をより小さくする方法である。PF-ARではAPS加速空洞<sup>2)</sup>においてビーム入射中の航跡場の影響が問題となる<sup>3)</sup>為、振動の振幅を非常に小さく抑えることが必要とされている。

次に、入射ビームの振動に対する4極電磁石の働きについて概略を述べる。4極電磁石はビームの位置は変えずに傾き（運動量）を減らすため、入射点を含め入射ビームの傾きがゼロの場所に置くことは不适当である。そこで、入射ビームがある傾きを持っている場所にパルス4極電磁石を設置するが、その場所でベータトロン振動の大きさを最も小さくする為には、入射ビームの傾きをゼロにすればよい。そうすると、入射ビームはその場所の振幅を初期振幅（＝振動中の最大振幅）として、ベータトロン振動を始めたのと等価になる。この場合を図1-(d)に示す。入射ビームが蓄積される為には、その振動の（最大）振幅をセプタム板や挿入光源などで決まる物理口径よりも小さく抑える必要がある。入射ビームがその口径よりも外側にいる場所に4極電磁石を設置してもそれは不可能であり、また、入射ビームがちょうど口径上にいる場合はその傾きを完全にゼロにする必要がある。

さて、入射ビームが物理口径の内側にいる場所にパルス4極電磁石を設置した場合、入射ビームの傾きは完全にゼロにする必要はなく、振動が物理口径に収まる程度にまで減らせば十分である。その様な場合を図1-(e)に示す。入射ビームの振動の方向を変えずに傾きを減らし、入射ビームを物理口径いっぱい振動させた場合が、その場所での4極の強さとして最小であり、最適な解である。なお、必要な磁場よりも強い磁場が得られる場合、入射ビームの傾きをさらに減らすことができれば振動の大きさをより小さくできる。ただし、入射ビームの傾きがゼロになった時が振動の大きさとしては最小値であり、それよりも強く蹴ると、向きが逆向きの振動を励起させることになる。かまわずに蹴り角を増やしていくと、蹴り角がある値になった時にそれが物理口径を超える。その場合を図

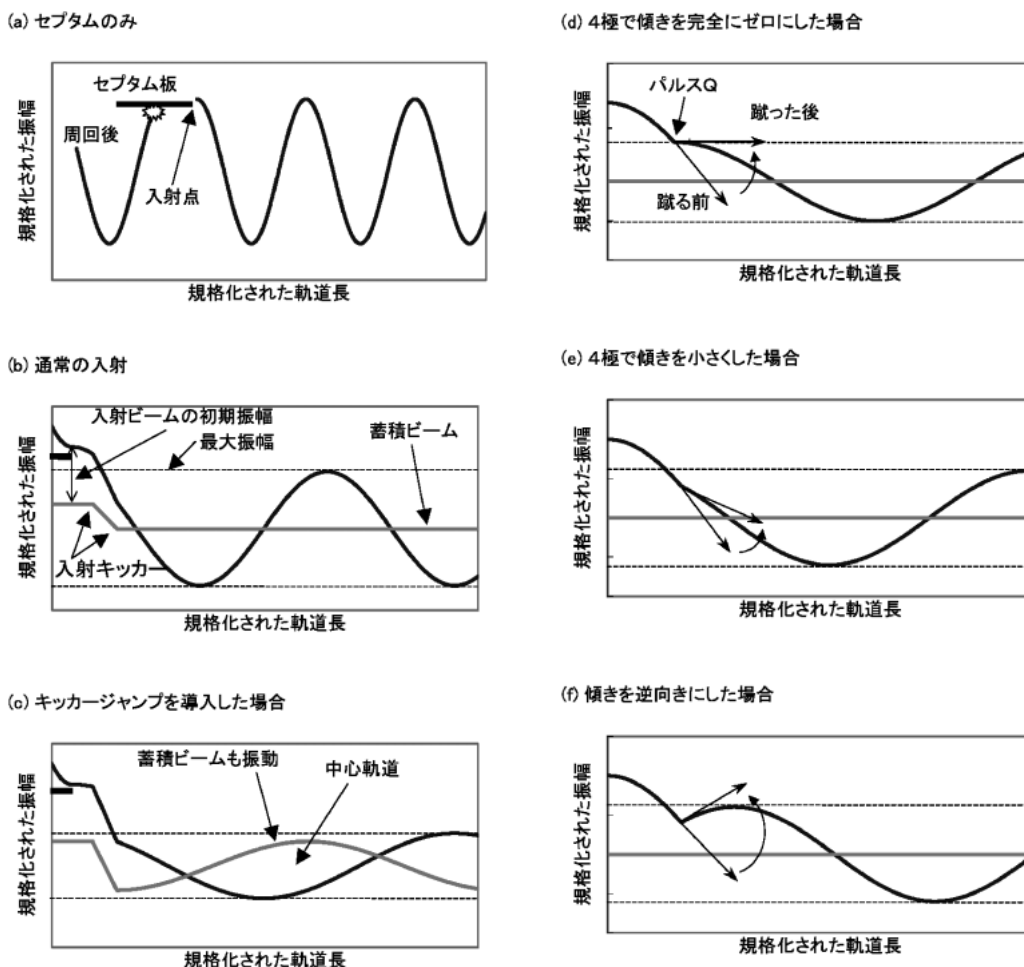


図1 規格化した座標を使って正弦的に記述した入射ビームと蓄積ビームの振動。(あくまで説明用の模式図であり、図中の局所バンプ軌道や入射路の軌道は規格化座標で正しく描かれていない。) (a)はセプトム電磁石だけを励磁した場合、(b)は通常の入射スキームで、セプトム及びキッカー電磁石を併用した場合、(c)はキッカージャンプを導入した場合で、PF-AR で実際に行われている。(c)では蓄積ビームの振動が励起される代わりに、入射ビームの振動の大きさが小さくなっている。(d)はある場所にパルス4極電磁石を設置した時に運動量をゼロにした場合であり、その場所で得られる最小の入射エミッタンスとなる。運動量は規格化された正準共役運動量であり、 $\alpha \neq 0$  の場合は実座標でのビームの発散角とは異なる。(e)は目標とする口径が決められている時、その口径に納まる様に4極電磁石を用いた場合。運動量を完全にゼロにせず、必要なだけ減少させる。この場合が実際のスキームに対応する。(f)は(e)と同様の口径に納まる様に傾きを変えるが、振動の方向を逆転させてしまう場合。

1-(f)に示す。(e)と(f)では入射ビームの傾きは、向きが逆で大きさが等しい。

入射ビームの振幅が小さい場所にパルス4極電磁石を設置した方が、振動の大きさの到達可能な最小値もどんどん小さくなってゆく。ただし、4極電磁石では磁場の強さは振幅に比例して大きくなる為、振幅の小さい場所で入射ビームを蹴るには、それなりに大きな磁場勾配が必要となる。すなわち、入射ビームが中心軌道を横切る点では、どんなに磁場勾配を大きくしても蹴ることはできない。従って、現実的な磁場勾配で十分な蹴り角が得られる程度の振幅を入射ビームが

持ちつつ、その振幅が入射口径よりも十分に小さい、という条件を満たす場所がパルス4極電磁石の位置として最適となる。

#### 4. 数学的な定式化

実際に入射に必要なパルス4極電磁石の最適な強さとリングにおける最適な設置場所とを求めるために、前項で述べた内容を数学的に定式化する。入射ビームの振動を線形だと仮定すると(現実には入射ビームは大振幅の振動をするので非線形効果は無視することはできないが、原理的な理解を得る上での本質

は失われまいと考えている), 振動の大きさは, Courant-Snyder 不変量を用いて記述でき, 以下のよう  
に表される.

$$\varepsilon_{inj} = \frac{1}{\beta_{inj}} (x_{inj}^2 + (\alpha_{inj}x_{inj} + \beta_{inj}x'_{inj})^2) = X_{inj}^2 + P_{inj}^2$$

ここで,  $\alpha_{inj}, \beta_{inj}$  は入射点の Twiss パラメータ,  $x_{inj}, x'_{inj}$  は入射点での入射ビームの振幅と傾きである.  
(入射点で  $\alpha_{inj}=0$  の場合, セプトム電磁石で  $x'_{inj}=0$  とすると  $\varepsilon_{inj}$  が最小である.)  $X, P$  は規格化された位相空間における入射ビームの座標であり,

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

である. 前項でビームの傾き (運動量) と表現したのはこの位相空間の運動量である. 入射ビームを蓄積するためには, パルス4極電磁石を用いて入射エミッタンスを初期値  $\varepsilon_{inj}$  から, 物理口径で決まる値  $\varepsilon_{apert}$  よりも十分に小さな値まで減らすことができればよい.

次に, パルス4極電磁石をある場所に置いたとして, 入射エミッタンスを  $\varepsilon_f$  にするために必要な蹴り角  $k$  を求めることにする. 目標は,  $\varepsilon_f < \varepsilon_{apert}$  である. 4極電磁石によるベータatron振動の変化は, 薄肉近似での転送行列を用いて

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -k & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix}$$

と書ける. ここで,

$$-k = \frac{B'L}{B\rho} [\text{m}^{-1}]$$

は積分磁場勾配である. 従って, 入射エミッタンスの変化は,

$$\Delta = \varepsilon_{after}(x_1, x'_1) - \varepsilon_{before}(x_0, x'_0) = \beta^2 X_0^2 k^2 - 2\beta P_0 X_0 k$$

となる. ここで, この式を  $k$  について整理すると,

$$\Delta = \beta^2 X_0^2 k^2 - 2\beta P_0 X_0 k = \beta^2 X_0^2 \left( k - \frac{P_0}{\beta X_0} \right)^2 - P_0^2$$

となり,

$$k_{\min} = \frac{P_0}{\beta X_0}$$

の場合に,  $\Delta$  は最小値  $-P_0^2$  をとることがわかる. これは位相空間内で入射ビームが傾きゼロとなることに

相当し, 対応する入射エミッタンスは, その場所に4極電磁石を置いた時に到達可能な最小値  $\varepsilon_{\min} = X^2$  となる.

入射ビームの広がりなどを考慮すると, 入射ビームを蓄積するためには, 4極で蹴った後の入射エミッタンスを物理口径で決まるエミッタンスよりも余裕を持って小さくする必要がある. 目標とする入射エミッタンスは  $\varepsilon_f < \varepsilon_{apert}$  とならなくてはならない. 入射エミッタンスの変化 (減少) 量  $\Delta = \varepsilon_f - \varepsilon_{inj}$  に対し, 必要な蹴り角  $k$  は,

$$k_{\pm} = \frac{1}{\beta X_0} (P_0 \pm \sqrt{P_0^2 + \Delta})$$

と書ける. パルス4極電磁石を置いた場所で入射ビームの振幅がそもそも目標とする口径の外側にある場合, すなわち  $P_0 < \Delta^2$  の場合, 実数解は存在せず, 目標とする入射エミッタンスに到達することはできない. 実数解が得られる場合に符号の違う2種類の解は, 入射ビームの振動の方向は保ったまま傾きを減らす場合 (最適解) と, 逆向きな振動を励起してしまう場合とに相当する. なお, パルス4極電磁石の場所で入射ビームがちょうど目標とする口径上に存在する場合, 入射の為にはその場所で到達可能な最小エミッタ

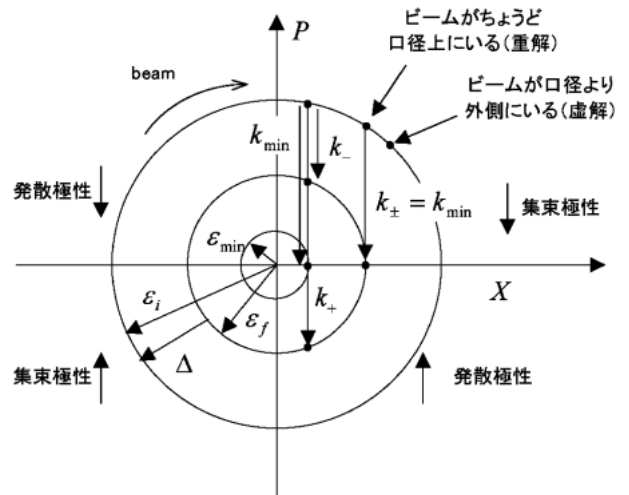


図2 位相空間における初期入射エミッタンス, 目標とするエミッタンス, 及びパルス4極電磁石の蹴り角 (積分磁場勾配) の関係. エミッタンスは円の面積であるが, ここでは分かりやすくする為に半径として表示した. また, 図中では  $k$  値も規格化された値となるが, 便宜上そのまま表示した. PF-AR の場合,  $\varepsilon_i = 131 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,  $\varepsilon_f = 37 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,  $\Delta = -94 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ , 実座標で  $x = 14.7 \text{ mm}$  で集束極性, 電磁石長  $30 \text{ cm}$  の場合,  $k_- = 3 \text{ T/m}$ ,  $k_{\min} = 5.7 \text{ T/m}$ ,  $\varepsilon_{\min} = 13 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  である.

タンス  $\epsilon_{\min}$  を得る必要があり、その場合が重解となる。これらの関係を位相空間内でまとめた図を図2に示す。

### 5. PF-AR におけるパルス4極電磁石設置場所の選択

PF-AR では通常の入射の際にはキッカージャンプが導入されている。入射ビームの振動の振幅、すなわち入射エミッタンスを設計値よりも小さくする必要があるのは、入射時に蓄積ビームの重心振動がどうしても励起されてしまい、その結果として生じる航跡場が大振幅の入射ビームに対して悪影響を及ぼすからと考えられている。PF-AR では現在、キッカージャンプで蓄積ビームを積極的に振動させ、その振動をフィードバックシステムで抑えながら入射を行っている。入射時の航跡場の影響に関しては複雑でまだ十分に解明されていないことが多いが、キッカージャンプとフィードバックなしではほとんど入射は不可能である。

パルス4極電磁石を用いた入射システムの場合、理想的には重心振動が励起されないで、航跡場の効果は非常に小さくなることを期待される。そこで、目標とする入射エミッタンスはキッカージャンプなしの設計値とする。PF-AR の入射点における光学パラメータは、 $\alpha = -2.9, \beta = 18.3 \text{ m}$  であり、セプタム出口の入射ビームの座標は  $x = 48 \text{ mm}, x' = 7 \text{ mrad}$  である。従って、初期入射エミッタンスは  $\epsilon_i = 131 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  となる。キッカー電磁石によるバンプで、蓄積ビームの軌道は入射点で  $x = 22 \text{ mm}, x' = 2.8 \text{ mrad}$  を通る。これにより、入射エミッタンスは  $\epsilon_f = 37.3 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  まで減少する(表1)。このエミッタンスを目標値とする。

実際の幾何学はさておき、入射点の下流に長さ30 cm のパルス4極電磁石を置いた場合にそれぞれの場所で到達可能な最小エミッタンス  $\epsilon_{\min}$ 、その場合に必要な積分磁場勾配  $k_{\min}$ 、目標とするエミッタンスに到達

することのできる場合は、それに必要な  $k$  ( $k_{\pm}$  の内で最適な方) を図3に示す。長さを30 cm としたのは、リングへの設置の際やインダクタンスを考えた時に、その程度の長さが適当と判断したことによる。実際の入射ビームの軌道を、図4に示す。

図4で、リング外側(座標は正)の入射路から入射

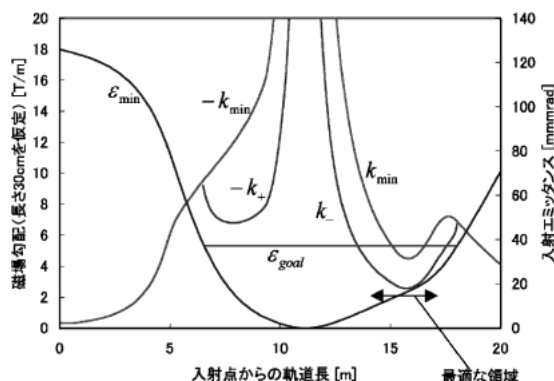


図3 PF-AR の入射点下流にパルス4極電磁石を設置した場合、目標とするエミッタンスに到達する為に各場所において必要となる積分磁場勾配と、その場所で運動量をゼロにした時に得られる最小エミッタンス。分かりやすく図に納める為、発散極性の蹴り角は反転して表示してある。入射ビームは入射点下流のおよそ6 m 付近で入射口径の内側に入るが、その領域では発散極性で積分磁場勾配が最低7 T/m 程度必要である。入射ビームは12 m 付近で中心軸を横切り、そこから必要とされるパルス4極の極性が逆転し、集束となる。この領域で必要とされる積分磁場勾配は最低3 T/m 程度に抑えられており、入射点から15 m から17 m 付近が設置場所として最適領域であることが分かる。

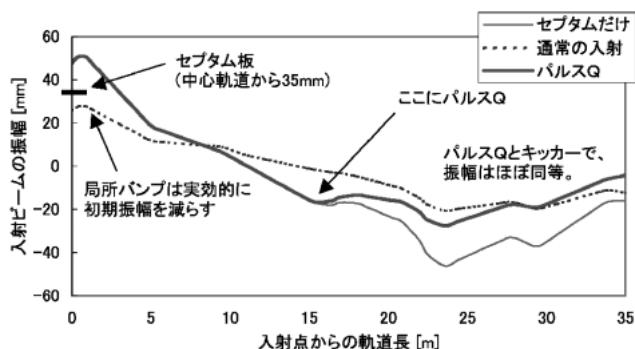


図4 実際のビーム振動の様子。集束極性のパルス4極電磁石が入射点から15 m 下流に設置され、振幅負の方向に運動する入射ビームを中心軸(正の方向)に向けて1.3 mrad 蹴る。パルス4極で蹴られた後のビーム振動の振幅は、通常の入射の設計値とはほぼ等しくなる。

表1 キッカーによる通常の入射システムにおける入射エミッタンスの変化

	入射点 (セプタムのみ)	局所 パルスバンプ	バンプを 入れた値
$\alpha$	-2.9		-2.9
$\beta$ [m]	18.3		18.3
$x$ [mm]	48.0	-22.0	26.0
$x'$ [mrad]	7.6	-3.4	4.2
$\epsilon_{inj}$ [mm·mrad]	125.9		37.1

されたビームは、セプタムを出て（ちょっと進むと）リング内側に向かって振動を始める．入射ビームが中心軌道に向けて運動している場合，入射エミッタンスを効果的に減らす為にはそれを中心軌道と逆向き（リング外側）に蹴るのがよい．従って，この場所では発散極性のパルス4極電磁石が最適となる．入射ビームの振幅は，入射点から離れるに従って徐々に小さくなり，一方で傾き（内向き運動量）は大きくなってゆく．入射ビームの振幅がベータ関数で規格化した物理口径（もしくは目標口径）よりも小さくなった場所から，入射のためのパルス4極電磁石を設置することができるようになる．入射ビームの振幅が小さくなり過ぎると，必要な入射エミッタンスを得るための磁場勾配はどんどん大きくなってゆき，入射ビームが中心軌道を横切るところで値は発散する．また，磁場勾配に制限を設けない場合に到達可能な最小入射エミッタンスの値は，入射ビームの振幅が小さくなるに従ってどんどん小さくなってゆく．入射ビームが中心軸を横切ると，入射ビームの傾きは中心軌道から離れる方向になるため，その傾きを小さくする為には，集束極性のパルス4極電磁石を用いることになる．PF-AR においては図3から明らかなように，入射ビームが一端中心軌道を横切った後で，集束極性のパルス4極電磁石を用いた方が必要な入射エミッタンスを得るための磁場勾配が小さくできる．図3で磁場勾配が最も小さく抑えられている範囲は，実際のラティスでは南衝突点脇の4極電磁石 QC2SE 付近である．今回は都合よく，その QC2SE 上流にパルス4極電磁石を設置可能な直線部が存在したため，そこを選択することができた（図5）．

実際にパルス4極電磁石を設置した場所では，入射ビームの振幅は  $x=14.7\text{ mm}$  となり，目標の入射エミッタンスを得るのに必要な積分磁場勾配は  $0.9\text{ T}$ （長さ  $30\text{ cm}$  で  $3\text{ T/m}$ ）と見積もられ，したがってパルス4極電磁石は入射ビームを  $\Delta\theta=1.3\text{ mrad}$  蹴ることになる（表2）．ちなみにこの場所で到達可能な最小入射エミッタンスは  $\epsilon_{\min}=12.9\text{ mm}\cdot\text{mrad}$  であり，その時の磁場勾配は  $k_{\min}=5.6\text{ T/m}$  である<sup>4)</sup>．

表2 パルス4極電磁石による入射エミッタンスの変化

	パルス Q を入れた点 (蹴る前)	パルス Q による蹴り	蹴った後の値
$\alpha$	-1.7		-1.7
$\beta$ [m]	17.9		17.9
$x$ [mm]	-14.7		-14.7
$x'$ [mrad]	-3.9	1.3	-2.6
$\epsilon_{inj}$ [mm·mrad]	124.3		36.8

## 6. パルス4極電磁石の設計と製作

この節では，必要な積分磁場勾配  $0.9\text{ T}$  を得るための電磁石の具体的な設計と製作について述べる<sup>5)</sup>．PF-AR におけるビームの周回時間は  $1.2\text{ }\mu\text{sec}$  であり，入射ビームが入射点まで戻ってくる間にパルス磁場を減衰させる為には，半サイン波形のパルスとしてパルス幅を  $T=2.4\text{ }\mu\text{sec}$  以内に抑える必要がある．必要なパルス幅と積分磁場勾配とが与えられると，設計目標は磁場を出すために必要な電流値とインダクタンスを如何に小さく抑えるかということになる．

電流値を小さく抑えるためには，電磁石のアパーチャをできるだけ小さくすればよい．PF-AR の最小物理口径は北直線部に設置されているの挿入光源 NE1 の真空ダクトであるが，その物理口径をベータatron関数で規格化すると，パルス4極設置場所で現状の物理口径を縮めない最小の口径は  $23\text{ mm}$  となる．セラミックダクトの厚さを  $5\text{ mm}$  とし，クリアランスを片側  $1.5\text{ mm}$  とした結果，電磁石の内径は  $36\text{ mm}$  と見積もられた．磁場の強さや飽和などの計算を含め，断面形状の最適化は2次元静磁場計算コード POISSON<sup>6)</sup>を用いて行った（図6）．最終的に，電磁石の長さを  $30\text{ cm}$  とした場合，インダクタンスはおよそ  $3\text{ }\mu\text{H}$ ，磁場勾配  $3\text{ T/m}$  を得る為に必要な電流値は  $2000\text{ A}$  となった．パラメータを表3にまとめる．電磁石は，珪素鋼板の積層で製作することにしたが，予算の関係で珪素鋼板の厚さは  $0.15\text{ mm}$  のものを用

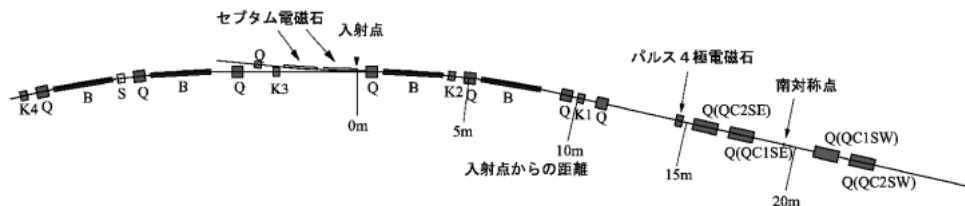


図5 パルス4極を設置した場所．

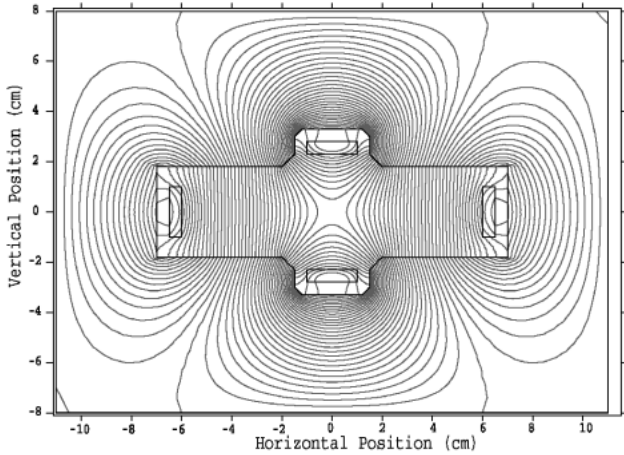


図6 パルス4極電磁石の断面形状及びPOISSONで計算した磁力線。電磁石鉄心は0.15 μm厚の珪素鋼板の積層構造であり、上下2分割，中央で分割可能となっている。この断面の下半分(=上半分)の大きさの型を使った打ち抜き加工で製造した。磁力線が最も密集しているところでも、珪素鋼板の飽和磁場(約2 T)以下になっている。

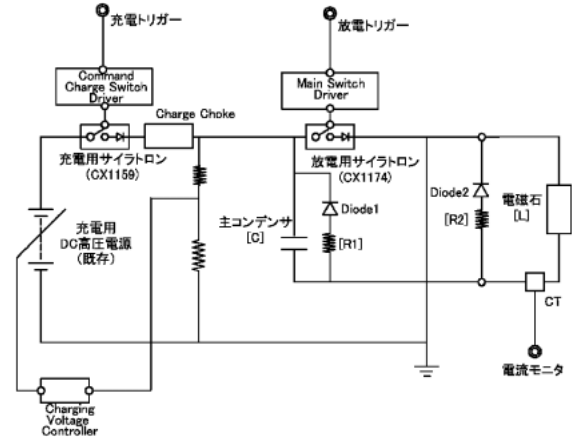


図7 電源のブロック図。サイラトロン2本の内、放電用サイラトロンはPFリング旧入射キッカーの為の予備品を使わせて頂き、また、充電電源は1982年に別目的で製造されたものを流用した。電流の絶対値に関しては精度が要求されない為、De-Q回路は必要ない。

表3 パルス4極電磁石のパラメータ

長さ [mm]	300
垂直ボア [mm]	36
水平ボア [mm]	102
コイル巻き数 [ターン]	1
電源定格充電電圧 [kV]	20
定格(最大)磁場勾配 [T/m]	3(6)
定格(最大)電流 [A]	2000(4000)
パルス幅 [μsec]	2.4
インダクタンス(測定値) [μH]	1.8
珪素鋼板の厚さ [mm]	0.15

いることになった。

## 7. パルス電源の製作

電磁石のインダクタンスが計算による見積もりで3 μH、ケーブルのインダクタンスを1 μHと仮定すると、負荷としてのインダクタンス(L)は4 μHとなる。電源の概念図を図7に示す。電源はまず主キャパシタと負荷からなるLC回路として働き、電流は電磁石を通った後、順電圧となったダイオードを通り、抵抗Rで消費される。従って、必要な主コンデンサ容量(C)は

$$C = \frac{T^2 L}{4\pi^2} = 0.12 \mu\text{F},$$

となり、また電流2000 Aの時の電源充電電圧(V)は

$$V = \frac{TI}{4\pi^2 C} = 20 \text{ kV}$$

となる。今回のマシンスタディにおいては、充電電源については既存の電源を利用し、バルサー部にのみ新しく製作した。

## 8. セラミックダクトの製作

セラミックダクトの厚さは5 mm、内面には発熱防止のためのTi-Moコーティングがされており、厚さは約3 μmである。セラミック部分の長さは32 cmで、両脇にはステンレス製の形状変換ダクトが溶接されている。ビームによる発熱を見積もった結果、コーティングの厚さや形状変換の長さの問題がないことが確認された。製作したダクトの写真を図8に示す。

## 9. 磁場測定

パルス4極電磁石本体、架台及び電源バルサー部、セラミックダクトの製造が完了した後、励磁試験を兼ねて磁場測定を行った。磁場測定は1ターンのサーチコイル(ガラスエポキシに一巻きの銅線を挿んで接着したもの)を新規製作した手動XYZステージに固定して行った。サーチコイルの幅は5 mm、長さは局所磁場測定用の短コイルが5 mm、積分磁場測定用の長コイルが60 cmである。サーチコイルに発生する電圧は、



図8 セラミックダクト．セラミック部分の長さ32 cm，厚さ5 mm，内面のTi-Moコーティングは厚さ3 μm．内径100 mmφの丸ダクトに接続する為，片側約150 mmの長さの形状変換ダクトが溶接されている．右側に見えるポートには，水冷式のアップソーバが取り付けられる．

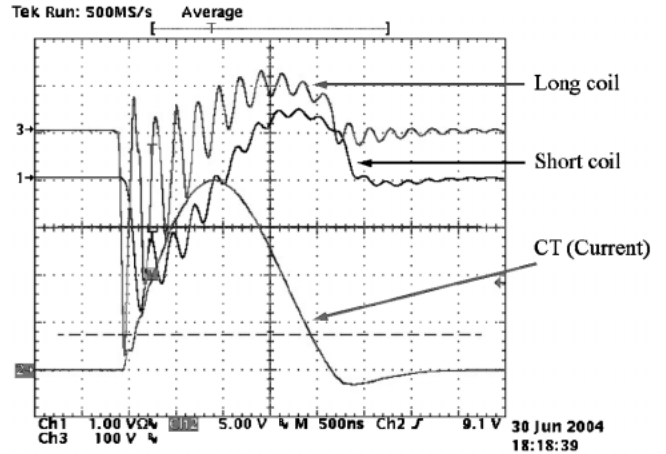
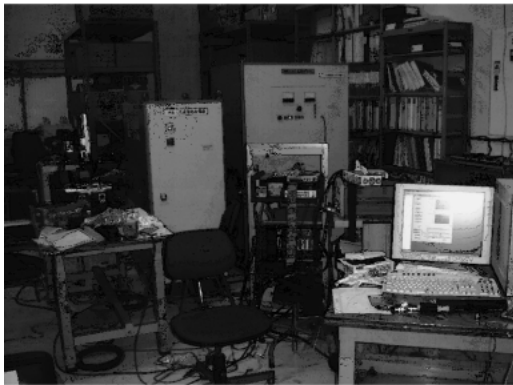


図10 サーチコイルからの典型的な信号波形．電流2000 Aの場合．パルス幅は2.4 μsecになっている．コイルからの信号が波打つのはノイズのせいであらうが，本来は磁場（電流波形とほぼ等しい）を微分した波形になるはずである．なお，オシロスコープによる測定は，プローブにノイズカットの為のフィルターや電圧を落とす為の減衰器を重ねて接続し，1 MΩ入力で行った．低磁場の時に50 Ω入力，減衰器やフィルターなしの場合と比較したが，大きな差はなかった．フィルターなどの条件による差（測定誤差）は0.01 T程度である．なお，電流2000 Aの場合，長コイルからの信号はおよそ600 Vppに達している．

(a)



(b)

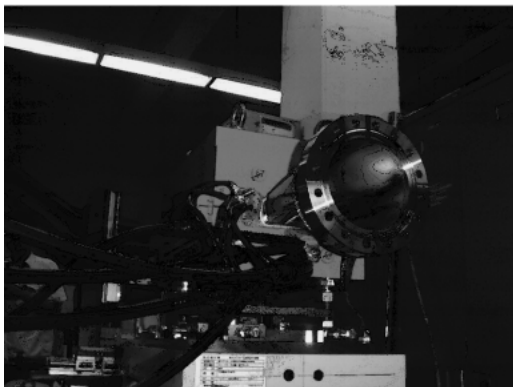


図9 (a)は磁場測定の全景，(b)は電磁石にセラミックダクトを挿入した場合の測定の様子である．

$$V = -\frac{d\phi}{dt} = -S \frac{dB}{dt}, B_{peak} = -\frac{1}{S} \int_0^{peak} V dt$$

と書ける．実際の磁場測定の際は電圧信号をオシロスコープで観測し，波形をパソコンに取り込んで積分した．磁場測定システムの写真を図9に示す．

電源はコマンド充電方式だが，その充電，放電トリガーとしては，パルス発生器からの25 Hzのパルスを分岐，遅延させて用いた．放電してから再び充電を開始するまでを10 msecとし，ノイズなどによって誤って放電するのを避ける為，放電してから39 msecは再放電禁止となるようにゲートをかけた．マシンスタディの際も，トリガーとしてLINACからの信号を用いた他は，このセットアップがそのまま使用された．

サーチコイルからの典型的な信号波形を図10に示す．パルス幅が短いため，長コイルからの信号はおよそ600 Vppに達している．実際にはコイルだけでなく，磁場が到達する範囲にある金属製のものもみな帯電してしまう為，磁場測定中は鉄芯及び架台を注意深く接地する必要がある．磁場測定の結果<sup>7)</sup>を図11に示す．測定誤差やノイズ軽減の為に用いたフィルター



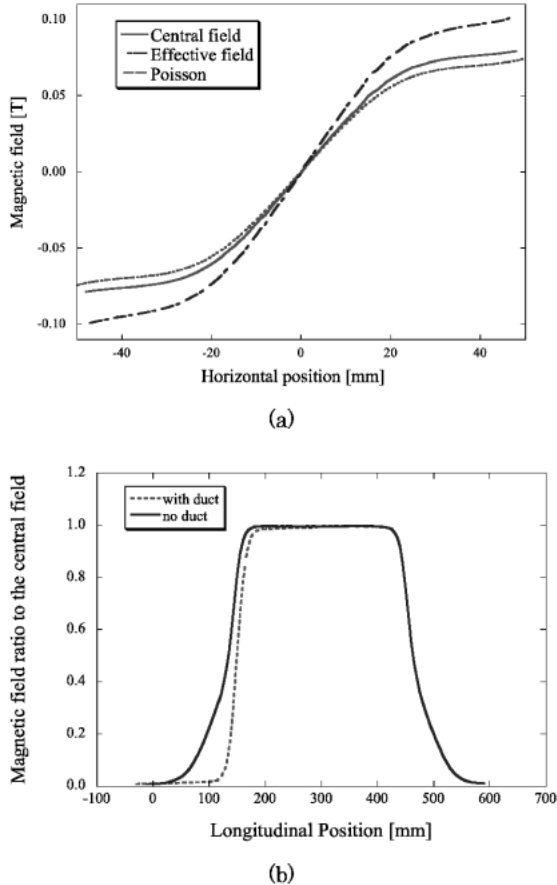


図11 磁場測定結果。(a)は水平方向の磁場分布、(b)は入射ビームが通過する水平振幅 15 mm におけるビーム軌道上の磁場分布である。いずれも、電流 2000 A の場合である。入射ビームが通過する領域では磁場は線形になっており、原点付近ではゼロである。(ノイズの為に正確な測定は難しい。)ダクトのセラミック部分は 32 cm であり、漏れ磁場の裾は形状変換部分にかかって落ちてしまう。積分磁場の値としては問題ない。

の効果を検討に入れれば、測定結果は POISSON に依る計算結果とよく一致している。磁場の分布（線形性）、強さともに要求性能を満たしていることが分かった。

## 10. リングへの設置

PF-AR の 4 極電磁石 QC2SE の上流には、単バンチ運転の為に後続バンチを蹴り落とす純化用ストリップラインキッカーが設置されていたが、それは南対称点（数 m 先）に移設された。南対称点の方がベータ関数の値が大きく、キッカーとしてもその方が好都合であった。また、誘導起電力対策として、リングトンネル内まで第 1 種（A 種）の接地端末を延長し、そこへパルス 4 極電磁石の鉄芯、架台、セラミックダ

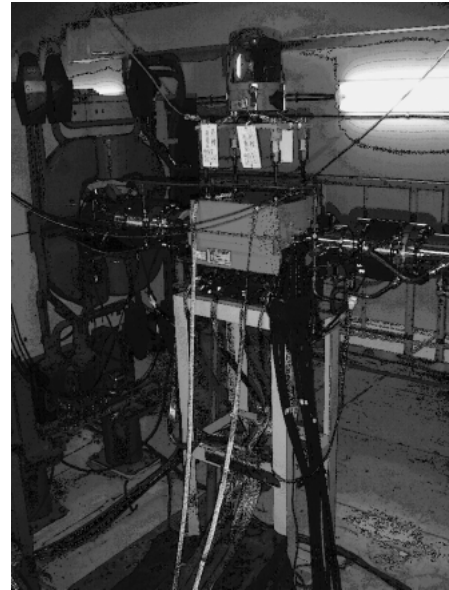


図12 リングに設置したパルス4極電磁石。パトライトと警告表示は安全の為、接地線は帯電防止の為である。右側に見える 12 本の同軸ケーブルで電源へ接続されている。

クト両脇の形状変換部を接続した。これにより、パルス 4 極電磁石を励磁した際に直近の BPM の回路系で観測されるノイズは通常の入射キッカーにおけるものとほぼ同程度まで抑えられ、(ハードウェアとしては)問題ないことが分かった。リング内に設置されたパルス 4 極電磁石の写真を図12に示す。

励磁電源のパルサー部分は、当初リングトンネル内に設置する予定であったが、放射線による損傷の可能性が予想よりも大きいことが分かったため、リングトンネルの地下に設置することにした。電源と電磁石間のケーブルの長さは当初 1 m として設計、調整されたのだが、実際は 7 m 程度まで長くなってしまった。その為、調整を行ったものの電流波形は乱れることとなったが、パルス幅と磁場の強さは要求を満たしており、問題ないと判断した。(実際に電磁石に流れる電流波形は、電源でモニタされる波形よりも若干綺麗である。)

## 11. マシスタディ

2003 年に電磁石及び電源を製造した後、2004 年春に磁場測定を行い、夏にリングに設置後、秋からマシスタディを開始した<sup>9)</sup>。まずは励磁のタイミングをビーム入射のタイミングに合わせるため、CT からの入射ビームの信号および入射キッカーのノイズのタイミングを参考に、タイミングの調整を行った。調整後のパルス 4 極電磁石の励磁タイミングを図13に示

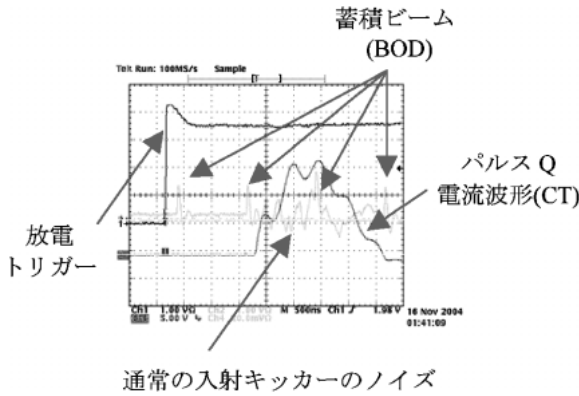


図13 タイミング調整の為の測定画面。BOD (beam oscillation detector) で周回するビームのタイミングを、キッカーのノイズで入射のタイミングを調べ、電流のピークを入射されるタイミングのパンチにあわせる。電流波形が波打っているのは、パルサー部分を地下に設置したせいで接続ケーブルが長くなった為である。

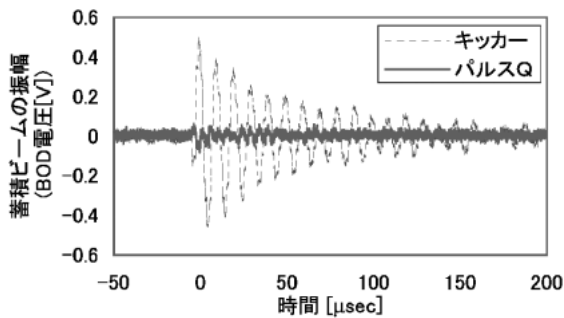


図14 蓄積ビーム振動の比較。これはスタディ初日にCOD補正をした後のデータである。BOD電圧0.4Vが振幅0.5mmに対応し、通常の入射システムを用いた場合の蓄積ビーム振動の最大振幅は約0.6mm、一方、パルスQの場合は約0.1mmである。

す。スタディを始めて数時間後にはタイミングをあわせることができ、パルス4極電磁石(だけ)を用いてビーム入射が可能となった。蓄積ビームが電磁石中央を通るようにCODを補正した結果、入射効率が向上し、繰り返し5Hzで0.18 mA/secと、キッカーを用いた通常の入射システム(キッカージャンプあり)と同程度までになった。蓄積ビーム振動波形を図14に、典型的な入射履歴を図15に示す。なお、通常の入射の場合に振動が非常に大きいのはキッカージャンプの為である。パルス4極電磁石を用いた場合の入射効率は、蓄積電流値が大きくなるに従って低下し、図に示した場合30 mAで入射が滞ってしまっている。蓄積電流が小さいときの入射効率は十分に高く、この

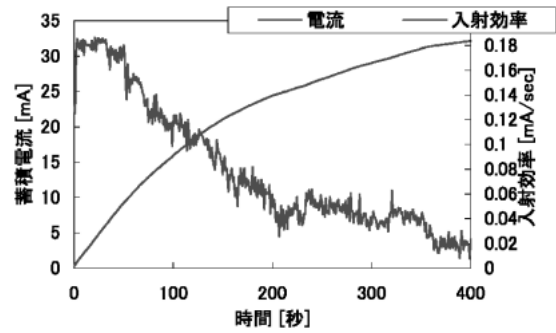


図15 典型的な入射履歴(スタディ初日のデータ)。低電流での入射効率はキッカーを使った通常の入射の場合と比較しても遜色ないが、蓄積電流が増えるに従って減少し、この日は30 mA以上は蓄積できなかった。スタディを重ねた結果、蓄積電流は50 mAまで向上したが、キッカーを使った場合の65 mAには到達していない。ただし、パルス4極を用いた場合、フィードバックや8極電磁石がなくとも入射が可能である。万が一これらの装置が故障の際は通常の入射システムは10 mA程度しか蓄積できない為、パルス4極電磁石は非常に優位となる。(スタディの目的は原理実証であり、ユーザー運転に対する実機を目的としていないが。)

滞りはパルス4極入射システムの原理的な問題ではなく、PF-AR固有の問題であろうと思われる。様々な調整の結果、現在では単パンチで50 mA、4パンチで90 mAまで蓄積できるようになったが、入射が滞る原因についてはまだ解明できていない。(キッカー電磁石を用いた通常の入射でも同じ現象が見られるが、長年の調整の結果、現在の最大蓄積電流値は単パンチで65 mAである。)光モニター<sup>8)</sup>を用いて観測したビームのプロファイルを図16に示す。パルス4極電磁石を用いた場合、入射ビームの振動の振幅は通常の入射と同程度であり、一方で蓄積ビームの重心振動はほとんど観測されなかった。パルス4極の場合に蓄積ビームが瞬いているのは4極振動が励起された為であるが、例えば入射点上流にもう1台パルス4極電磁石を設置すれば、システムは複雑になるものの、この振動は打ち消すことができる。

PF-ARでは、真真空的にリングと切り離されているセプタム電磁石のセプタム板が厚いので、入射点の位置と局所パンプの位置の差が大きい。そのため、入射ビームは非常に大きく振動することになるため、できるだけ局所パンプを高くし、その差を小さくしたい。しかし、一方で、PF-ARの入射点には水平分散があるため、縦方向の不安定性が起きてしまうと、蓄積ビームのビームサイズが増大し、高い局所パンプでは

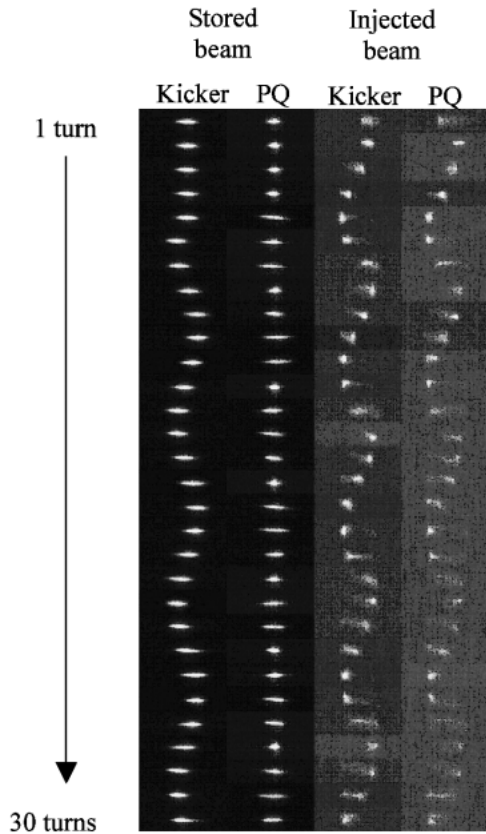


図16 蓄積ビームと入射ビームのプロファイル. PF-ARのビームラインNW14に設置された光モニターで測定を行った. 蓄積ビームの横方向ビームサイズは0.59 mm (計算値)である. 通常の入射キッカーで励起された蓄積ビームの重心振動の振幅はおよそ1シグマであり, これは図15で示したBODによる測定結果(0.6 mm)と一致する. パルスQ(PQ)の場合, BOD測定の際よりもより精密に軌道補正が行われた結果, 重心振動はほとんど抑えられており, 4極振動(ビームの瞬き)のみが観測されている. 一方, 入射ビームのプロファイル(蓄積ビームとは光学系や倍率が異なる)に対しては, 振動の様子やバンチが拡散する様子はキッカーとPQではほぼ同等である.

蓄積ビームが入射点の真空ダクトに当たってしまう. この二つの問題を回避するため, PF-ARではキッカージャンプを入射に採用している. すなわち, 入射ビームの振幅を減らさずに, 効果的に蓄積ビームの局所バンチを低くして, ビームサイズが増大しても真空ダクトに当たらずにすむ方法である. ただし, バンチが完全に閉じないため, 入射時に蓄積ビームの振動が生じることになる. 図15や図16に示される通常の入射システムにおける蓄積ビーム振動は, 主にそれが原因となっている. しかしながら通常の入射の際はキッカージャンプだけでは大電流の蓄積は不可能であり,

8極電磁石とフィードバックシステムを併用することが必須である. 8極なしの場合は3 mA, フィードバックなしの場合は10 mA以上の電流蓄積は不可能となり, 入射の条件は非常に厳しい. 一方, パルス4極電磁石を用いた場合, 8極電磁石やフィードバックシステムの有無は入射効率や蓄積電流に影響せず, また, 蓄積ビームの重心振動がほとんど励起されない為, フィードバックを稼働させてもキッカーへ供給されるパワーは非常に少なかった. パルス4極電磁石1台でキッカー4台の代わりになるだけでなく, 不安定性抑制の為に他の装置に頼らずとも単独で入射が可能であった.

## 12. まとめ

キッカーを複数台用いる代わりに1台のパルス4極電磁石を用いて蓄積ビームのパルスローカルバンチなしに入射を行う, 新しい入射システムの開発を行った. PF-ARにおいて原理実証スタディを行う為, 設置場所の最適化を行い, パルス四極電磁石システムを設計した. 実際に電磁石, 電源, セラミックダクトなど必要なハードウェア一式を製造後, 励磁試験及び磁場測定を行い, 設計性能が出ていることを確認した. リングに設置して行ったマシンスタディの結果, 設計通りにビーム入射が可能であることが示された.

## 謝辞

マシンスタディの際は電磁石グループの長橋さん, 宮島さん, 制御グループの帯名さん, 程さんに御世話になった. また, 光モニターによるビームプロファイルの観測は, 三橋さんと上田さんをお願いした. セラミックダクトの設計製作や電磁石のリングへの設置作業では, 真空グループの堀さん, 谷本さん, 内山さんに全面的に御世話になった. このプロジェクトが実現したのは小林前主幹と春日主幹のおかげであり, また, マシンスタディ中はKEKBの方々に貴重な入射時間を譲っていただいた. 皆さんに感謝致します.

## 参考文献

- 1) T. Abe *et al.*, "Status of PF-AR", Proc. of SRI 2003, pp. 33-36.
- 2) K. Hanaoka, Y. Funakoshi, H. Hayano, T. Higo and K. Satoh, "Beam instability due to higher-order modes of APS cavities in the Tristan accumulation ring", Nucl. Instr. And Meth. A 329 (1993) pp. 16-20.
- 3) T. Fujita, *et al.*, "Detection of wake field using test-bunch method at photon factory advanced ring", Proceedings of PAC 2003.

- 4) K. Harada, Y. Kobayashi, S. Nagahashi and T. Miyajima, "PF-AR injection system with pulsed quadrupole magnet", Proc. of APAC 2004, p260.
- 5) Y. Li, *et al.*, "Design, simulation and test of pulsed Panofsky quadrupoles", Proceedings of PAC 1999, p3360.
- 6) POISSON SUPERFISH, Los Alamos National Laboratory Report No. LA-UR-96-1834 (revision 14 March 2000).
- 7) K. Harada, Y. Kobayashi, S. Nagahashi and T. Miyajima, "Field measurement of the pulsed quadrupole magnet for PF-AR injection", Proc. of 1st annual meeting of Part. Accel. Soc. of Japan, 2004.
- 8) T. Mitsuhashi and M. Tadano, "Construction of SR Monitor for Photon Factory Advanced Ring", Proc. of PAC2003.
- 9) K. Harada, Y. Kobayashi, S. Nagahashi, T. Miyajima, T. Obina, A. Ueda and T. Mitsuhashi, "Beam injection for the PF-AR with a single pulsed quadrupole magnet", Proc of PAC 2005.