

解説

# 放射光リングへの陽電子ビームの生成 と入射及び蓄積の現状

大沢 哲, 三橋 利行

高エネルギー物理学研究所放射光実験施設

## Present Status of Positron Beam Production and Injection into the PF Ring

Satoshi Ohsawa and Toshiyuki Mitsuhashi

Photon Factory, National Laboratory for High Energy Physics

Positrons were efficiently accumulated into the Photon Factory storage ring. A semi-long 40 nsec pulsed positron beam was developed for the PF ring. The transmission of the beam transportation line was improved to 80% by using a matching section. The injection system of the ring was replaced by a new one which was designed to be operated at 25Hz. With these improvements accumulation rate became 0.3 to 0.58 mA/sec. A maximum stored current of 500 mA was also marked.

### 1. はじめに

放射光実験施設(PF)では、これまで、2.5GeVのストレージリングからシンクロトロン放射光を発生させるのに電子ビームを蓄積してきたが、昨年の7月中旬より、電子ビームの代りに陽電子ビームをPFリングに蓄積し、その放射光を利用する運転を開始した<sup>1)</sup>。陽電子ビームを使う目的は、電子ビームの場合にストレージリングに見られるイオン捕獲や微粒子捕獲等によるビームの寿命の急変などの不安定性を取り除き、より安定した放射光をユーザに供給することにある。今期の夏の運転終了時点で、陽電子のテスト入射より、

ほぼ1年経過したことになる。これを期に、PFリングへの陽電子の生成と入射及び蓄積の経緯と現状について報告する。

PFリングに陽電子を蓄積するためには、まずリニアックから2.5GeVの陽電子ビームを供給することが必要である。陽電子ビームは、トリスタンの実験用に数年前から既に実用化されていたが、電子と陽電子の衝突実験に使用するために、パルス幅が2 nsと極端に短い。このためビームの電荷量は15 ns程度で、従来使用してきた電子ビームの約1/300であり、かなり少ない。そのため、この陽電子ビームを従来の電子用の入

射システムにより入射したのでは入射に20時間以上かかり実用的ではない。そこで、光源、入射器共同のプロジェクトチームをつくり、30分以下で300mAまで蓄積することを目標に、電荷量の多い陽電子ビームの開発及び必要な装置の製作と改良を進めてきた。その結果、パルス幅が $\sim 40$ nsで電荷量が $\sim 70$ nsのセミ長パルスビームが開発され、リングでも従来の1Hzの入射システムが25Hzのものに置き換えられることにより、約30分 $\sim$ 1時間程度の入射で300mAの陽電子が、リングに蓄積されるようになった<sup>2), 3)</sup>。

最近では、トリガー系等の改良により実際にビームを入射している時間がかなり短縮され、最後の1ヵ月半程の運転では10分程度で終了するところまで改善された。又、そもそもの目的であったイオン捕獲や微粒子捕獲によるビームの不安定性が取り除かれたことも確認された。問題点はまだ多数残っているが、解決すべく鋭意努力中である。

## 2. 加速器の概略構成

関係する加速器の構成を図1に示す。放射光実験施設は、2.5GeVの電子リニアックと蓄積リングより成っているが、リングについては他に解説があるのでここでは省き、リニアックの概説のみ述べる。PFリングにビームを供給する入射器は、図1に示すように、2種類の加速器によって構成されている。第一は、長さが約400mの2.5GeV電子リニアックである。これは、2.5GeVの電子ビームを供給するためのものであり、現在は主にトリスタンの蓄積加速リングに2nsのビームを供給するのに使用している。PFでも、リングの真空の焼きだし等には現在でも、電子ビーム( $\sim 0.7\mu\text{s}$ )を使用することがある。第二の加速器は、陽電子ビームを生成するための陽電子発生装置のリニアックである。このリニアックは、大電流の電子ビームを250MeVまで加速する部分と、そのビームをタンタルの標的に当てて生成した陽電子を250MeVまで加速する部分とから成る。こ

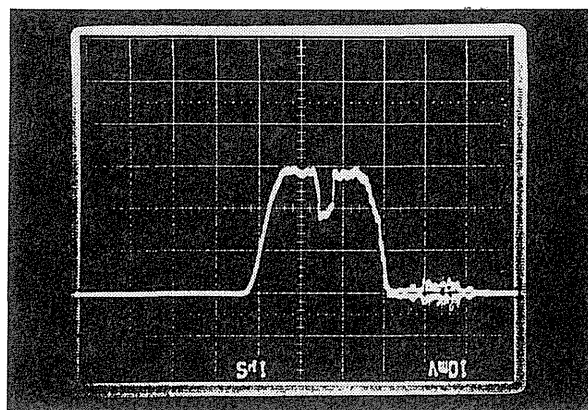


Fig. 1 Schematic arrangement of accelerators in KEK.

Table 1 Available electron and positron beams for the PF ring and the accumulator ring of TRISTAN

	PF	AR
e+	40ns, ( 2 ns)	2 ns
e-	$\sim 0.7\mu\text{s}$ , 2 ns	2 ns

こで生成された250MeVの陽電子ビームは、30度偏向電磁石系をへて、2.5GeVのリニアックに輸送、入射され、更に加速されて最終的には2.5GeVになる。この陽電子ビームは、PFリングのほかにトリスタンの蓄積加速リング(AR)にも供給されている。

このように、PFリニアックから、PFリングとARの相方に複数の種類のビームを供給している。供給可能なビームの種類を、Table 1に示す。PFリングに入射する陽電子ビームは、通常40nsのビームである。PFリング用の2nsの陽電子ビームは、遠隔操作によるビームの切り換えがまだできないので、括弧付きにした。このビームは、マシンスタディ等の特別な場合にのみ利用可能である。このビームを除けば、ビームの種類は、主制御室から遠隔操作によって短時間で切り換えることができる。

リニアックで加速されたビームは、図1のようにビーム輸送路により約150m程輸送されてPFリングに蓄積される。

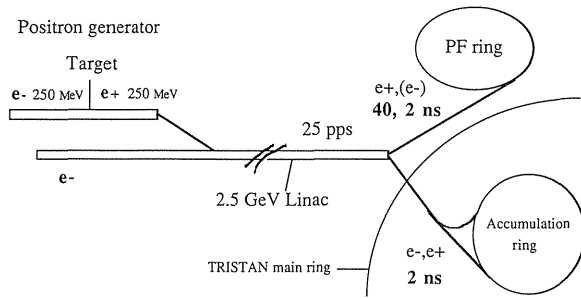


Fig. 2 The RF power observed at the exit of an accelerator section in the electron-accelerating part.

### 3. 電子ビームの発生と加速

まず、陽電子を生成するのに使用する電子ビームについて説明する。この電子ビームは、陽電子発生装置の最も上流にある電子銃から供給される。この電子銃は、グリッド付の三極管型である。

電子銃から放出されたビームは、直線上に設置された6本の加速管によって加速される。各加速管はマイクロ波によって満たされており、電子が加速管を通過するときに、このマイクロ波のパワーを一部分吸収する。吸収されるパワーは、加速管を通過したビームの電荷量に比例する。したがって、短パルスビームが加速管内を通過すると、加速管内のパワーが、時間とともに減少する。電子ビームの場合には電荷量が多いので、この変化が激しい。このため、パルスビームの先頭にある電子は強い電場で加速され、後部にある電子は弱い電場によって加速されることになる。従って、電子ビームのエネルギーがパルス内で変化する。このために生ずるエネルギー幅が大きくなると、ビームを集束することが困難になり、ビームサイズが大きくなってしまて輸送できなくなる。この現象によって、加速できるビームの電荷量（パルスあたり）には限界が生じる。

ここで、加速マイクロ波のパワーの減少する様子を、図2に示す。これは最初の加速管の出力パワーをモニターしたもので、以下に述べる40ns、3 Aのパルスビームを加速した場合である。3  $\mu$  sec 加速マイクロ波のパワーが、電子ビームの

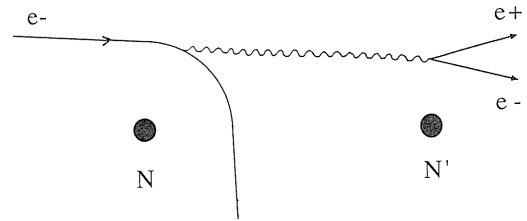


Fig. 3 Mechanism of the positron production.

負荷によって、40nsの間に大きく減少している。これからも判るように、40nsのビームの場合には、加速できる電子ビームの電荷量が既に限界に近いところまで来ている。尚、減少している時間が0.4  $\mu$  secであるのは、加速管の特性による。

### 4. 陽電子ビームの生成

次に、陽電子ビームの生成について解説する。最初に、陽電子の生成そのものについて簡単に説明することにする。図3に、陽電子の生成機構を概念的に図示した。まず、高エネルギーの電子ビームを標的（金属板）に照射すると、電子が標的の原子核の近くを通過するときに強力な電場の引力を受けて電子の軌道が曲げられ、制動放射のガンマ線が発生する。このガンマ線が標的の中を通過する間に、他の原子核の電磁場と相互作用して、電子と陽電子を対生成する。ガンマ線のエネルギーが十分に高い場合は、対生成された電子と陽電子のペアのエネルギーが高くなり、標的の反対側から飛び出してくる。この陽電子はいろいろな方向に出てくるので、強力なソレノイド磁場で集束させた後、必要なエネルギーまで加速する。電子の方は減速されて低エネルギーになり、途中で失われてしまう。このようにして陽電子ビームが得られる。

#### 4.1 電荷量の多い陽電子ビームの発生

さて次に、電荷量の多い陽電子ビームを、どのようにして開発したかについて述べる。対生成の数は、電子ビームのエネルギーと電荷量の積にほぼ比例する。従って、電荷量の多い陽電子ビームを

得ようとするれば、1次粒子である電子ビームのエネルギーと電荷量を大きくすることが必要になる。ビームのエネルギーは、加速マイクロ波のパワーの平行根にほぼ比例してしか増大しないので、エネルギーを増大させる方法を取る場合には、マイクロ波のパワーを大幅に増強することが必要になる。しかし、これには大幅な改造が必要で、容易なことではない。そこで、電子ビームの電荷量を増やす方法をとることにした。

陽電子発生装置の場合は、最終的に得られる陽電子の数は、1次ビームである電子の0.1%程度である。この割合は極めて小さいので、電子ビームは大電流でなければならない。既に実用化している2 nsのビームの電流を大幅に増やせば、問題はないのであるが、それには大規模な改造を要する。幸いにして、PFリングで必要とするビームは、トリスタンと異なり2 nsである必要はないので、パルス幅を長くして電荷量を増やすことができる。ただし、陽電子発生装置では、設計上、マイクロ秒の長パルスビームは加速することができない。そこで、40 nsのパルス幅のビームを開発した。この結果、陽電子ビームの種類が2 nsと40 nsの2種類になったので、ビームの切り換えが新たに必要になる（ともに営業運転であるので、遠隔操作で瞬時に切り換えなければならない）。これらのために、新しく必要になった装置の主なものは、次の4点である。

(1) 40 nsのビーム用グリッドパルサー。

これは、電子銃のグリッドとカソード間に印加する40 nsのパルスが発生するパルサーである。

(2) 2 nsと40 nsのビームのいずれか一方を選択するための、長/短パルス切換装置。

2種類あるグリッドパルサーの一方を同軸切換器で選択するものである。グリッドパルサーと同軸切換器は電子銃の高電圧部にあるので、光信号で切換器を動作させている。

(3) PFリング用陽電子ビームのトリガー系。

トリスタンとPFでは、リングの加速周波数が

異なるために、独立なトリガー系を必要とする。これもビームの種類によって切り換える。

(4) ビーム輸送系の電磁石の電流値を設定するための制御系。

2 nsと40 nsのビームでは電子ビームの電流が大きく異なるため、電磁石の電流値を変えないとビームをうまく輸送することができない。そこで、ビームに応じて輸送系の電流値を、この制御系で所定の値に設定する。

(2)と(3)の選択は、主制御室の制御卓にある押しボタンで行い、(4)の設定は同じ制御卓のタッチパネルを介して計算機で行う。これらの一連の作業により、トリスタンの入射モードからPFの入射モードへ、あるいはその逆の変更が数分で終了する。

#### 4.2 陽電子のビーム電流の推移

さて、陽電子の電流値がリニアックで過去一年間にどのように推移したかを、図4に示す。横軸は通算の日数で、陽電子ビームのテスト入射が始まった昨年7月11日から数えた。データのないところは、保守期間である。測定箇所は、30度偏向系から2.5 GeVラインに入り加速管3本を通過した所(WM16, ~300 MeV)と、2.5 GeV リニアックの終端(WM58, 2.5 GeV)の2カ所である。約300 MeVの所では、ビーム電流は比較的安定しており、電子銃のアノード電流に比例して次

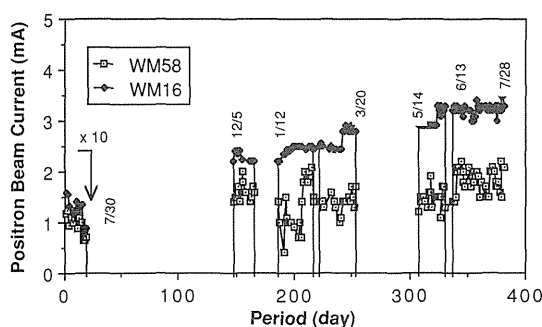


Fig. 4 The progress of the 40 nsec positron beam for the PF ring. Until July 30 of last year, the 2 nsec beam was used, till then 40 nsec beam.

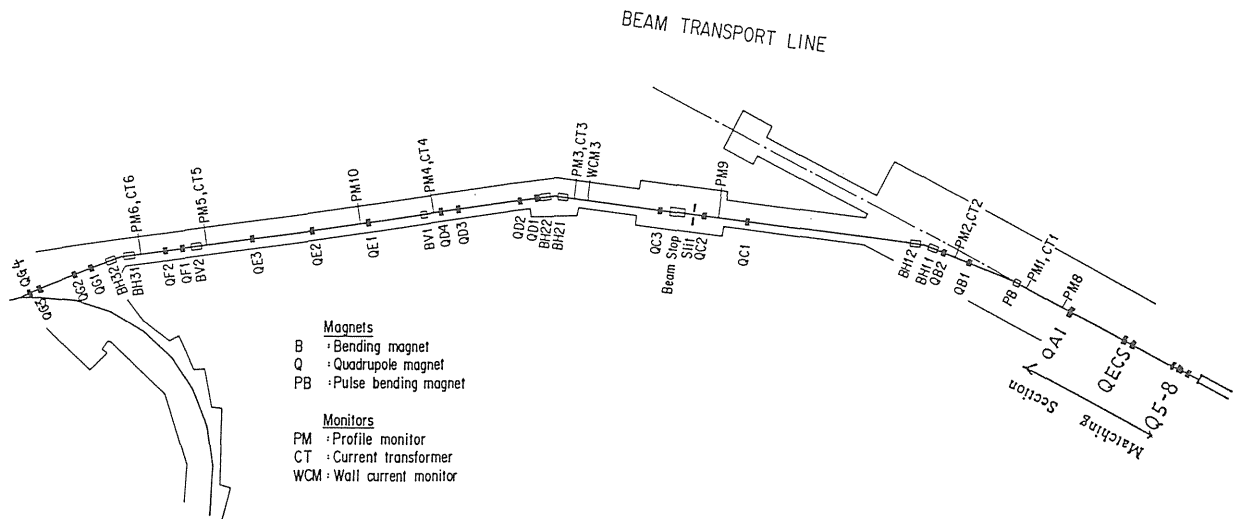


Fig. 5 The outline of the beam transport line.

第に増加している。しかし、2.5GeV リニアックの終端では、ビーム電流の変動がやや大きくなっている。これは、陽電子ビームがエミッタンスの大きな二次ビームであるために、必然的にビームサイズが大きくなり（加速管の内径程度）、長い距離加速するのが難しくなっていることの現れである。

## 5 . PF リングへの陽電子ビームの輸送

次にリニアックにより加速された2.5GeVの陽電子ビームのPFリングへの輸送について解説する。

### 5.1 ビーム輸送路

2.5GeVに加速された陽電子ビームは、ライナック終端からビーム輸送路により約150m程輸送されて、PFリングの入射点に到達する。ビーム輸送路の概略を図5に示す。陽電子ビームは、ライナック終端より約20mのスウィッチングヤード直線部を経て水平偏向電磁石により5度偏向されて輸送路へと導かれる。輸送路では、先ず水平方向に2回15度偏向され、次にPFリングのレベルにビームの高さを合わせるため、垂直方向に7.5度はね上げられた後、水平レベルにもどされ、最後に水平面内で15度偏向されてPFリング入射点に達する。輸送路のエネルギーアクセプタンス

は0.5%である。この輸送路にはビームをハンドリングするため、全部で12台のスクリーンモニターと7台のコア付カレントモニター、及び2台の壁電流モニターが設置されている。また、このビーム輸送路では、中ほどにある分散の大きいセクションでビームのエネルギースペクトルを測定することができるようになっている。

### 5.2 ライナック終端と輸送路入口の電子光学系の整合について

先に述べたように、陽電子の加速は二段階にわたって行われる。すなわち、陽電子ライナックで発生した250MeVの陽電子ビームを2.5GeVメインライナックに入射し、ビームを2.5GeVまで加速する。この際、陽電子ビームの電流値が最大になるように調整するために、電子光学系の四極電磁石を調整する。このため2.5GeVライナックの終端で電子光学系のパラメータが調整に伴って変化し、その後につながるビーム輸送路の光学系との間に不整合を生ずる。このため、ライナック終端と、ビーム輸送路入口の間の約20mの直線部にある5台の四極電磁石をマッチングセクションとして使用し（図5）、両者の整合をとった。整合をとる手順は次の3ステップにより行った。

- i) ライナック終端での電子光学系のパラメータを測定する。

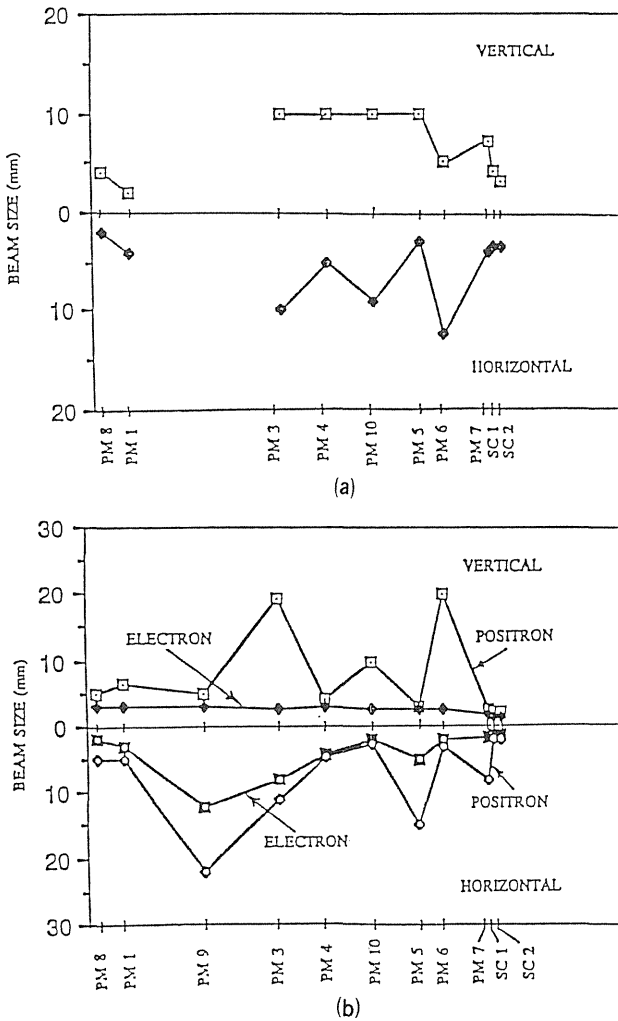


Fig. 6 Beam size measurements in beam transport line with screen monitor ; (A) before adjustment, (B) after adjustment.

- ii) i) で測定したパラメータから、マッチングセクションの四極電磁石の電流値を計算する。
- iii) ii) で得られた電流値をセットし、ビームの輸送状態から整合がとれたかどうか観測し、整合が不十分であれば、i) にもどって繰り返し整合をとりなおす。

通常、2回程度整合を取りなおすと十分である。図6にマッチングをとる前と後でのビームサイズの変化を輸送路のスクリーンモニターにより測定した結果を示す。整合をとる前で、ビームは輸送路に入って程なくした所 (PM9の付近) で発散し、ビームサイズの測定が不可能となった。この時のビームの輸送効率も10%以下であった。マッ

チングをとった後は、この発散はなくなり輸送効率も60~80%程度に上昇した。

上記の整合をとる際に i) で電子光学系のパラメータを測定するが、この際に、ビームエミッタンスも同時に観測される。その結果、陽電子ビームのエミッタンスは2.5GeVライナック終端で約  $1.0 \times 10^{-6}$  mradで、電子ビームのエミッタンスは約  $0.3 \times 10^{-6}$  mrad、比較して、約3倍程度大きい。この原因は2次粒子であるポジトロンビームが、加速管のアクセプタンスいっぱいになって来たためと思われる。

### 6. PFリングへの陽電子ビームの入射

最初に、ストレージリングの入射について、簡単な解説をする。図7に示すような平衡軌道を持つリングへの入射を考える。リングは適当な偏向電磁石と四極電磁石から成るものとし、入射点のところに、リングにほぼ平行にビームを打ち込んだとする。入射されたビームは図7-Aのように四極電磁石のオフセンターを通過し、その焦点距離に応じて次々に進路を曲げられ、大きく振動しながらリングの中を回り始める。そしてビームはリング内を数回転したところで、入射した位置にもどって来る。ところが、入射点には、ビームをリングとほぼ平行に曲げるためのセプタム電磁石 (特殊なパルス偏向電磁石) があるので、このままではビームはセプタムに当たって失われてしまう。そこで、図7-Bに示すように、入射点で軌道をパルス的にふくらませて (パルスバンプ) やると、入射ビームの振幅がその分小さくなるので、数ターン後にビームが元の位置にもどって来るまでにこのパルスバンプをひっこめてやると、ビームはセプタムには衝突せずにリング内を回転しつづけることができる。そこで、リングにRF加速空洞があれば加速フィールドにつかまってリングに蓄積される。

以下にPFリングへの陽電子の入射について述べる。

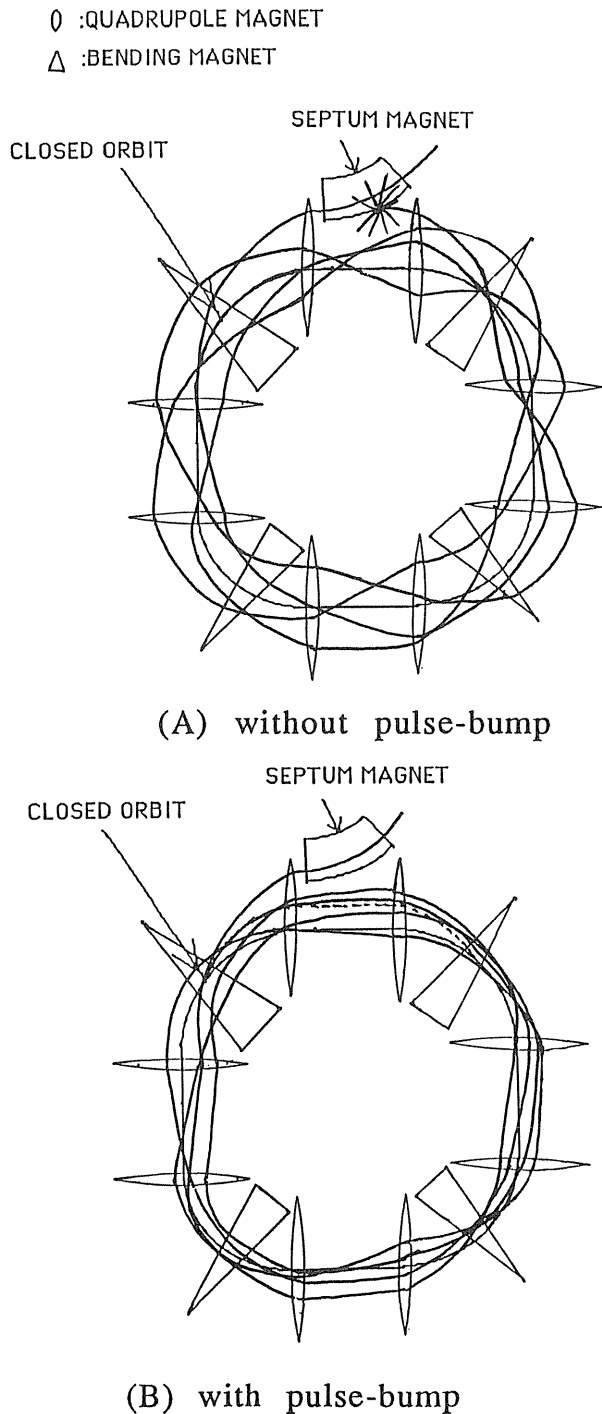


Fig. 7 The trajectory the injected beam in model ring;

### 6.1 陽電子用の入射システム

PF リングの入射点付近のパルス電磁石の配置を図8に示す。リングとビーム輸送路との間の角度は12度であるので、二台のセプタム電磁石によりそれぞれ7度と5度ビームを偏向し、リングの平衡軌道に対して34mm, -2 mrad ずれた所に

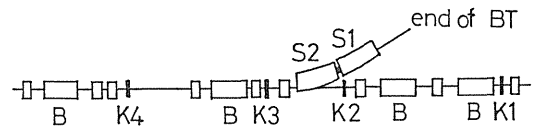


Fig. 8 The arrangement of the septum and kicker magnets.

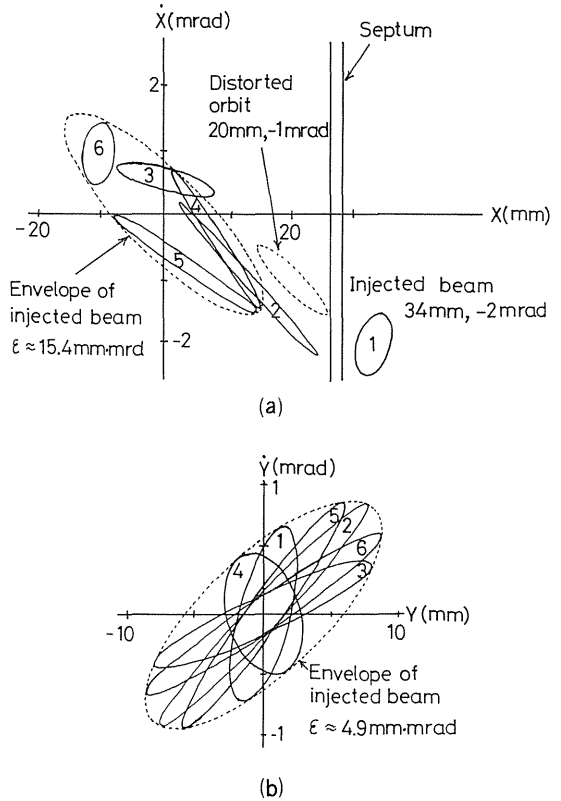


Fig. 9 Injected beam phase space ;(A)horizontal, (B)vertical.

ビームを入射する。リング側では四台のキッカー電磁石 (パルス偏向電磁石) によりパルスバンプを形成する。パルスバンプの大きさ及び角度は21 mm, -1 mradに設定してある。

### 6.2 陽電子のPFリングへの入射

これらの入射システムのもとで入射されたビームがどのようにリングの中を回転し始めるか位相空間で計算した結果を図9-A, Bに示す。PFリングでは、横方向にパルスバンプがなければ、ほぼ4ターン目で元の位置にもどって来るが、パルスバンプのおかげで、ビームは4ターン目までに平衡軌道の周りに移動し、回転し続けることができる。入射ビームは横方向にも、縦方向にも放

射減衰して小さくなるまで、大きなエミッタンスで回転するのでリングのアクセプタンスが十分でないと入射できない。特に、縦方向には陽電子ビームのエミッタンスは電子の約3倍ほどあるので大きなアクセプタンスが必要である。PFリングはもともと陽電子を蓄積するように設計されたリングではないので、特に縦方向にアクセプタンスが十分にあるかどうか調べなければならない（PFリングにはアンジュレーターのダクトなどのような縦に極めて狭いダクトが何ヶ所も入っている）。そこで、アクセプタンスの大きさを調べるために入射されたビームが実際にリング内を周回していくときに、ビーム電流の減衰の様子を電流モニターにより測定した。結果を図10に示す。この図で時間方向に並んだ1本1本が、ビームが電流モニターを通過するごとに観測された電流ピークに

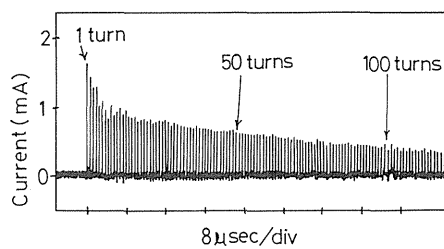


Fig.10 An observed current decay of the injected beam.

対応する。これらのピークの時間方向の減衰が、ビーム電流のリング内での減衰を示すが、最初の5～6ターンで約60%に減衰する（パルスバンプがかかっているとき）以外には、急激な減衰は見られず、リングのアクセプタンスは一応十分と思われる。最初の数ターンで見られる～40%の損失は、パルスバンプのエラーなどによると思われる、今後の改善課題である。こうして入射されたビームにRF加速をかければ、リングに蓄積される。最近測定された陽電子ビームのリングへの蓄積パターンを図11に示す。このときのリニアックからのビームは、上に述べた40nsec幅のビームを使用し、入射の繰り返しは25Hzで行った。最近では、平均的に0.3～0.4mA/secの蓄積率（1秒間に蓄積される電流値）を得ている。

## 7. 蓄積率の最近の推移

上述のような経緯で、PFリングへの陽電子ビームの蓄積が進められたが、蓄積率を見ると1988年7月に運転を始めた当初は～0.05であったものが現在では約10倍の0.58mA/secを記録するまでに至った。これまでの蓄積率の推移を図12に示す。この図を見ると、蓄積率は時間とともにほぼ線形

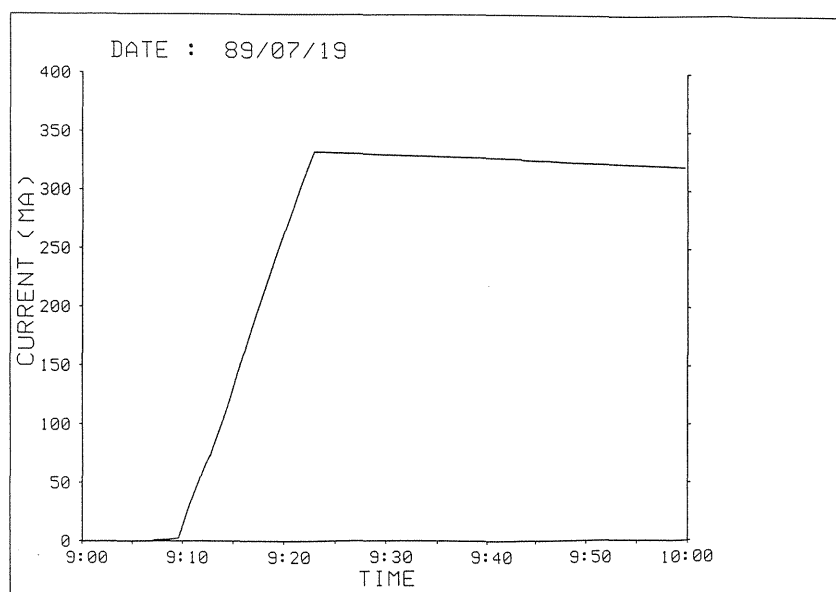


Fig.11 A typical accumulation pattern of the positron beam.



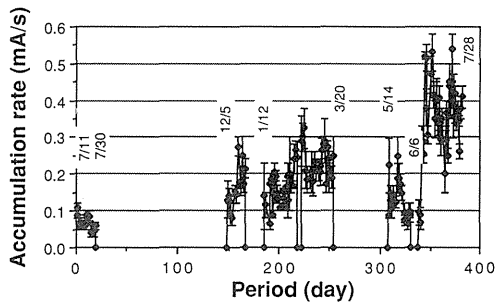


Fig.12 The progress of the accumulation rate in the PF ring.

上昇していることが見られる。今年の5月14日から6月6日までの運転では、蓄積率が小さくなっているが、これはリニアックでRFに対するビームのタイミングが適切でなかったため、このタイミングを合わせた結果、蓄積率が3月の状態（ $\sim 0.3 \text{ mA/s}$ ）に戻った。さらに、その後、リングとリニアックとの間の同期をとるためのトリガー信号が3割程減少していることが判明し、これを改善したところ、蓄積率がさらに増加して、上述の $0.58 \text{ mA/s}$ を記録した。現在、実際の入射では、ビームシャッターを閉じてからユーザーに引き渡されるまでに約2時間を要しているが、このうち実際にビームを入射しているのは10分以下である。

今後、1989年の秋からは、新ウィグラーがリングに挿入され、横方向のアクセプタンスが小さくなるので蓄積率が多少下がる可能性があるが、その分ウィグラーの上下動に要する時間がなくなるのでユーザータイムはふえる方向に行くと思われる。また、近い将来に陽電子ビームの繰り返しを $25 \text{ Hz}$ から $50 \text{ Hz}$ になれば、あと2倍程度は蓄積率があがると思われる。

## 8. 最後に

陽電子ビームの発生とPFリングへの蓄積の経過と現状について述べてきたが、初期の目標であった30分以内でリングにビームを蓄積することを達成し、又、1989年1月23日には $500 \text{ mA}$ の陽電子をリングに蓄積することに成功した（この電

流値は現在のところワールドレコードである）。

最後になったが特に中心になってこのプロジェクトを進めてきたグループのメンバーを紹介して本稿をとじることにする。以下敬称略

浅見 明, 穴見 昌三, 阿部 勇, 浦野 隆夫, 榎本 収志, 大沢 哲, 小川 雄二郎, 桂 共太郎, 加藤 政博, 小林 正典, 小林 仁, 斉藤 芳男, 佐藤 佳博, 三橋 利行, 山川 達也, 横田 光弘。

## 参考文献

- 1) K.Fuke: Rev.Sci.Instrum., 1382, 60(7), July (1989).
- 2) S.Ohsawa et al. : "Positron beams for PF Storage Ring", Proc. of the XIV Int. Conf. on High Energy Accel., to be published.
- 3) T.Mitsuhashi et al.; "Accumulation of Positrons into the Photon Factory Storage Ring", Proc. of the XIV Int. Conf. on High Energy Accel., to be published.

