

## NEW BEAM TRANSPORT LINE FROM LINAC TO PHOTON FACTORY IN KEK AND ITS PRECISE CORRECTION

N. Iida<sup>1</sup>, M. Kikuchi, K. Furukawa, M. Ikeda, K. Kakihara, T. Kamitani, Y. Kobayashi, T. Mitsuhashi, Y. Ogawa,  
M. Satoh, T. Suwada, M. Tawada and K. Yokoyama, KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

### Abstract

The  $e^+e^-$  injector LINAC in KEK usually injects into four rings which have different energies and charges. In order to shorten the switching time from/to KEKB to/from PF, we have constructed new beam transport line for PF. In this paper we describe on the operational status of the new PF line, concentrating on the beam-based improvement of optics. In addition we present that the beam operations are done well by shielding magnetic fields from ECS bends and by correcting magnetic fields of quads in the line.

## KEKにおけるLINACからPFへの新ビーム輸送路とその精密調整

### 1. はじめに

KEKの電子・陽電子入射器 (LINAC) では、通常4つのリングに入射している。すなわち、KEKBのLow Energy Ring (LER: 3.5 GeV/e<sup>+</sup>), KEKBのHigh Energy Ring (HER: 8.0 GeV/e<sup>-</sup>), Photon Factory (PF: 2.5 GeV/e<sup>-</sup>), Advanced Ring for pulse X-rays (PF-AR: 3.0 GeV/e<sup>-</sup>)である。KEKBへは連続入射でLERとHERに約5分ずつ順番に入射しているため、両リングには常時運転電流値を約2%の幅で蓄積でき、ルミノシティ調整はほとんど電流値に依存せず行うことができる。PFやPF-ARへの入射は一日に数回ではあるが、切り替えも含めて各々約20分かかっていた。その間はKEKBへは入射されないため、電流値が約-15%にまで落ちてしまい、ルミノシティ調整の最適点を見失ってしまうことから、ルミノシティの回復まで2時間以上かかっていた。このためPFやPF-ARへの切り替え速度を上げることは、KEKBの運転にとって非常に有益なことである。2005年夏にLINACのPFへの輸送路を新しくしたことで、切り替えを速くし、PFのための入射時間を5分程度に短くすることができた<sup>[1,2]</sup>。また、このことがPFのトップアップ入射への礎となったことは大きな意味がある。

### 2. 新PF輸送路

LINAC終端部のレイアウトを、図1に示す。旧PF輸送路を黒い線で、新PF輸送路は赤い線で示す。旧PF輸送路では、4リングへのビーム全てがKEKB (e<sup>+</sup>)用のEnergy Compression System (ECS)の第1偏向電磁石を通る。特にKEKBからPFへの切り替えは、この偏向電磁石の磁場を落とすことでビームをまっすぐ通し、下流の偏向電磁石でPFに導いていたため、第1偏向電磁石を下げたり上げたりするのに時間がかかっていた。新PF輸送路では、ECSの上流にPF輸送路専用の偏向電磁石 (BM\_58\_1)を設置し、新しく建設された輸送路にビームを導くこととした。この

BM\_58\_1には、約30秒で磁場を上げ下げすることができる偏向電磁石を用いた。PFへのビームはBM\_58\_1で新PF輸送路に入り、図1の赤い線を通してBH12で旧PF輸送路に合流する。

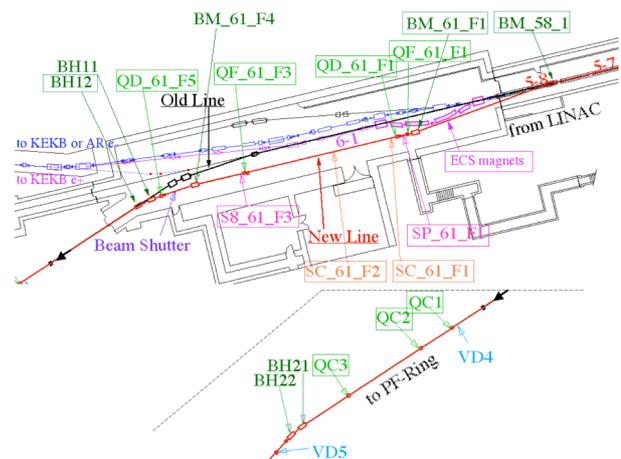


図1: LINACからの輸送路のレイアウト

2005年9月24日、新PF輸送路を通して初めてKEKBからPFへの運転切り替えを行った。切り替え時間のみにかかった時間は約2.6分であった。旧PF輸送路では5.3分かかっていたので、切り替え時間を約半分に短縮することに成功した。また、軌道のずれも水平方向で4mm以内、垂直方向では2mm以内に治まっており、PFリングへの入射率は25Hzで2mA/secと、非常に良い値を得た。

### 3. ECSからのもれ磁場の補正

LINACからのビームは、最初に曲げ角度の等しい、BM\_58\_1とBM\_61\_F1という2台の偏向電磁石を経て元のLINAC軌道と平行に戻される。ところが、当初2台の偏向電磁石は同じ強さではビームは平行にならず、BM\_58\_1を約1.5%強くしないと通らなかった。これはKEKB (e<sup>+</sup>)用のECSからのもれ磁場 (垂直方向上

<sup>1</sup> E-mail: naoko.iida@kek.jp

向き)からの影響のためであった。ECSの偏向電磁石は6台からなっており、1台目及び6台目はH型であるが、2台目から5台目まではC型であるため、PF輸送路の方向に磁場がもれやすい構造である。

### 3.1 ビームによるもれ磁場測定

BM\_61\_F1下流のスクリーンモニター(SC\_61\_F2)でECSがOn/Off時の水平方向の位置を観測したところ、その差は約12mmであった。このことから、ビームがECS電磁石に最も近づく場所に仮想磁場が存在するとすれば、その曲げ角度は約0.80mradで、積分磁場の強さは約67Gmであることが推測できる。又、ECSもれ磁場による四極成分の大きさを、以下のようにして見積もった。BM\_58\_1の磁場を変化させ、下流のBPM(SP\_61\_F1)での水平方向のビーム位置との関係を、直線フィットして傾きを算出する。ECSがOn/Offでの傾きの差がもれ磁場による四極成分である。結果は、傾きの差が $0.25 \pm 0.6$ m/rad、K値では $0.0030 \pm 0.0072$ /mとなり、誤差の範囲内で四極成分は無視できる。

### 3.2 ガウスメーターを用いたもれ磁場測定

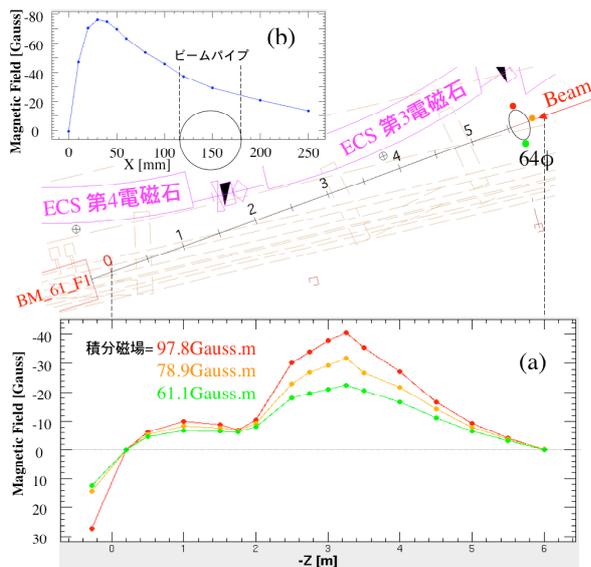


図2：ECSもれ磁場の測定結果

ガウスメーターを用いてECS付近のもれ磁場を測定した。結果を図2に示す。磁場は下向きを+とした。(a)はPFへの輸送路に沿ってECSに近いビームパイプ上を約6mに渡って0.5m(ECSに最も近い付近では0.25m)間隔で測定した結果である。赤・黄・緑の線はPF輸送路のビーム進行方向から見て、パイプの右・上・左の位置で測定したものである。ECS第3及び第4偏向電磁石からのもれ磁場が観測されている。図のZ座標で0より下流で磁場が逆符号になるのは、BM\_61\_F1からのもれ磁場の影響である。積分磁場の値はECSに近い方から順に97.8、78.9、61.1Gmであり、3.1で述べた約67Gmとほぼ一致する。

また、図2のビームパイプ側面右と左との積分磁

場の差より、四極成分を見積もった。ビームパイプ径が64mmであることから、K値は0.0069/mとなり、これも3.1の結果と誤差の範囲内で一致する。

ECSに最も近い場所でビームと直角な水平方向に沿ったもれ磁場も測定した。結果を図2(b)に示す。ECSのコイル端をX=0とした。X=0付近で磁場が0になっているのは、この場所でECSギャップ中の下向き磁場と、コイルの周りを回る上向き磁場とが相殺するからである。これより外では磁場はECSギャップ内と逆方向の上向き磁場となる。

### 3.3 磁場計算

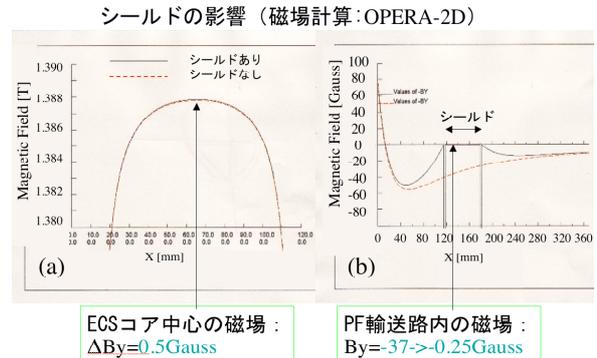


図3：ECS第2偏向電磁石による磁場計算結果

磁気シールドを施した場合に、シールドがECS内のKEKB(e+)ビームに及ぼす影響を磁場計算で確かめた。計算コードは、OPERA-2Dを用いた。シールドは0.6mm厚さの鉄1重とし、PF輸送路がECSに最も近い場所を想定した。計算結果を図3に示す。(a)はECS内の磁場、(b)はECSコイル外側の磁場で、いずれもコイルから水平方向外向きをX軸としている。(a)より、ECS内の磁場はシールドのある/なしで、1.388Tに対して0.5Gの差(0.0036%)しかなく、KEKB(e+)にはほとんど影響がないことがわかった。また(b)より、コイル外側の磁場は(a)のコイル内の磁場と逆方向であり、PF輸送路のビームパイプ内の磁場の大きさは鉄シールドによって37Gから0.25Gに減ることがわかった。

### 3.4 シールド後のビーム

実際のシールドは、以下のような2重構造とした。ビームパイプの直外に0.35mm厚さのミュンメタルを2重に巻き、その外部に0.6mm厚のボンデ鋼板をコの字型に曲げた物を2枚、上下が2重になるように重ねて設置した。数10G以上のもれ磁場は鉄によって遮蔽され、図3(b)の計算で残った0.25Gのような数10G以下の微少な磁場はミュンメタルによってシールドされることを期待した。

シールド後にビームを通した結果、ECSのOn/Offによって、スクリーンモニターSC\_61\_F2で水平方向に1mm以下の違いしか観測されなかった。ECSの第1偏向電磁石のみをOn/Offした場合とほぼ同じ動きであることから、第1偏向電磁石からのもれ磁場によるものと思われる。これは実験上全く問題ないが、

後日ミューメタルのみ第1偏向電磁石付近までシールドを延長した。また、PF輸送路の最上流偏向電磁石2台の磁場は設計通りの設定で軌道を真っ直ぐ通すことができるようになった。

#### 4. 分散関数の補正

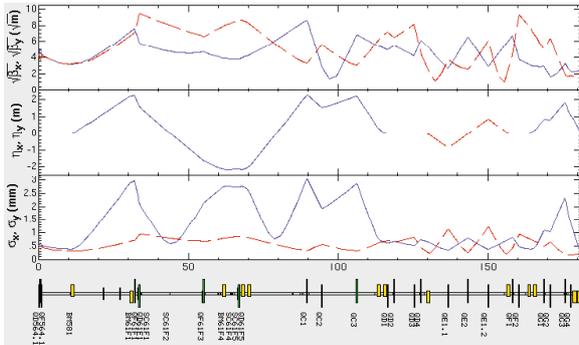


図4：設計のオプティクス・パラメーター

オプティクス計算は全てSADコード<sup>[3]</sup>を用いた。PF輸送路の設計オプティクスを図4に示す。上段から順に、 $\beta$ 関数、分散関数、ビームサイズ(エネルギー広がりを0.125%とした)を表し、青(赤)線は水平(垂直)方向に対する量である。これによると、水平方向の分散関数はSC\_61\_F2で0になるはずであるが、実際ビームをまっすぐ通した後にスクリーンモニターSC\_61\_F2でビーム位置を見ながらエネルギーを変えると、水平方向のビーム位置が数mm動く現象が観測された。これは分散関数が設計通り設定されていないことを意味する。四極電磁石のK値の絶対値に誤差があることが疑われる。以下に四極電磁石の補正係数測定について述べる。測定はBH12を境に上流と下流に分けて行なった。BH12より上流の四極電磁石は、新PF輸送路の改造のために新たに磁場測定を行って設置された。BH12より下流に設置されている四極電磁石とは、別の磁場測定装置で測定された励磁曲線によりK値を設定しているためである。

##### 4.1 BH12上流の四極電磁石補正係数測定

BH12上流の四極電磁石は4台(QF\_61\_F1, QD\_61\_F1, QF\_61\_F3, QD\_61\_F5)ある。全ての四極電磁石の隣にはBPMが設置されている。分散関数の測定にBPMのスケール誤差を入れないため、設計オプティクスではなく測定用オプティクスとして、QF\_61\_F3下流のBPM(S8\_61\_F3)で水平分散関数が0になるように設定した。S8\_61\_F3での分散関数は上流の四極電磁石3台で決定される。測定された分散関数を0に補正するような四極電磁石の補正係数を求めた結果、補正係数は0.9536となった。実際にこの値を用いて四極電磁石のK値を補正したところ、水平分散関数は、 $-0.00405 \pm 0.00146$ となり、誤差の範囲内で設定通り0となった。QD\_61\_F5の補正係数もこれらと同一であるとした。

##### 4.2 BH12下流の四極電磁石補正係数測定

BH12より下流の四極電磁石で水平分散関数が0で

ない領域に設置されている四極電磁石は3台(QC1, QC2, QC3)ある。BH12より上流の四極電磁石には4.1で求めた係数で補正したK値を設定した。オプティクスは図4で示した設計値を用いた。LINACからのビームエネルギーを $\pm 0.2\%$ の範囲で変えて全てのBPMでのビーム位置を測定し、変化の傾きを分散関数とした。測定された分散関数が設計分散関数に適合するように3台の四極電磁石のK値の補正係数をフリーパラメーターとして最小自乗法で求めた。補正係数が3台の四極電磁石で同一という拘束条件を課しても分散関数は設計通りにはならなかった。そこで、3台の補正係数が独立であると仮定した。結果を表1にまとめる。

	補正係数
BH12より上流の四極電磁石	0.9536
QC1	1.0127
QC2	0.9845
QC3	1.0782

表1：四極電磁石の補正係数

求めた補正係数をK値に乗じて設定した後、測定された分散関数を図5に示す。測定された水平分散関数(1段目:EX)と設計分散関数(3段目青線: $\eta_x$ )とがよく一致している。分散関数を設計通りに設定したことで、エネルギーのずれと軌道のずれが分離できビームの調整が円滑に行われるようになった。

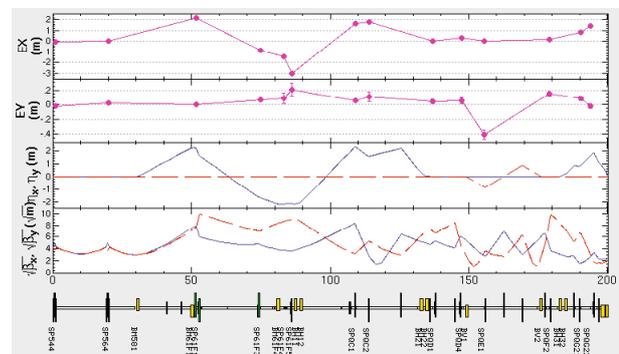


図5：補正係数に乗じた後、測定された分散関数

#### 5. まとめ

新PF輸送路を設計・建設した。実際のビーム運転では、設計値を電磁石に設定しても設計通りにならない。ECSによるもれ磁場の遮蔽、四極電磁石の補正係数を分散関数の測定により求めることにより、実際のオプティクスをより設計に近いものにし、ビーム調整が円滑に行われるようになった。

#### 参考文献

- [1] N.Iida, et al., "New Beam Transport Line from LINAC to Photon Factory in KEK", Proceedings of EPAC06
- [2] M.Satoh, et al., "The KEK Injector Upgrade for the Fast Beam Mode Switch", Proceedings of EPAC06.
- [3] Strategic Accelerator Design (SAD), URL: <http://acc-physics.kek.jp/SAD/sad.html>