

# BEAM TUNING FOR ATF2 BEAMLIN

Toshiyuki Okugi<sup>1A)</sup> and ATF International Collaboration

A) Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

The ATF2 is a test beam line for the final focus system of ILC. The beam operation of ATF2 beam line was started in 2009 February. We applied the first 1 week continuous beam operation only for ATF2 beam tuning in 2010 May. The beam optics at the continuous beam operation was used so called "High Beta Optics". In the continuous beam operation, we corrected matching, dispersion and coupling carefully, and we measured 310nm of the beam size by using IP-BSM.

## ATF2 ビームラインのビーム調整

### 1. はじめに

ATF は ILC (International Linear Collider)<sup>2</sup> を中心とした将来の加速器に必要とされるビーム計測技術および制御技術の開発研究をおこなう試験加速器で、ATF ダンピングリングで生成される電子ビームのエミッタンスは世界最小クラスであり、ILC で要求されるエミッタンスの値を満たしている。そして、ATF2 ビームラインは、ATF で生成された低エミッタンスビームを利用して、ILC の最終収束系の試験をおこなうために、旧来の取り出しラインを改良して建設されたビームラインのことである。

リニアコライダの最終収束系の試験は、1994年から SLAC において SLC の 45GeV 電子ビームを利用した FFTB(Final Focus Test Beam)で行われた。FFTB では設計値 47nm に対して約 70nm までビームを絞ることに成功した[1]。ATF2 ではダンピングリングで生成される低エミッタンスビームを利用することで、FFTB より 30 倍以上も低いビームエネルギーでありながら、FFTB の設計値と同程度の約 35nm までビームを絞ることができる。

ILC 最終収束系の光学設計も FFTB 当時から大きく変更された。そのため、新たなビーム光学系の試験を行うことも ATF2 の重要な研究対象である。現在の最終収束系は Local Chromaticity Correction と呼ばれるビーム収差を抑える技術を採用している[2]。また、ATF2 の最終収束ビームラインは、ILC と同程度の電磁石の設置精度や振動の許容値となるように、ILC の最終収束ビームラインをビームエネルギーで 250GeV から 1.3GeV にスケールダウンしたものである。従って、ATF2 の最終収束ビームラインを使って行われる各種のビーム調整技術は、ILC での最終収束系に必要とされる技術へと直結する。

ATF2 は、2008 年 2 月よりコミッショニングを開始した。その後 2010 年春の運転に至るまで、ハードウェア、および、ビーム調整技術が研究の主目的

であったため、測定器へのバックグラウンドの軽減などを考慮し、最終収束点でのベータ関数を設計値よりも High Beta Optics と呼ばれるビーム光学系を使っている。後述の 2010 年の連続運転では、水平、垂直方向ともベータ関数を設計値よりも 10 倍大きくしたビーム光学系を使った。

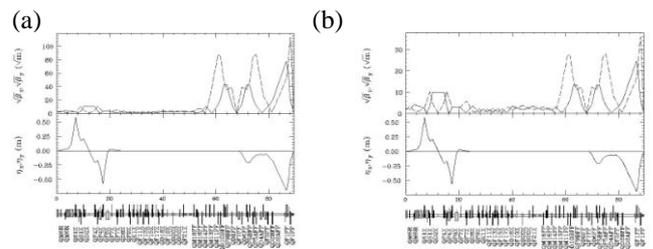


図 1 : ATF2 のビーム光学系 (a)設計ビーム光学系 (b)2010 年 5 月の運転に使用した High Beta Optics。

Parameters	Normal Optics	High Beta
Energy	1.3GeV	
$\gamma\varepsilon_x/\gamma\varepsilon_y$	5e-6m / 3e-8m	
$\varepsilon_x/\varepsilon_y$	1.97nm / 11.8pm	
$\beta_x^*/\beta_y^*$	4.0mm / 0.1mm	4.0cm / 1.0mm
$\sigma_x^*/\sigma_y^*$	2.8 $\mu$ m / 35nm	8.9 $\mu$ m / 109nm

表 1 : ATF2 の仮想衝突点のパラメータ

### 2. ATF2 ビームラインと調整方法

ATF2 は、主となる最終収束ビームライン、および、取り出しセクション、マッチングセクションと呼ばれる各セクションにより構成される。



図 2 : ATF2 のビームラインの全景。

<sup>1</sup> E-mail: toshiya.okugi@kek.jp

<sup>2</sup> <http://linearcollider.org/wiki/doku.php>

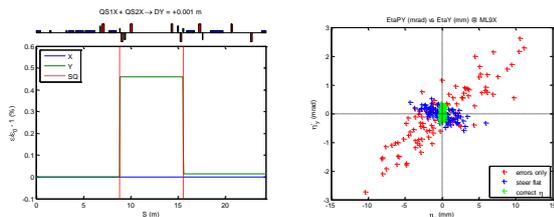


図3：ATF2でのDispersion補正。(a) sum-knobを使ったときのエミッタンス変化の例。(b)垂直方向Dispersion補正のSimulation。

## 2.1 取り出しセクション

取り出しセクションは、ダンピングリングから取り出されたビームのDispersionを補正して、Dispersion下流のビームラインに送るためのビームラインである。設計値としては取り出しセクション出口では、水平方向、垂直方向ともDispersionは無いのだが、実際にはダンピングリングからのDispersionの漏れ、四極電磁石の強さの設計値からの違い、軌道補正用コレクターの磁場などの影響で取り出しセクションの出口でDispersionが出来てしまう。

それを補正するために、取り出しセクションの最初にある偏向電磁石がつくるDispersionを利用する。水平方向Dispersionの補正は、四極電磁石QF1X、QF6Xの強さを変えて、垂直方向Dispersionの補正にはSkew四極電磁石QS1X、QS2Xでおこなう。しかし、Skew四極電磁石の強さを変えると、Dispersionだけでなく、カップリングも同時に生成してしまうため、ATF2では、2台のSkew四極電磁石は位相進度が $\pi$ で、同じベータ関数となる位置に置き、2台同時に同じ強だけ変えることで、Skew四極電磁石により生成されるカップリングを小さく抑える工夫をしている(sum-knob)[3]。図2(a)には、sum-knobとして2台のSkew四極電磁石を同時に同じ強さだけ動かしたときのビームラインに沿ったエミッタンスの変化を示している。1台目のSkew四極電磁石を通過したときカップリングによりエミッタンスが増大するが、2台目のSkew四極電磁石を通過した時には、2つのSkew四極電磁石のカップリングの効果が打ち消しあうことでエミッタンス増大を小さく抑えることが出来ていることがわかる。

ATF2ビームラインには、水平方向のDispersion補正にはQF1XとQF6Xという2個の調整knobがあるが、垂直方向の補正には一つのsum-knobしか調整knobが無い。しかし、取り出し領域の電磁石はほぼ全ての位相進度が $\pi$ の整数倍になるように置かれているので、取り出し領域で生成される垂直方向Dispersionもほぼ同位相になるので、同位相の1つの調整knobで調整可能である。図2(b)には、垂直方向Dispersion補正のSimulation結果を示した。Simulationでは、ATF2ビームラインの電磁石設置誤差を仮定してランダムに100種類の電磁石の誤差(偏向電磁石は垂直方向に0.1mm、四極電磁石は水平方向に0.05mm、垂直方向に0.03mm、回転方向に0.3mrad)があるビームラインを想定して、擬似的に補正を試みた。図2(b)の赤色は全く補正をおこなわ

ない場合の取り出し領域出口の垂直方向Dispersionを示す。次にステアリング電磁石で軌道補正すると青色のようになり、最後にsum-knobにより緑色にまで補正ができる。

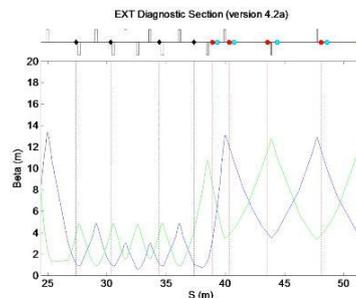


図4：ATF2のマッチングセクション。黒丸がSkew四極電磁石、赤丸がWire Scanner。

## 2.2 マッチングセクション

マッチングセクションは、取り出しセクションと、最終収束ビームラインのビーム光学系との間のマッチングをとるためのビームラインである。最終収束ビームライン内の電磁石は、基本的には設定を変えることは無く、最終収束点における電子ビームの収束率の調整や、カップリング、Twiss Parameterの補正はマッチングセクションでおこなう。

マッチングセクションには、最終収束ビームラインに入る前に、カップリングを補正する為の4台のSkew四極電磁石(QK1X-QK4X)とエミッタンス測定の為の5台のWire Scanner(MW0X-MW4X)が置かれている。カップリング補正は、まずQK1Xの強さを変えたとき、下流のWire Scannerで測定される垂直方向のビームサイズが最小になるQK1Xの強さを探し、その値にQK1Xの強さを設定する。次に、ビームサイズが最小になるQK2Xの強さを探すというように、垂直方向のビームサイズが最小になる4個のSkew四極電磁石の強さを探すことになる。

図3にカップリング補正のSimulation結果を示す。横軸は補正をおこなう回数を示している。4回でQK1XからQK4Xまで1回ずつ補正をおこなうことになる。Simulation結果から、それぞれのSkew四極電磁石を2回ずつスキャンすれば充分だとわかる。

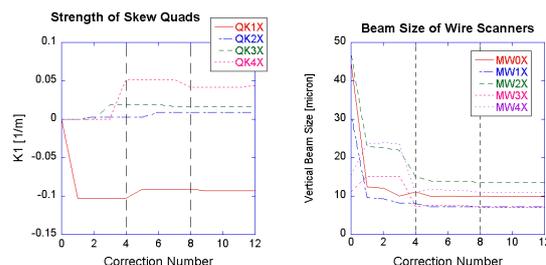
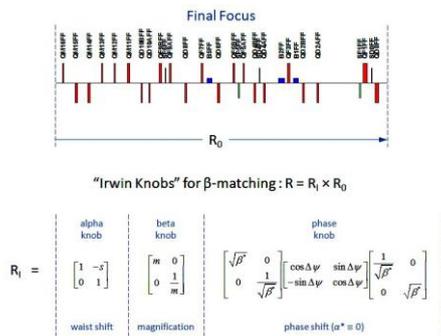


図5：ATF2でのカップリング補正。左図はSkew四極電磁石の強さの変化。右図は各Wire Scannerでの垂直方向ビームサイズの変化。

また、初期の仮想衝突点でのビームウエストの位置、電子ビームの収束率、仮想衝突点までの位相速度は Irwin Knob[4]を使って、適時、マッチングセクション内の四極電磁石の強さを変えることができる。Irwin Knob とは、マッチングセクションから焦点までの転送行列  $R_0$  に対して、仮想衝突点での  $\alpha$ 、 $\beta$ 、および、位相をずらす場合は、それぞれの  $R_I$  を乗じた転送行列になるように、マッチングセクションの四極電磁石(QM11FF-QM16FF)の強さを変える調整方法のことを言う。



### 2.3 最終収束ビームライン

ATF2 の最終収束ビームラインには5台の六極電磁石があり、これらの六極電磁石は、Chromaticity や Geometrical Aberration の補正に使われる。更に、六極電磁石の位置をムーバーで動かすことで、最終収束点におけるビームウエストの位置、Dispersion、カップリングの精密な調整が出来る。このようなビームウエストの位置、Dispersion、カップリングの調整 Knob のことを Multi-knob と呼ぶ。連続運転で使用した Multi-knob を表2に示す。

また、ATF2 の焦点には、ビームサイズを精密に測定するためのレーザー干渉計型のビームサイズモニター(IP-BSM)[5]が置かれている。

効果	調整	SF6FF	SF5FF	SD4FF	SF1FF	SD0FF
$\alpha_x$	$\Delta x$	700	0	0	-185	-300
$\alpha_y$	$\Delta x$	0	400	0	-160	-300
$\eta_x$	$\Delta x$	95	-175	0	100	-25
$\eta_y$	$\Delta y$	-60	0	-300	-230	300
$\langle x' y' \rangle$	$\Delta y$	0	0	0	0	60

表2：ATF2 の仮想衝突点のパラメータ

## 3. ATF2 連続運転

2009年2月よりATF2の運転を開始したが、ATF2での多くのビームタイムは、ハードウェア、並びに、ソフトウェアの開発に費やされていたため、ビーム調整のための纏まった時間をとることは難しい状態が続いた。

そこで、2010年の夏の運転休止期間前にATF2の調整だけをおこなう連続運転をすることを2009年の年末に決め、2010年のATF2のビームタイム全てを連続運転に必要な準備期間に充てることにし、2010年5月に1週間の連続運転をおこなった。

### 3.1 最終収束ビームラインまでの調整

連続運転の最初にダンピングリングの調整をおこなった。調整の結果、垂直方向エミッタンスを10pm前後まで絞った。連続運転でダンピングリング内での水平方向エミッタンスの測定はおこなわなかったが、円形加速器における水平方向エミッタンスは、ビーム光学系の設定で決まり、大きく変わるパラメータでは無く1.5-2.0nmであると考えられる。

その後、取り出しラインにおいて、Dispersion補正をおこなった。Dispersion補正後の最終収束ビームラインでのDispersionを図6に示す。丸が測定値で、実線が測定値からのフィットで求めたDispersionを示している。設計通り(図1)直線部では水平方向Dispersionが補正されていて、仮想衝突点付近で再びゼロとなっていることが分かる。また、垂直方向に関しても、最終収束ビームライン全ての場所で10mm以内に収まっている。

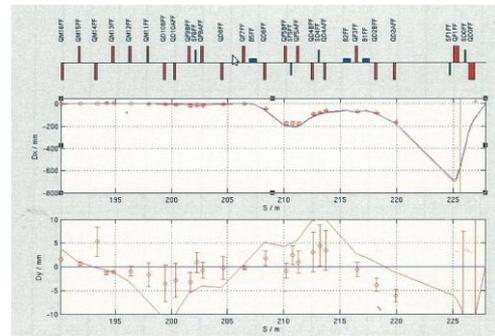


図6：連続運転でのDispersion補正結果。

次に、マッチングセクションで、エミッタンス、および、Twiss Parameterの測定をおこなった。測定結果を図7に示す。今回の連続運転では、カップリングの補正前でエミッタンスは水平方向が1.88nm、垂直方向が13pmとダンピングリングで測定された値に近い値を示したので、カップリングの補正はおこなわなかった。この測定されたTwiss Parameterを基に、仮想衝突点でのマッチングをとった。

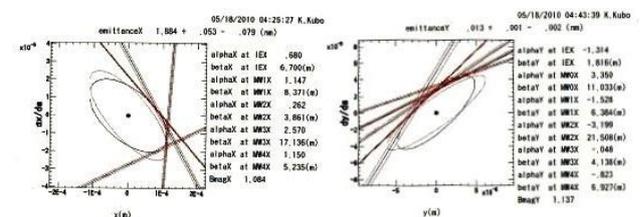


図7：連続運転でのエミッタンス測定の結果。

### 3.2 仮想衝突点でのビームサイズ調整

仮想衝突点でのビームサイズ調整は2段階に分けられる。第一段階としては、水平方向Dispersionの補正、水平垂直方向のビームウエスト補正、カップリング補正で、これは仮想衝突点に置かれたWire Scannerを用いておこなった。水平方向の

Dispersion の補正には、最終収束電磁石のうちの一つ QF1FF の強さを覚えて補正する。連続運転では QF1FF の強さを 0.7%下げたときに、仮想衝突点での水平方向 Dispersion が無くなった。次にビームウエストの補正をおこなった。

垂直方向のビームウエストの補正には、もう一つの最終収束四極電磁石 QD0FF の強さを覚えておこなう。QD0FF は、QF1FF とは違い、水平方向 Dispersion の依存性は少ないので、水平方向 Dispersion を変えることなく、ビームウエストの位置をずらすことができる。このように、水平方向 Dispersion、垂直方向のビームウエスト位置を最適化するように、最終収束電磁石の強さを決めたのち、最後に、水平方向のビームウエスト位置を Irwin Knob を使って補正した。

この段階では、垂直方向のビームサイズは 2-3 $\mu\text{m}$  と大きい値を示していたので、最後に、最終収束電磁石の Roll を回転させることで、カップリングの補正をおこなった。その結果、QF1FF の Roll とビームサイズとの依存性が非常に強く、角度を 4-5mrad 回転させたところで、Wire Scanner のワイヤーが切れてしまい、以後、Wire Scanner を使ってのビームサイズ測定が出来なくなった。

その後、第2段階の IP-BSM を使ってのビームサイズの最小化に移行した。IP-BSM でのビームサイズ調整には、Multi-knob の  $\eta_y$ ,  $\alpha_y$  knob と、カップリング補正の knob には、最初の1回目は Wire Scanner を使ったビームサイズ調整では充分補正しきれなかった最終収束電磁石の Roll を使い、2回目以降は Multi-knob の  $\langle x \rangle$  knob を使った。IP-BSM は、主に測定範囲は 300-1000nm の 8 度モード(3.8 $\mu\text{m}$  ピッチ)での測定となった。

連続運転における IP-BSM の測定では、IP-BSM のレーザーのドリフトなどの影響で、定期的に IP-BSM 自体の調整をおこなわなければ、数時間で正確なビームサイズを測定できなくなった。しかし、ビームサイズ調整における相対的な変化をみるのには、IP-BSM は長期的にも安定に動いたため、ビームサイズ調整中は、IP-BSM で測定されるビームサイズの相対値をモニターすることで各 knob の最適値を探し、正確にビームサイズを知りたいときには、IP-BSM の調整をするという使い方をした。

IP-BPM を使って、 $\eta_y$ ,  $\alpha_y$ 、カップリングの最適化を3回繰り返した後、個々の六極電磁石のムーバの水平方向位置をずらして、ビームサイズを測定したところ、ビームサイズは、それぞれの六極電磁石の位置に対して最小値となっていることが分かった(図8)。そこで、IP-BSM を注意深く測定したのちに、仮想衝突点でのビームサイズを測定したところ、図9のように、8 度モードで、モジュレーションが 0.87 という結果が出た。この測定されたモジュレーションから、ビームサイズを評価すると 310 +/- 30 (stat.) +/- 40 (syst.) nm となる[6]。

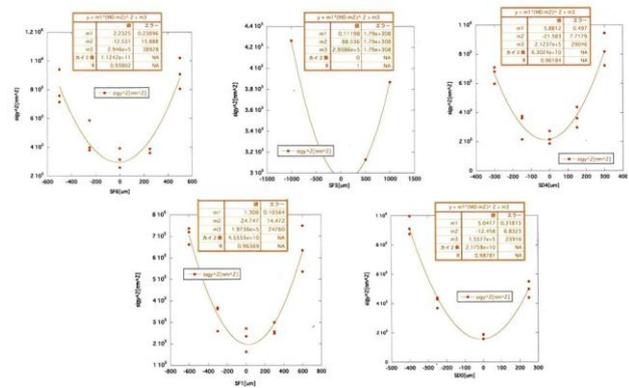


図8：仮想衝突点でのビームサイズの最適化の後、個々の六極電磁石を垂直方向に移動させたときのビームサイズの変化の様子。

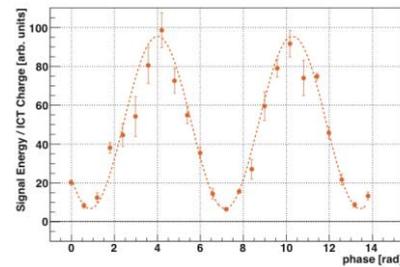


図9：連続運転での仮想衝突点でのビームサイズの最終結果。

### 3.3 連続運転の考察

2010年5月におこなわれた ATF2 の連続運転で、仮想衝突点におけるビームサイズは 310nm まで絞れた。しかし、期待されるビームサイズは 114nm であるので、測定されたビームサイズは、期待されていた値の 2.7 倍大きな値となっていた。

その原因として、最初に考えられるのは、仮想衝突点でのベータ関数のミスマッチである。しかし、初期の調整で仮想衝突点の 40cm 後ろに置かれている Wire Scanner を使ってビームサイズを測定した結果、水平方向は 100 $\mu\text{m}$ 、垂直方向は 50 $\mu\text{m}$  と期待されるビームサイズが測定されている。ベータ関数のミスマッチは大きい時には、この Wire Scanner で測定されるビームサイズにも大きなずれが生じるはずなので、仮想衝突点でのベータ関数のミスマッチは大きく無いと思われる。

次に考えられるのは、Chromaticity や Geometrical Aberration の補正が不完全だったことだが、Chromaticity や Geometrical Aberration の影響が大きく効いてくるのは 200nm 以下のビームサイズに対してであり、今回の測定では、そこまで小さくビームを絞れていなかったため、Chromaticity や Geometrical Aberration の影響は大きく無かったと思われる。しかし、今回の連続運転では、六極電磁石の強さに関する最適化はおこなっていなかったため、

次回以降の課題として挙げられる項目である。

更に、今回の連続運転では、仮想衝突点でのビームの位置を測定するモニターが用意できなかったため、ジッターの影響の有無を議論することは出来なかった。なので、次回以降の連続運転ではビームジッターを測定するモニターを用意する必要があると考えていて、その準備を始めている。

また、今回の連続運転において、最終的に最適となった最終収束電磁石の Roll は、QF1FF が+5.6mrad で、QD0FF が-0.1mrad であり、カップリングに効く、2つの電磁石の Roll の差は 5.7mrad と非常に大きいことがわかった。最終収束ビームラインに入る前では、カップリングの補正がおこなわれていたので、実際に最終収束電磁石 QF1FF、QD0FF の Roll 誤差があると思われる。また、アライメント自体は、mrad 以下の精度でおこなわれているので、このような大きな補正を要しなければならないということは、電磁石に何か不具合がある可能性も示唆される。特に、QF1FF の高次の磁場成分は、仮想衝突点のビームサイズ増大に最も敏感なので、最終収束電磁石の高次の磁場成分の再確認が必要だと考えられる。

また、先にも説明したが、今回の連続運転において IP-BSM の測定では、IP-BSM のレーザーのドリフトなどの影響で、定期的に IP-BSM 自体の調整をおこなわなければ数時間で正確なビームサイズを測定できなくなった。特に、最終日は気温が高く、1

日の温度変化が激しかったので、この影響は非常に大きかった。今後は IP-BSM のレーザーにフィードバックをかけるなどして、長期間にわたり正確なビームサイズを測定できるように改良を加える必要がある。

#### 4. まとめ

ATF2 は ILC の最終収束ビームラインの試験のために、非常に有益なビームラインである。2010 年 5 月に ATF2 のビーム調整のためだけのために 1 週間の連続運転をおこなった。この連続運転において、ビームを 310nm まで絞ることが出来たが、設計値の 114nm に比べると大きい値だった。ビームが大きくなってしまった理由はいくつか考えられるので、今後は、それらを慎重に調べて、より小さくビームを絞る必要があると考えている。

#### 参考文献

- [1] T. Shintake, Nucl. Instru. Meth., **A311** 455 (1992).
- [2] 奥木敏行「最終収束系の設計」OHO'06 13 (2006).
- [3] M. Woodley, 3rd ATF2 project meeting (2007).
- [4] N. Walker *et al.*, "Global Tuning Knobs for the SLC Final Focus", SLAC-PUB-6207 (1993).
- [5] 大録誠広, 第 6 回加速器学会年会 273 (2009)
- [6] Y. Kamiya *et al.*, Proceeding of IPAC'10, MOPE022 (2010)