

## COMMISSIONING STATUS OF ATF2 BEAM LINE

Toshiyuki Okugi<sup>1A)</sup> and ATF2 International Collaboration

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

### Abstract

The ATF2 is test beam line for the final focus system of ILC. The beam operation of ATF2 beam line was started in 2009 February, and the beam commissioning of ATF2 beam line was carried out with so called “High Beta Optics” in 2009 spring operation period. By using the High Beta Optics, we achieved the design vertical emittance at the entrance of ATF2 final focus section, and we made beam size smaller than the resolution limit of wire scanner at virtual IP.

## ATF2ビームラインのコミッショニングの現状

### 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な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のことで、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、既存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。

リニアコライダー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FFT(B) (Final Focus Test Beam)で行われた。FFT(B)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、FFT(B)より30倍以上も低いビームエネルギーでありながら、FFT(B)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FFT(B)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-FF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なとされる技術へと直結する。

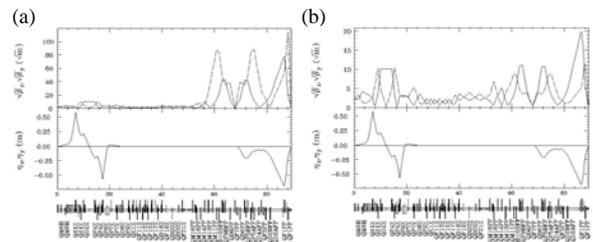


図1：ATF2のビーム光学系 (a)設計ビーム光学系 (b)2009年5月の運転に使用したHigh Beta Optics

Parameters	Normal Optics	High Beta
Energy	1.3GeV	
$\gamma\epsilon_x / \gamma\epsilon_y$	5e-6m / 3e-8m	
$\epsilon_x / \epsilon_y$	1.97nm / 11.8pm	
$\beta_x^* / \beta_y^*$	4.0mm / 0.1mm	8.0cm / 1.0cm
$\sigma_x^* / \sigma_y^*$	2.8 $\mu$ m / 35nm	12.6 $\mu$ m / 0.34 $\mu$ m

表1：ATF2の仮想衝突点のパラメータ

### 2. High Beta Optics

ATF2ビームラインは、2009年2月より運転が開始され、2009年3月まではデバイス調整を中心に運転をおこなった。そして、2009年4月、5月の運転では、線形ビーム光学系を理解するために六極電磁石を使わなくてもクロマチシティ等の影響が少なくなるように、仮想焦点でのビームサイズを極端に絞らないビーム光学系を使った (High Beta Optics)。また、焦点でビームを極端に絞ると、その周辺でのビームサイズが大きくなるため、IP-BSM (IP Beam Size Monitor) [3]の測定器にバックグラウンドが増える。現在はIP-BSM自体もコミッショニング段階なので、IP-BSMの測定器のバックグラウンドが少なくなるビーム光学系が現段階では利点が大いということも、2009年春の運転で仮想焦点でのビームサイズを

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

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

極端に絞らないビーム光学系を使う大きな理由となった。ATF2のビーム光学系の設計値とHigh Beta Optics を図1に示した。また、双方ビーム光学系の仮想衝突点でのパラメータを表1に示した。

2009年春の運転はHigh Beta Optics を使ったため、ビーム調整は最終収束ビームラインに入るまでのDispersion補正、カップリング補正、最終収束ビームラインへのマッチングなどに主眼を置いた。仮想衝突点でのビームサイズ調整は、仮想衝突点におかれたIP-BSMが調整中のため、仮想衝突点下流約40cmに置かれたWire Scannerを使っておこなった。

### 3. 最終収束ビームラインまでの調整

#### 3.1 Dispersion 補正

ATF2ビームラインの最初にはビーム取り出しのための偏向電磁石により水平方向にDispersion がある取り出し領域がある。水平方向Dispersionの補正は、この取り出し領域に置かれた四極電磁石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でおこなうように設計されている。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、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台同時に同じ強さだけ変えることで、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(sum-knob) [4]。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に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カップリングの効果が打ち消しあう様子が分かると思う。

しかし、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が無いが、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は、ほぼ同位相になる。そのため、同位相の1つの調整knobで調整可能になる。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。

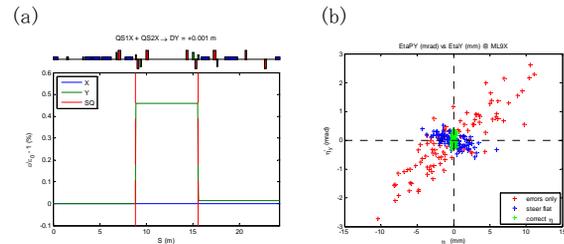


図2：ATF2でのDispersion補正。(a) sum-knobを使ったときのエミッタンス変化の例。(b)垂直方向Dispersion補正のSimulation。

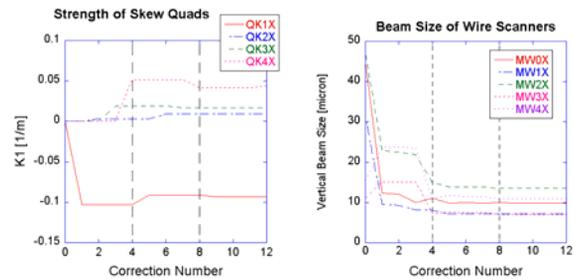


図3：ATF2でのカップリング補正。左図はSkew四極電磁石の強さの変化。右図は各Wire Scannerでの垂直方向ビームサイズの変化。

#### 3.2 カップリング補正

ATF2ビームラインには、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)とが置かれている。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、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にはカップリング補正の典型的な例を示す。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ったことになる。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。

#### 3.3 2009年春のビーム調整

2009年5月の運転で垂直方向エミッタンスを最も小さく調整できた5月25日の結果を図4に示した。5月25日には、垂直方向Dispersionはsum-knobだけを使って調整できた。また、カップリングはQK1Xの強さを変えるだけで調整が出来た。エミッタンスが最小となるQK1X=-5.11Aのとき、水平方向エミッタンスは1.7nm、垂直方向エミッタンスは11pmで、ATF2の設計エミッタンスの値まで小さくできた。

しかし、運転の条件、特にダンピングリングから漏れてくるDispersionの値によっては、垂直方向のDispersionがsum-knobだけでは補正しきれなく、Dispersion補正のための2つのSkew四極電磁石を違った強さに設定しなければならない場合がある。そのときは、Dispersion補正のためのSkew四極電磁石で生成されるカップリングが大きく、QK1X-QK4Xでは完全にカップリングが補正がしきれず、垂直方向のエミッタンスが設定値の2倍から3倍大きくなることもあった。そのため、今後はダンピングリングからのDispersionに対する許容値を広げる工夫が必要であると考えている。

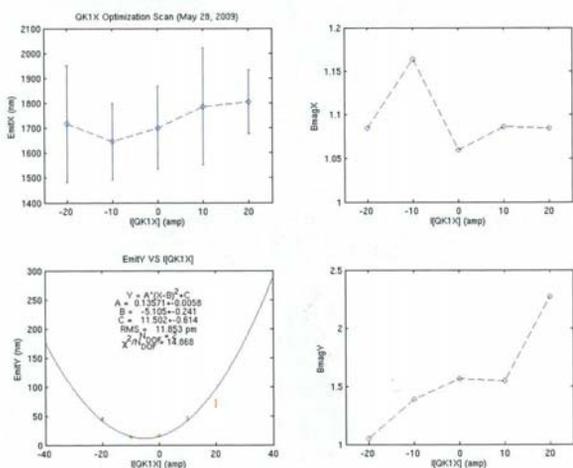


図4：2009年5月25日のビーム調整後のエミッタンス測定結果。

#### 4. 仮想衝突点におけるビームサイズ調整

2009年春の運転では、前述のようにIP-BSMがコミショニング中のため、ビームサイズ調整に使うことが出来なかった。そのため、ビームサイズ調整は主に仮想衝突点下流約40cmに置かれたWire Scannerを使っておこなった。ビーム調整の方法は、まず最初に仮想衝突点でビームサイズが設定値になるようにマッチングをとった。その後、2台の最終収束四極電磁石(QF1FF, QD0FF)の強さを変えて、ビームの焦点を仮想衝突点から下流のWire Scannerに移動させた。

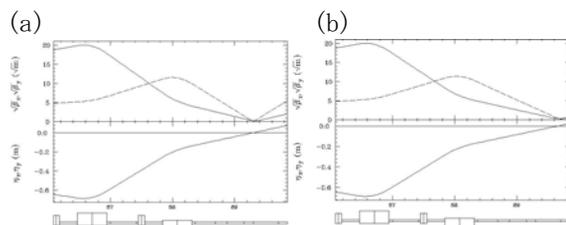


図5：仮想衝突点付近のビーム光学系。(a)焦点を仮想衝突点に置いたとき。(b)焦点を下流のWire Scannerに置いたとき。

Wire Scanner上に焦点を合わせたときのビームサイズは、水平方向が $11.4 \mu\text{m}$  (設定値 $11.4 \mu\text{m}$ )で、垂直方向が $4.1 \mu\text{m}$  (設定値 $0.73 \mu\text{m}$ )だった。水平方向は設定値どおりだったが、垂直方向はwireの太さ(直径 $10 \mu\text{m}$ )の効果を考慮しても、若干大きな値を示した。次に、焦点を仮想衝突点に戻した状態でWire Scannerでビームサイズ測定をおこなった。測定された垂直方向のビームサイズは $20.4 \mu\text{m}$  (設定値 $21.1 \mu\text{m}$ )だった。焦点を仮想衝突点に移動させたときのビームサイズには大きな違いは無かったので、マッチング自体には大きな間違いは無いが、焦点付近でビームサイズが膨れてしまっていることが分かり、焦点付近での微細なビームサイズ調整が必要であることを示唆していた。

ATF2の焦点でのビームサイズ調整は、ILCと同じ方式で六極電磁石をムーバーで動かすことでおこなう(Multi-knob)。しかし、High Beta Opticsでは非線形の効果が少ないので六極電磁石は使う必要がないので通常は使っていない。また、この調整方法はビームサイズが大きいHigh Beta Opticsでは必ずしも必要ではない。しかし、将来的に仮想衝突点でビームサイズを更に絞るためには必要不可欠な技術である。そこで、ビームサイズ調整の試験のため、六極電磁石に磁場をかけて、ATF2本来の調整方法を試した。結果は、現段階では衝突点付近のパラメータ、特に垂直方向Dispersionが大きく、Multi-knobの調整範囲を超えてしまっていたので、Multi-knobだけでは調整しきれなかった。しかし、Multi-knob自体は予想どおりの働きをすることが確認できた。そこで、最終収束ビームラインにはいる水平、垂直方向のDispersion、Twiss parameterなどを微調することで、Wire Scannerの測定限界である約 $3 \mu\text{m}$ まで垂直方向ビームサイズを小さくすることができた。

#### 5. まとめ

2009年2月からATF2ビームラインの運転が開始され、2009年3月まではデバイス調整を中心に運転をおこない、2009年4月、5月の運転ではHigh Beta Opticsと呼ばれるビーム光学系を使って運転をおこなった。最終収束ビームラインの入口でのエミッタンスは設計値まで調整でき、仮想衝突点下流のWire Scannerでは、モニターの測定限界までビームサイズを小さくできた。今後は、IP-BSMのコミショニングと平行して、より精度の高い、より小さいビームサイズへと調整を進める予定である。

#### 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] 大録誠広, 第6回加速器学会年会 273 (2009).
- [4] M. Woodley, 3rd ATF2 project meeting (2007).