

## 解 説

## 先端加速器試験装置 (ATF) における R&amp;D の現状

照沼 信浩<sup>\*1</sup>・内藤 孝<sup>\*2</sup>・奥木 敏行<sup>\*2</sup>・久保 浄<sup>\*2</sup>・  
黒田 茂<sup>\*2</sup>・荒木 栄<sup>\*2</sup>・田内 利明<sup>\*2</sup>・浦川 順治<sup>\*2</sup>

## Recent Status of the Research and Development at the ATF

Nobuhiro TERUNUMA<sup>\*1</sup>, Takashi NAITO<sup>\*2</sup>, Toshiyuki OKUGI<sup>\*2</sup>, Kiyoshi KUBO<sup>\*2</sup>,  
Shigeru KURODA<sup>\*2</sup>, Sakae ARAKI<sup>\*2</sup>, Toshiaki TAUCHI<sup>\*2</sup>, and Junji URAKAWA<sup>\*2</sup>

## Abstract

Accelerator Test Facility (ATF) of KEK is a research center for studies on issues concerning the injector, damping ring, and beam delivery system for the ILC. The ATF damping ring reduces the vertical emittance of the beam down to 4 pmÅrad. ATF2 is a final-focus test beam line that aims to focus the low emittance beam from the damping ring to a vertical size of about 37 nm and to demonstrate the nanometer level beam stability, using numerous advanced beam diagnostics and feedback tools. These tools have been developed through R&D at the ATF, and applied for the newly constructed ATF2 beam line. Further improvements will be continued in parallel to the commissioning of the nanometer beam focus. A large number of scientists from SLAC, LBNL, FNAL, Oxford University, DESY, CERN, UCL, LLNL, IHEP, PAL, RHUL and Japanese universities participated in research programs at the ATF/ATF2.

## 1. はじめに

KEK における ATF<sup>1)</sup> (先端加速器試験装置) では、国際リニアコライダー (ILC) 計画<sup>2)</sup> など将来の加速器で必要とされるビーム計測技術およびビーム制御技術の開発を行っている。現在の ATF はマルチバンチビーム生成を行う photocathode RF gun, 1.3 GeV S-band Linac, 低エミッタンスビームに変換するダンピングリング, そのビームを利用し ILC 最終収束システムの開発試験を行う ATF2 ビームライン<sup>3)</sup> から構成されている (図 1)。ATF2 ビームラインは 2009 年より運転を開始している<sup>4)</sup>。

ATF は 1996 年のダンピングリング稼働以来, 4 pm の垂直エミッタンスの達成を初め, 様々なビーム計測機器や制御機器<sup>5,6)</sup> を開発してきた。現在, ATF における主要な開発目標は ILC 設計の進展に伴い次のようにまとめられる。

1. 2 pm の低エミッタンスの実現
2. ナノ秒高速キッカーの開発・実証試験
3. 垂直方向 37 nm の極小ビームの実現
4. ナノメートルレベルのビーム位置安定化

前半はダンピングリングとその取り出し系の開発研究であり, 後半は ATF2 ビームラインにおける開発研究である。これら主要テーマと同時に関連する周辺技術開発も行っている。

ATF はこのように多岐に渡る先端的研究開発を行う非常に魅力的な加速器施設であり, 国内外の大学および研究機関から多くの研究者が開発研究に参加している。この国際的な研究活動を支えるため, MoU (Memorandum of Understanding) に基づく International Collaboration<sup>7)</sup> が立ち上げられている。現在までに 25 の研究機関が MoU に署名しており, この体制の下, 海外から訪れる共同研究者は年間で延べ 2000 人・日を超える。大学院生も多く参加しており, 若手研究者の育成に国際的にも大きく貢献している。海外からは人材貢献に加えて, 測定装置やビームライン構成機器などの物的貢献 (In-kind contribution) も行われている。例えば, ATF2 ビームライン建設のために, 多くの電磁石, Cavity BPM, 電磁石電源などが持ち込まれている。

ATF 加速器の運転は年間で 21 週間である。夏期と年末年始の停止を除き, 2~3 週間のビーム運転後に 1

\*1 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization  
(E-mail: nobuhiro.terunuma@kek.jp)

\*2 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization

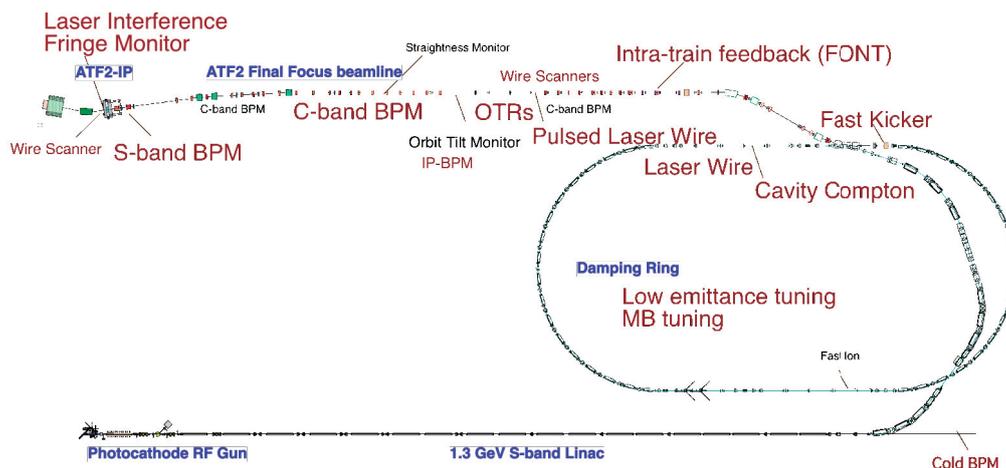


図1 ATF 構成と最近の開発研究



図2 ATF ダンピングリング



図3 ATF2, 最終収束システム試験ビームライン

週間の保守期間を設け、それを繰り返す。先端加速器技術開発を目的としている ATF にとって、この保守期間は故障機器の修理のみならず、ビームライン上の研究装置の準備・改善・問題調査などに使われており、効率良く研究を進める上で必須のものとなっている。ビーム運転時間のおおよその配分は、ATF2 開発研究に 50%、電子銃からダンピングリングまでの開発研究に 30%、その他の加速器調整に 20%、としている。

## 2. ビーム生成・制御技術開発

### 2.1 ATF の電子ビーム構造

ATF の電子ビームはパルスあたり 1 ~ 20 個のバンチで構成されるマルチバンチ (このパルスあたりのバンチ列をトレインと呼ぶ) であり、高量子効率の Cs<sub>2</sub>Te フォトカソードを用いた S-band 高周波電子銃により生成される<sup>8)</sup>。電子ビームはカソードに照射するレーザー光のバンチ構造と強度に従って生成される。ATF では二つの繰り返しの異なるレーザーが設置され

ており、それぞれ 2.8 ns 間隔 1 ~ 20 バンチ、または 5.6 ns 間隔 1 ~ 10 バンチの電子ビーム生成に使われている。どちらの場合でも開発研究に必要な十分な強度の電子ビームを生成できる。通常の運転ではバンチあたりの電子数  $1 \times 10^{10}$  個のマルチバンチビームを 1.56 Hz の繰り返しで生成している。

生成された電子ビームはリニアックで 1.3 GeV まで加速され、ダンピングリングに入射後に低エミッタンスビームとなり、ATF2 ビームラインへと取り出される。この際、リングでは最大 3 トレインまで蓄積することが出来る。リングから取り出される電子ビームの構造は、(1) 電子銃で生成されたものと同じバンチ列構造 (2) 154 ns 間隔での連続 3 バンチの二つのモードがある。これらは立ち上がり 60 ns で flat-top 約 300 ns の通常型のパルスキッカー電磁石を使用して実現される。このキッカーシステムは安定度を改善するためにダブルキッカー構成<sup>9)</sup> (1 台の電源で Phase Advance が  $\pi$  離れた位置の 2 台のキッカー電磁石を駆動する) となっている。最近ではこれらに加えて、ナノ秒高速

キッカーによる (3) 308 ns 間隔での連続 30 バンチの取り出し, を実用化に向けて試験している.

## 2.2 ナノ秒高速キッカー (Fast Kicker)

ナノ秒で高速に立ち上がるビームキッカーは, ILC ダンピングリング (DR) に必須の技術である. ILC では例えば 308 ns 間隔で 2820 個のバンチがトレインを構成し, その長さは約 260 km にも及ぶ. その為, リング内にバンチ間隔を圧縮した状態で蓄積して, リング周長を抑える必要がある. 他の周回しているバンチに影響なく目的のバンチの入射・取り出しを行うためにナノ秒の立ち上がり・立ち下がりを持つキッカーが必要となる. 例えば, 繰返し 3 MHz, キックパルスの立ち上がり 6 ns 以下となる.

KEK では, 複数のストリップライン電極に半導体パルサーの高速パルスを押加することによって高速・高繰り返しのビーム蹴り出しを実現する方式を提案・開発を行ってきた. 既に, ストリップラインを用いたビームでの基礎試験では 2.2 ns / 2.4 ns の立ち上がり / 立ち下がり時間を実現している<sup>10)</sup> (図 4). この結果を踏まえて, 現在の ILC 計画ではこの KEK 方式のキッカーを採用することを前提に設計が進められており, DR の周長は 6.7 km になっている.

ATF では上記の基礎試験をさらに進めて, 実際にビームをリングから取り出すシステムを開発を進めている. ILC-DR での入出射キッカーシステム開発のための実証・評価, さらに ATF2 実験における連続バンチビームの利用を狙う.

ATF-DR からのビーム取り出しでは, 既存のパルス

電磁石キッカーと同じ 4.6 mrad のキック量が必要であるが, 与えられるスペース内で実現できるストリップラインのキック量は最大 1.5 mrad である. そのため図 5 の様な補助システムを開発した. ビーム取り出しに合わせて DR 内に local bump を作り, さらに下流に薄いセプタム導体 (1.6 mm) の補助 (Auxiliary) Septum magnet を設置して不足分を補う. ストリップラインは電極長 60 cm のものが 2 組 (電極間 9 mm と 11 mm) 設置されている. それぞれ左右の電極に正負のパルス電圧をかける. このパルス電源には FID 社の FPG10-3000KN (10 kV, 4 ns パルス幅) が合計 4 台使用されている. この電源とストリップライン電極の組み合わせで実現されるビームに対する Kick Field の立ち上がりは, 5 ns 以下であり, 蹴り出すバンチの直前

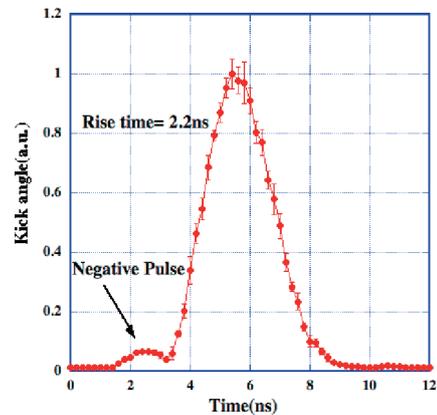


図 4 ナノ秒高速キッカーの立ち上がり試験: ダンピングリング周回ビームを蹴り, 振動振幅よりキック量を評価した

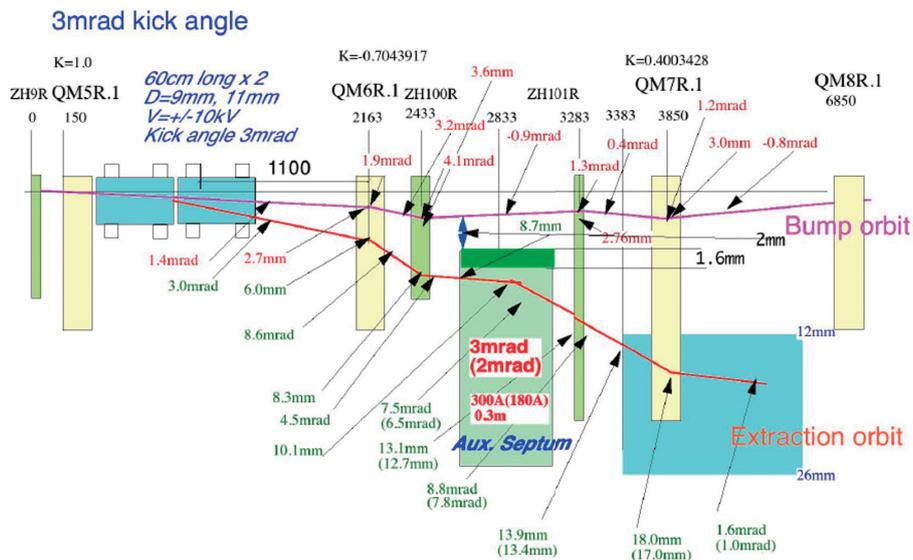


図 5 ナノ秒高速キッカーによるビーム取り出し軌道

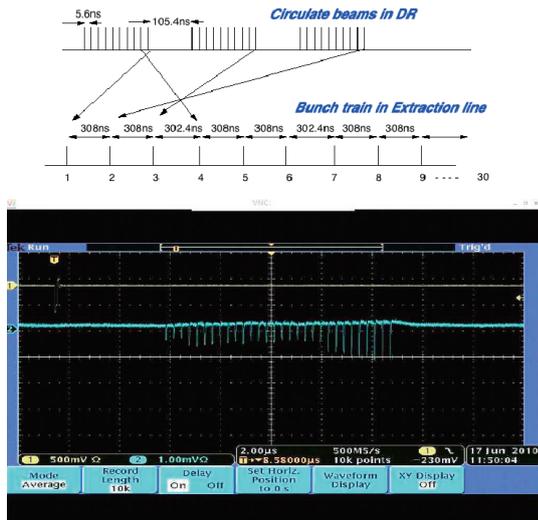


図 6 ナノ秒高速キッカーにより DR から取り出されたマルチバンチビーム (308 ns 間隔)

Results of P2 → K1 loop (measured)

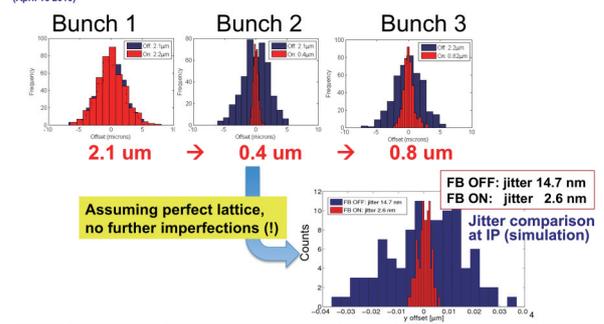


図 8 Intra-train 高速フィードバック (FONT) によるバンチ位置補正

て、ダンピングリングでのマルチバンチ蓄積が不安定であった。その為、取り出されたビーム強度が弱く、またバンチごとの強度も一定していない。今後、この原因の解明と対策を講じ、ビーム強度が安定した状態での運用試験を進める。

取り出されたビームの軌道解析から、本システムの安定度が評価されている。測定はシングルバンチで行い、各 shot ごとに Kick 角を評価した。ビーム位置の測定には ATF2 ライン上の高分解能 Cavity BPM を用いている。得られた安定度は  $3.5 \times 10^{-4}$  であった。これは現ダブルキッカーシステム (パルス電磁石) によるものと同程度の良い安定度である<sup>11)</sup>。

2.3 Intra-train 高速フィードバック開発

ILC 衝突点でのナノメートルサイズの電子と陽電子の衝突を維持するために、相対的なバンチ位置を補正する高速フィードバック技術が重要である。また、ビームラインにおける振動の影響を補正し、仮想衝突点 (ATF2-IP) においてナノメートルレベルでビーム位置を安定化させることは、ATF2 の重要な技術開発目標である。図 7 に ATF で試験中のシステム構成を示す<sup>12)</sup>。連続したマルチバンチビームにおいて、先頭バンチの位置を検出し、後続するバンチ位置を 140 ns 以下の高速で補正することを目指している。試験装置は ATF2 上流の取り出しライン部に設置されており、ATF2 最終収束ビームラインに入射する前のバンチを補正する。現在は通常のパルスキッカー電磁石で取り出される 154 ns 間隔の連続 3 バンチで試験している。

先頭バンチ位置を検出して後続バンチを補正 (蹴る) するまでに要する時間は 133 ns を実現している。図 8 に最新の結果を示す。フィードバック無しでは 3 バンチ共に  $2\mu\text{m}$  のジッターであるが、フィードバックをかけることで第 2 と第 3 バンチのジッターが 0.4, 0.8  $\mu\text{m}$  に改善されている。仮にこのフィードバックの状

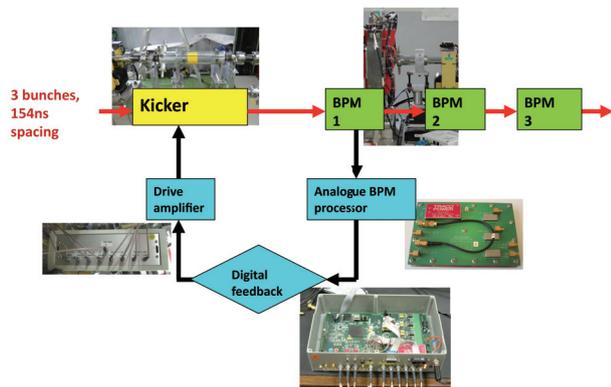


図 7 ATF における Intra-train 高速フィードバック構成

(5.6 ns 間隔) を周回しているバンチには影響しない。ATF2 でのマルチバンチ利用では、現在の 3 バンチより多くのバンチを連続で取り出すことを想定している。図 6 に示す様に、5.6 ns 間隔 10 バンチ、3 トレイン、合計 30 バンチのビームを ATF-DR 内に蓄積する。これらをストリップラインキッカーを用いて、各トレインの最終バンチから順に取り出し (308 ns 間隔)、トレインを一巡したところで 5.6 ns タイミングをシフトさせ繰り返す。結果、ほぼ揃った間隔で連続 30 バンチのビームを取り出せることになる。この高速キッカーによるビーム取り出しは、昨年 10 月に成功した。幾つかの改良を経て、本年 6 月に再試験を行い、連続した 30 バンチ (308 ns 間隔) の取り出しを観測し、システムが期待通りに動作していることを確認した。ただ残念なことに、この試験中におい

態でビームが仮想衝突点まで（理想的に）他のエラー無く転送されたとした場合、衝突点でのジッターは15 nmから3 nmに軽減されると期待される。実際は、ATF2 ビームラインでの床振動などの影響を受けると考えられる。そのため、仮想衝突点でのナノメートルレベルの位置安定化技術開発では、(1) リングから取り出したビームを、現システムを用いてATF2 入射前に補正、(2) 仮想衝突点では高分解能 IP-BPM を用いて本フィードバックを形成し、ATF2 ビームライン上の床振動などの影響を補正する、ことを検討している。加えて、前述の高速キッカーで取り出される連続した30パンチのビームを用いた安定化試験を行う計画である。

### 3. ビーム診断装置開発

#### 3.1 高分解能ビーム位置モニター

ATF ではナノメートル位置分解能を実現する空洞型ビーム位置モニター (Cavity BPM) 開発を行い、ビームによる試験で分解能17 nmを確認した<sup>13)</sup>。この高分解能 BPM は、ATF2 ビームラインの主たる BPM として合計38台が導入されている (図9)。このシステムの実践的運用も ATF における R&D の一部と言える。実際、ATF2 ビームラインの調整と平行して整備・改善を行ってきた。要求された分解能は ILC でのシステム運用を想定して100 nmとした。いくつかの BPM ユニットでは信号伝送系の改善が必要であるが、現在までに20 nmの位置分解能をビームで確認している。一方でこれらとは別に、仮想衝突点での位置変動測定やフィードバックを行うために、2 nm 分解能を目指す Cavity BPM (IP-BPM) の開発が進められている。試作システムのビーム試験では、8.7 nmの分解能を実現している<sup>14)</sup>。現在は読み出し回路開発に重点を置き、ATF2 ビームライン上で試験を継続している。

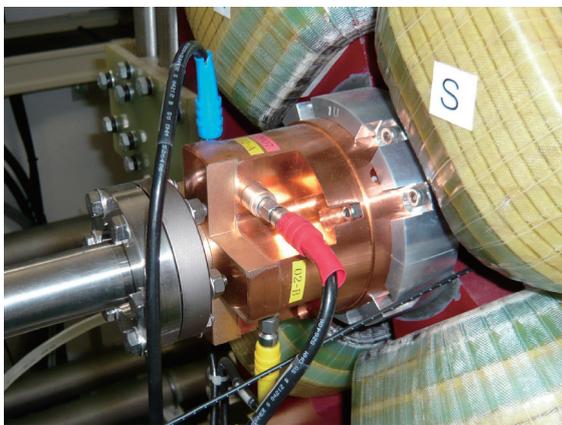


図9 ATF24極電磁石に取り付けられた Cavity BPM (C-band)

一方、ダンピングリングの BPM システムでは、読み出し回路系の高性能化<sup>15)</sup>が本年6月に行われている。これは、ILC-DR で想定されている2 pm エミッタンスを実現するために、高精度の位置情報によるビーム調整が必要なためである。従来の One path/one shot 測定に加えて高分解能 Narrow band mode での測定、turn by turn での位置測定が可能となり、高精度で多彩なビーム軌道調整が期待される。

#### 3.2 ビームサイズモニター

ダンピングリングの低エミッタンスビーム調整では、ATF で開発されてきたビームサイズモニターが活躍している。シンクロトロン放射光 (SR) 干渉モニター (SRIF)<sup>16)</sup> と X 線領域の SR モニター (XSR)<sup>17)</sup> は相補的にリアルタイムのビーム調整に使われている。レーザー蓄積 Cavity を利用したレーザーワイヤー (LW)<sup>18)</sup> は一回の測定に数分かかるが、電子ビームをレーザーで直接スキャンするため、最終的なエミッタンス評価に用いられている。

リングから取り出されたビームのエミッタンス測定はワイヤースキャナー (それぞれ直径10  $\mu\text{m}$  と7  $\mu\text{m}$  のタングステンとカーボンワイヤー使用)<sup>19)</sup>で行っており、測定には多数のビームパルスが必要で数分かかっている。これをパルスごとにリアルタイムに測定できるように Optical Transition Radiation (OTR) を利用した二次元プロファイルモニター<sup>20)</sup>の開発が始められている。また、非破壊型ビームサイズモニターで、ILC 仕様である1  $\mu\text{m}$  分解能を目指すレーザーワイヤー<sup>21)</sup>の開発も行われている。現在までのビーム試験で分解能2.2  $\mu\text{m}$ を達成している (図10)。

ATF2 の目標の一つである垂直方向37 nmの極小ビームの測定は、レーザー干渉縞を利用したモニター (IP-BSM, 通称新竹モニター) で実現される<sup>22)</sup>。このモニターは、SLAC での FFTB 実験で開発・実証されたもので、ATF2 では幾つかの改造を加えている<sup>23)</sup>。

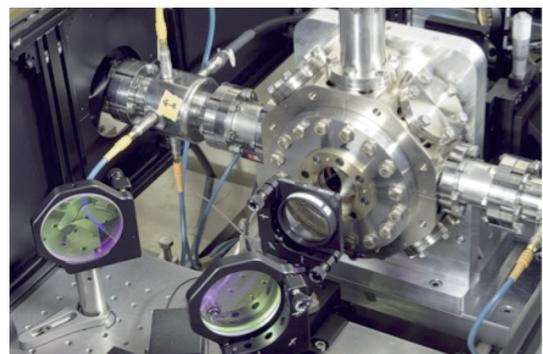


図10 Pulsed laser wire at ATF2

図 11, 12 にシステム構成概念を示す. 仮想衝突点におけるビームサイズは, レーザー干渉縞と電子ビームの相対位置を変えることで得られる逆コンプトン散乱信号の変調 (modulation) から求めることができる. レーザーの波長は ATF2 のビームで測定感度が高くなるように FFTB の半分 532 nm に変更された. また, FFTB では干渉縞は固定でビームを動かして profile scan していたが, ATF2 では干渉縞を動かして scan 出来るようになっている. 干渉縞のピッチで測定できるビームサイズの範囲が制限されており, ビーム調整状況に応じてレーザーの交差角を変える必要がある. レーザー交差角は FFTB での  $174^\circ$ ,  $30^\circ$  に加えて, 新たに  $8^\circ$  から  $2^\circ$  の可変モードが追加された. これにより垂直方向のビームサイズ測定が 20 nm から  $5\mu\text{m}$  の広範囲で可能となり, 今までのワイヤスキャナーの測定限界 ( $3\mu\text{m}$ ) までカバーすることができる.  $\gamma$  線検出器は多層の CsI (TI) からなり, コンプトン  $\gamma$  線とバックグラウンドによるものとのシャワーの拡がり方の違いを利用して, バックグラウンドからの寄与を低減する解析方法も導入されている.

このモニターの立ち上げは 2009 年からレーザーワイヤモード (レーザービームの一方を用いたもの) で開始された<sup>24)</sup>. ビームラインの調整が始まったばか

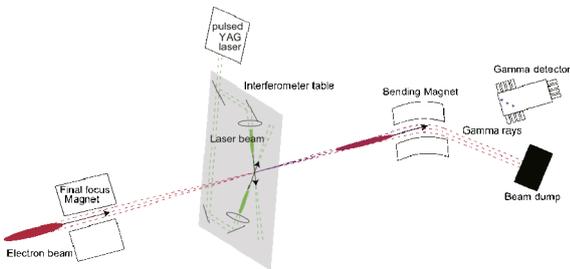


図 11 ATF2 レーザー干渉縞型ビームサイズモニター配置

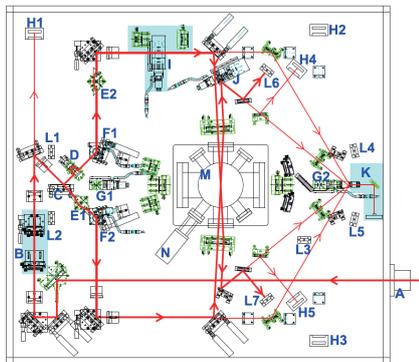


図 12 ATF2 レーザー干渉縞型ビームサイズモニター. 100 nm 以下の測定で使用するレーザー交差角  $174^\circ$  のモードを例示している

りでビームサイズも  $5\mu\text{m}$  以上であったためである. ビーム調整の進展と共に干渉縞モードの試験・調整が行われ, 夏期休止明けの 2009 年 11 月に干渉縞モードによる最初の垂直方向ビームサイズを測定した. このときのレーザー交差角は  $3^\circ$ , ビームサイズは  $3.3\mu\text{m}$  であった. 現在は ATF2 ビームラインの調整が進み, 交差角  $30^\circ$  での測定が可能レベルにある. なお, 測定された最小ビームサイズは交差角  $8^\circ$  において 310 nm である. 今後さらにビーム調整が進み 100 nm を切る状態になれば, 最終測定レンジである交差角  $174^\circ$  での測定に移る.

## 4. 低エミッタンスビームの状況

### 4.1 低エミッタンスビーム調整方法

低エミッタンスビームを得るには, 垂直 Dispersion と水平方向と垂直方向の運動の Coupling (x-y Coupling) を極めて小さくしなければならない. 通常低エミッタンスビーム調整では, 以下の 3 つの補正を続けて行う<sup>25)</sup>.

1) 閉軌道の補正: BPM の読みが小さくなるように軌道補正用 2 極電磁石を設定する.

2) 垂直方向の Dispersion と閉軌道の補正: 垂直方向の Dispersion (リングの RF 周波数を変化させたときの軌道の変化) を小さくするように補正用 2 極電磁石を設定するが, BPM の読み自体も小さくなるようにする.

3) x-y Coupling の補正: 2 つの水平方向補正用 2 極電磁石を選び, これらの変化に対する垂直方向の軌道の変化が小さくなるように, Skew 4 極磁場 (6 極電磁石の各磁極の補正コイルが Skew 4 極磁場を発生するように配線されている) を設定する.

ATF では, 2004 年までに 4 pm 程度の低エミッタンスを確認することができた<sup>26, 27)</sup>. その後しばらくの間,



低エミッタンス生成を追及することが主要な目的でなくなっていたため、通常の補正だけではこの低エミッタンスを実現できない状態が続いていた。多少エミッタンスが大きくても進行中の開発研究には支障が無かったため、敢えてビーム時間を費やすことをしていなかったのである。しかしながら、2008年頃から最終収束システム(ATF2)やFast Ion不安定性の研究などのため、再び低エミッタンスビームが要求されるようになった。以下、低エミッタンスビームを再現するまでに行った様々な方法を記述する<sup>28)</sup>。

#### 4.2 BBA (Beam based alignment)

BPMのゼロ点とその近くの磁石(4極, 又は6極)の磁場中心とのずれが、エミッタンス調整の結果に大きく影響する。このため、ビームを使ったBPMと磁場中心とのずれの測定を行っている。この測定は、各BPMとそれに最も近い4極電磁石(又は6極電磁石)について、一組ずつ行う。まず、垂直方向のエミッタンスにより影響する垂直方向のずれを集中して測定した。

BPM-4極電磁石の組については、垂直方向にいくつかの高さの閉じたバンプ軌道を立て、各バンプに対して磁石の強さを変化させたときの全リングに渡っての垂直方向の軌道変化を測定する(バンプの設定は、ビーム位置変化が対象となるBPMと磁石の場所で同じになるようにしておく)。ビームが磁場の中心を通っていれば軌道の変化はないはずで、このデータから磁場中心とBPMの読み関係がわかる。

BPM-6極電磁石についても方法は同様である。ただし、4極磁場の変化の代わりにSkew 4極磁場(補正コイル)を変化させ、水平方向の軌道変化を測定することにより、垂直方向のずれを測定する。

2009年4月には、曲線部分にある主4極電磁石と全ての6極電磁石についてBBAの測定が行われ、ずれの測定値の代表的な誤差(BPMの誤差から計算される)は、4極電磁石について $30\mu\text{m}$ 、6極電磁石について $80\mu\text{m}$ であった。この誤差は2 pm程度の低エミッタンスを実現するためには十分小さい。

#### 4.3 ベータ関数のビートの補正

2008年夏頃のopticsの設定には、ベータ関数の大きなビートがあることがわかり、これが低エミッタンス調整を妨げていたと考えられる。このため、2008年秋には磁石の強さを設計値に設定し、ビームを使った測定に基づいて補正を最初からやり直すこととした。

設計値と思われる値に設定しても種々の誤差のためにベータ関数のビートが生じる。まず、この誤差を全ての4極電磁石での測定値を入力データとして用いた

計算により補正することを試みた。しかし、補正の前後でのベータ関数の変化は計算で予測されるものと大きく食い違い、計算に用いたopticsのモデルがあまりよくないことを示した。この点に関してはさらに詳細な研究が必要と思われる。

しかし、曲線部の1種類の4極電磁石(垂直方向のベータ関数が高い。QF1Rと呼ばれる)での垂直方向ベータ関数のみに注目し、ここでのベータ関数のビートを部分的に補正できる少数の4極電磁石の磁場を変更することにより、ベータ関数のビートをある程度小さくすることができた。ビートの補正は完全ではないが、目標とする2 pm程度の低エミッタンスを実現するためには十分小さいと考えられる。

#### 4.4 Orbit Response Matrix (ORM) データの解析

Orbit Response Matrix (ORM) の解析はoptics errorの原因の同定と補正に役立つ確立された方法である<sup>29)</sup>。これは、簡単に言えば、多くの軌道補正用磁石の強さの変化に対する閉軌道の変化を一つずつ測定し、4極電磁石の強さ、BPMの補正係数やx-y Coupling、補正磁石の強さや回転エラーなどのパラメータを調整することで、測定データとモデルを合わせることである。

ATFでは、全ての軌道補正用磁石と全てのBPMを使ってORMが測定されている。一つの解析では、このデータが34個のSkew 4極磁場(6極電磁石の補正コイルに対応)を含むパラメータでfittingされた。これは、x-y Couplingの原因をSkew 4極にすべて押し付けることを意味し、この結果を使ってCouplingを補正するためのSkew 4極磁場の設定を計算することができるはずである。ATFでの以前の研究<sup>30)</sup>で、この方法の正しさが確かめられているが、今回もx-y Couplingを補正する試みで、同様の結果が得られている。この方法が通常のx-y Couplingの補正(軌道補正用磁石2つだけに対する軌道変化のデータを使う)と比べて明らかに優れているという実験的なデータはまだ得られていないが、解析と補正方法をさらに検討することでよりよい結果が得られる可能性がある。

#### 4.5 低エミッタンスビーム調整の現状

様々な方法を使った努力により、ビーム調整直後のダンピングリングの垂直エミッタンスを、ほぼ確実に10 pm以下にすることができるようになった。図13に最近の垂直方向エミッタンス測定の結果を示す。

より小さな垂直エミッタンスビームを得るためには、補正方法に関するより詳細な研究と、測定データの解析が必要と考えられる。さらに、ここでは説明しなかったが、BPM読み出し回路の改良によるビーム

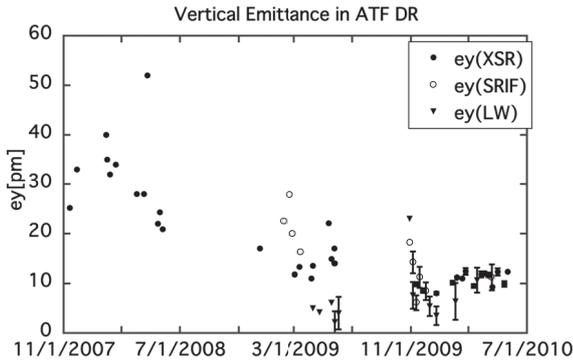


図 13 最近の垂直方向エミッタンス測定の結果

表 1 ATF2 の仮想衝突点のパラメーター

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	4.0cm / 1.0mm
$\sigma_x^*/\sigma_y^*$	2.8 $\mu$ m / 35nm	8.9 $\mu$ m / 109nm

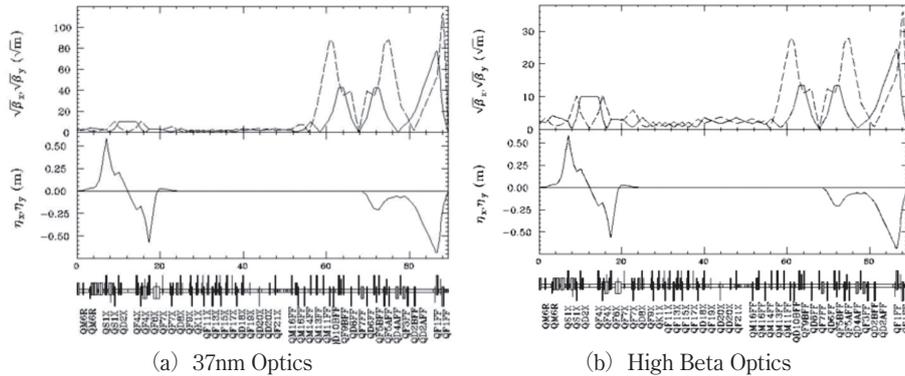


図 14 ATF2 のビーム光学系. 2010 年 5 月までは High Beta Optics でビームラインを調整

位置測定精度の向上, 磁石のアラインメントの再調整なども行われている。

### 5. 最終収束システム (ATF2) の状況

ATF2 最終収束ビームラインの運転は 2009 年 2 月より本格的に開始された。しかしながら, ATF には最終収束システム以外の開発プログラムも多数有りビーム時間を割り当てる必要があること, ATF2 に導入した高精度のビーム診断装置の立ち上げや各種ビーム制御ソフトウェアの開発に比較的多くの時間が必要であったことなど, 2009 年度中においては, ナノメートルビーム調整のために数日を超えるような連続した時間を割り与えるまでには至らなかった。その後, レーザー干渉縞ビームサイズモニターが運用レベルに立ち上がったことを受けて, 連続した調整運転の気運が高まり, 2010 年 5 月に, 最初の ATF2 ビーム調整に特化した連続 1 週間の試験的運転を行った。この際に用いたビーム光学系は High Beta Optics と呼ばれるものであり, 本来の設計光学系に対し水平・垂直方向のベータ関数を共に 10 倍大きくして IP-BSM 測定器へのバックグラウンドの軽減などを考慮したものである (表 1, 図 14)。

### 5.1 最終収束ビームラインまでの調整

まず, 連続調整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 10 pm 前後まで絞った。また, 円形加速器では水平方向エミッタンスはビーム光学系の設定で決まる。そして, ATF ダンピングリングでは常に 1.5 ~ 2.0 nm の範囲である。連続調整運転でダンピングリング内の水平方向エミッタンスの測定は行わなかったが, 1.5 ~ 2.0 nm であると考えてよい。

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, 下流の ATF2 最終収束ビームラインに送るためのビームラインである。取り出しセクション出口では, 水平方向, 垂直方向とも Dispersion は無くなるように設計してある。しかし, ダンピングリングからの Dispersion の漏れ, 4 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, 実際には取り出しセクションの出口で Dispersion が出来てしまう。この出口の Dispersion を補正するために, 取り出しセクション上流の Dispersion がある領域 (最初の偏向電磁石で作られている) において, 電磁石の強さを調整する。水平方向の補正には 4 極電磁石を使い, 垂直方向

の補正には Skew 4 極電磁石を使う。しかし, Skew 4 極電磁石の強さを変えると, Dispersion だけでなく, Coupling も同時に生成してしまう。これを防ぐため, ATF2 では位相進度が  $\pi$  離れ, かつ, 同じベータ関数となる位置に置いた 2 台の Skew 4 極電磁石を, 同時に同じ強さだけ変えて, 生成される Coupling を小さく抑えている (sum-knob)<sup>31)</sup>。図 15 に, sum-knob を使っ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す。1 台目の Skew 4 極電磁石を通過したとき Coupling でエミッタンスが増大する。しかし, 2 台目の Skew 4 極電磁石を通過した時には, 2 つの Skew 4 極電磁石の Coupling の効果が打ち消し合い, 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 補正のために QF1X と QF6X という 2 個の調整 knob がある。一方, 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。それ故, ATF2 では同位相の 1 つの調整 knob を使うことで Dispersion の

補正をすることが可能である。

連続運転においても, 取り出しラインにおいて, Dispersion 補正をおこなった。補正後の最終収束ビームラインでの Dispersion を図 16 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。水平方向 Dispersion は, 設計通り直線部では補正されており, 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, 垂直方向についても, 最終収束ビームライン全ての場所で 10 mm 以内に収まっている。

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。最終収束点における電子ビームの収束率の調整や, Coupling, Twiss Parameter の補正はここで行う。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, Coupling を補正する為の 4 台の Skew 4 極電磁石と, エミッタンス測定の為の 5 台の Wire Scanner が置かれている。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ように Skew 4 極電磁石の強さを設定することで, Coupling 補正を行なう。

連続運転においても, マッチングセクションでエ

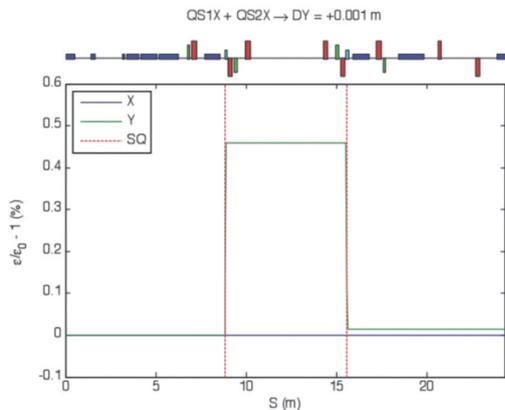


図 15 ATF2 での Dispersion 補正. sum-knob を使ったときのエミッタンス変化の例

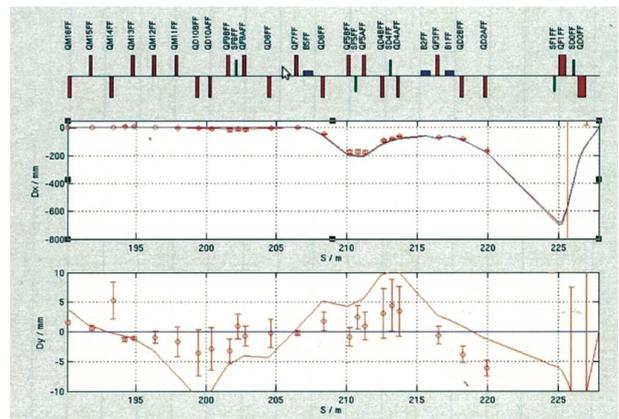


図 16 連続運転での Dispersion 補正結果

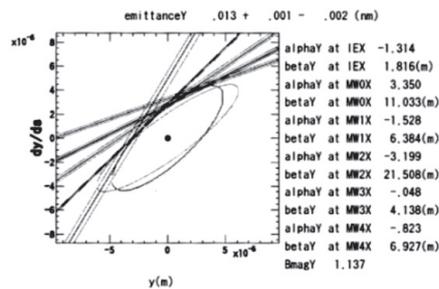
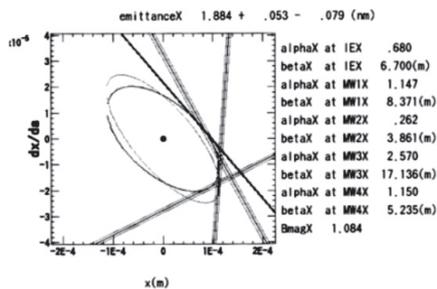


図 17 連続運転でのエミッタンス測定の結果

ミッタンス, Twiss Parameter の測定をおこなった. その測定結果を図 17 に示す. 連続運転では, Coupling の補正を行わなくても, エミッタンスは水平方向が 1.88 nm, 垂直方向が 13 pm とダンピングリングで測定された値に近い値を示した. そのため, 今回は Coupling の補正を行わず, 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.

### 5.2 仮想衝突点におけるビームサイズ調整

ATF2 の最終収束ビームライン (図 18) には 5 台の 6 極電磁石があり, Chromaticity や Geometrical Aberration の補正に使われる. また, これらの電磁石には位置調整用 mover が取り付けられており, 仮想衝突点におけるビームウエストの位置, Dispersion, Coupling の精密調整に使われている. これらの調整 Knob のことを Multi-knob と呼んでいる. 連続運転で使用した Multi-knob のパラメータを表 2 に示す.

仮想衝突点には Wire Scanner とレーザー干渉楕型ビームサイズモニター (IP-BSM) が設置されており, 前者は 3 $\mu$ m 以上, 後者は 5 $\mu$ m ~ 20 nm のビームサイズ測定に使われる. また, ここでの Wire Scanner は, 水平方向の Dispersion, 水平・垂直方向のビームウエスト, Coupling の補正を行う場合にも使われている.

ビームサイズ調整は以下のように行われる. 最初に, 仮想衝突点の水平方向の Dispersion 補正を行う. 連続運転の例では, 最終収束電磁石 QF1FF の強さを 0.7% 下げた際に水平方向 Dispersion を消すことができた. 続いて垂直方向のビームウエストの補正を行う. この

補正では最終収束電磁石 QD0FF を調整する. QD0FF は水平方向 Dispersion の依存性が少なく, それを変えることなく, 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した後, 水平方向のビームウエスト位置を補正する. ここでは Irwin Knob<sup>32)</sup> を使ってマッチングセクションの 4 極電磁石の強さを変える. ここまでの段階で, 垂直方向のビームサイズは 2 から 3 $\mu$ m 程度を示していた.

続いて, 最終収束電磁石のビーム軸回りの回転 (Roll) を調整して Coupling の補正を行った. QF1FF の Roll とビームサイズとの依存性が非常に強く, 4 ~ 5 mrad 回転させたところで Wire Scanner のワイヤーが切れてしまった. ビームが小さくなり Tungsten wire が切れたと考えられる. ここから, IP-BSM のみを使ってのビームサイズ調整となった. IP-BSM でのビームサイズ調整には, Multi-knob の  $\eta_y$ ,  $\alpha_y$  knob と, Coupling 補正の knob には, 最初の 1 回目は最終収束電磁石の Roll を使い, 2 回目以降は Multi-knob の  $\langle x' y' \rangle$  knob を使った. IP-BSM は, ビームサイズの測定範囲が 300 ~ 1000 nm に対応するレーザー交差角 8° (3.8  $\mu$ m ピッチ) に設定された.

IP-BPM を使って,  $\eta_y$ ,  $\alpha_y$ , Coupling の最適化を 3 回繰り返した. 続いて, 個々の 6 極電磁石の Mover

表 2 ATF2 仮想衝突点のパラメータ

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

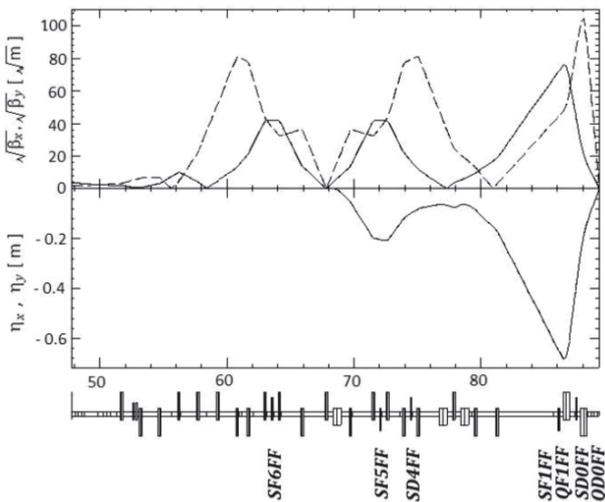


図 18 ATF2 の最終収束ビームラインのビーム光学系と配置. 最下流にある QF1FF, QD0FF と記された 2 つの 4 極電磁石が最終収束電磁石であり, 図中には 5 個の 6 極電磁石が置かれている位置も示してある例

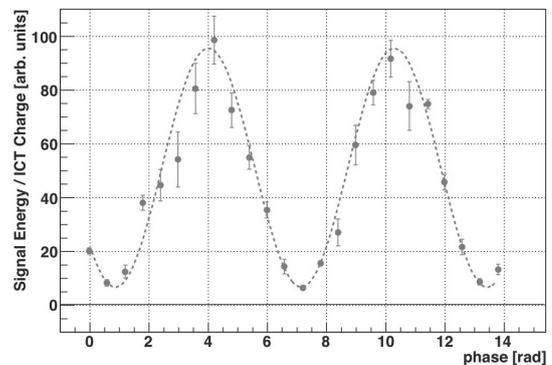


図 19 連続運転において最小のビームサイズを記録したときの IP-BSM modulation 信号

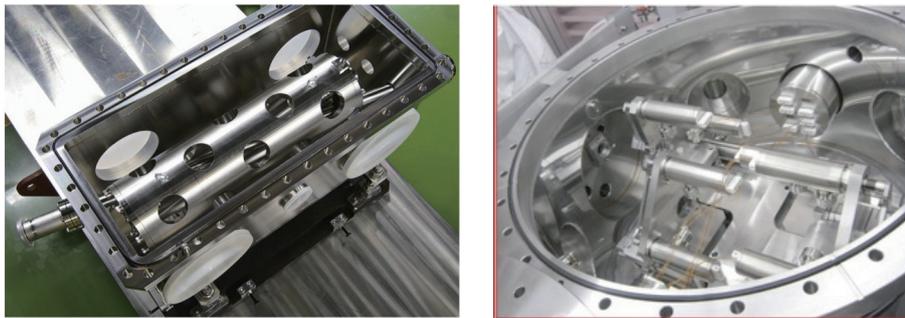


図20 偏極 $\gamma$ 線レーザー装置の開発. 左が2-mirror, 右が4-mirror optical cavity system

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6極電磁石の位置に対して最小値となっていることを確認した。結果は、図19のように、レーザー交差角 $8^\circ$ においてモジュレーションが0.87だった。この値から、ビームサイズは $310 \pm 30$  (stat.)  $\pm 0/40$  (syst.) nmと評価される<sup>24)</sup>。

### 5.3 ATF2 連続調整運転の考察

今回の連続調整運転では、仮想衝突点における垂直ビームサイズを310 nmまで絞り込むことができた。しかしながら、設計光学系から期待されるビームサイズ114 nmと比較して約3倍大きな値であった。この原因として、仮想衝突点でのベータ関数のミスマッチが疑われる。しかし、この影響は大きく無いと考えている。初期調整の際に直下流(40cm)のWire Scannerでビームサイズを測定し、水平方向は $100\mu\text{m}$ 、垂直方向は $50\mu\text{m}$ と期待される値が得られていたためである。

ChromaticityやGeometrical Aberrationの補正が十分でなかった可能性もある。これらの影響が大きく効いてくるのは200 nm以下のビームサイズに対してであり、今回の到達ビームサイズ310 nmでは影響は大きく無いとも思われる。しかし、6極電磁石の最適化は行っていないので、今後の課題として残る。

仮想衝突点におけるビーム位置のジッターを調べる必要がある。そのために高分解能IP-BPMを開発試験しているが、まだ仮想衝突点(近傍)へは設置されていない。次回のビーム調整運転までに、試作機を衝突点近傍に設置する予定である。

今回の連続運転において、最小の垂直ビームサイズを実現するためには、最終収束電磁石QF1FFとQD0FFのRoll差を5.7 mradと非常に大きく設定しなければならなかった。このRollの差は、仮想衝突点でのCouplingに大きく影響を与える。一方で、最終収束

ビームラインに入る前のCouplingは小さく測定されている。上流の電磁石で作られたCouplingを補正するために、最終収束電磁石を大きく回転させる必要があった訳では無いと考えられる。それ故、最終収束電磁石QF1FFとQD0FFの間で不自然に大きいRollの差が生じていると考えるのが自然である。また、電磁石のアライメントは、基準に対してmrad以下の精度で行われており、このような大きなRoll差は、電磁石に何か不具合がある可能性も示唆している。QF1FFの高次の磁場成分は、仮想衝突点のビームサイズに最も敏感なので、次回の運転までに詳しい調査を進める事とした。

最後に、今回の連続運転における仮想衝突点での垂直ビームサイズ測定では、IP-BSMへのレーザービーム転送系のドリフトなどの影響で、定期的にIP-BSMシステムの調整を行わなければならなかった。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。レーザー転送系にフィードバックを導入し、長期間にわたり安定な測定ができるように改良を加える。

## 6. その他

ATFではレーザーと電子ビームの逆Compton散乱による偏極 $\gamma$ 線を利用する偏極陽電子源の開発研究も進められている。パルスレーザーと電子ビームの衝突による原理実証実験<sup>33)</sup>を経て、2-mirror optical cavityによる高輝度のレーザー蓄積装置の開発がダンピングリング内で進められてきた<sup>34)</sup>。今後は、optical cavityとしての制御toleranceが大きく、安定化が期待される4-mirror systemの開発を行う<sup>35)</sup>。

## 7. 最後に

現在、ATF/ATF2で進行している多くの開発研究は、ILC実現の鍵となる技術の確立を目指すものである。

ILC 加速器の国際共同設計チーム (GDE) は、2012 年に技術設計報告書 (TDR) をまとめる予定であり、ATF/ATF2 での開発研究は、この TDR の技術的裏付けに大きく貢献すると期待されている。我々はそれに答えるべく、主要な技術について以下のような時期に達成することを目標とし開発研究を進めている。

- 1) 2 pm の低エミッタンスの実現：2012 年度
- 2) ナノ秒高速キッカーの実証試験：2011 年度
- 3) 垂直 37 nm の極小ビームの実現：2010 年度
- 4) ナノメートルビーム位置安定化：2012 年度

また、本文では触れなかったが、米国で製造試験が進められている超伝導最終収束電磁石を ATF2 のビームで評価試験する提案などもあり、次のステップに向けた検討も進められている。

以上のように、ATF/ATF2 での研究課題は多彩であり挑戦的である。国内外から多くの研究者が参加しており、彼らとの国際的な共同研究体制の下で、TDR をまとめる 2012 年を一つの区切りとして目標の達成を目指している。大学院生を含め多くの若手研究者が活発に活躍しており、今までに数多くの学位取得者 (博士および修士) が国内外で誕生している。若手研究者の育成も ATF の重要な役割である。

以上、先端加速器試験装置 (ATF/ATF2) の現状について概要を報告しました。開発項目が多く、十分な説明が出来ていないところもあることをお詫びいたします。詳細については参考文献をご参照頂ければ幸いです。

## 謝辞

ATF の国際的な研究活動を推進するにあたり、日頃より御指導・御支援頂いております高エネルギー加速器研究機構の鈴木機構長、高崎理事、神谷理事、生出加速器施設長および LC 推進室に深く感謝申し上げます。また、今回の報告をする機会を与えて頂きました加速器学会誌編集委員の方々に感謝致します。

## 参考文献

- 1) F. Hinode et al., KEK Internal 95-4.
- 2) ILC RDR, ILC-REPORT-2007-001.
- 3) ATF2 Proposal, Volume 1, KEK Report 2005-2, Volume 2, KEK Report 2005-9.
- 4) P. Bambade et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, **13**, 042801 (2010).
- 5) J. Urakawa, Proceedings of PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA, 2007, p.1950.
- 6) Y. Honda, Proceedings of APAC07, Indore, India, 2007, p.308.
- 7) The ATF international collaboration, <http://atf.kek.jp>
- 8) N. Terunuma et al., Nucl. Instr. and Meth. **A613**, 1 (2010).
- 9) T. Imai et al., KEK-Preprint 2002-16, May 2002.
- 10) T. Naito et al., Nucl. Instr. and Meth. **A571**, p.599 (2007).
- 11) 内藤 孝ほか, 第 7 回加速器学会, WEPS003 (2010).
- 12) P. Burrows et al., Proceedings of IPAC10, Kyoto, Japan, 2010, MOPE074 and WEPEB044.
- 13) S. Walston et al., Nucl. Instr. and Meth. **A578** (2007) 1-22.
- 14) Y. Inoue et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, **11**, 062801 (2008).
- 15) P. Priet et al., Presented at 13th Beam Instrumentation Workshop (BIW08), Lake Tahoe, California, May 2008.
- 16) T. Naito et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, **9**, 122802 (2006).
- 17) H. Sakai et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, **10**, 042801 (2007).
- 18) Y. Honda et al., Nucl. Instr. and Meth. **A538** (2005) p.100.
- 19) H. Hayano, Proceedings of Int. Linac Conf., Monterey (2000) p146.
- 20) J. Alabau-Gonzalvo et al., Proceedings of IPAC10, Kyoto, Japan, 2010, MOPE050.
- 21) L. Deacon, Thesis (PhD), University of London (Royal Holloway), 2009.
- 22) T. Shintake, Nucl. Instr. and Meth. **A311** 455 (1992).
- 23) T. Suehara et al., Nucl. Instr. and Meth. **A616**, 1 (2010).
- 24) Y. Kamiya et al., Proceedings of IPAC10, Kyoto, Japan, 2010, MOPE022.
- 25) K. Kubo, Phys. Rev. ST Accel. Beams, **6**, 092801 (2003).
- 26) ATF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **88**:194801, 2002.
- 27) Y. Honda et al., Phys. Rev. Lett. 92:054802, 2004.
- 28) K. Kubo et al., Proceedings of PAC09, Vancouver, Canada (2009) ; FR1RAC05.
- 29) J. Safranek, Nucl. Instr. and Meth. **A388** (1997) 27-36.
- 30) A. Wolski et al., EPAC 2004, Paper ID MOPLT142.
- 31) M. Woodley, 3rd ATF2 project meeting (2007).
- 32) N. Walker et al., SLAC-PUB-6207 (1993).
- 33) T. Omori et al., Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 114801.
- 34) S. Miyoshi et al., Nucl. Instr. and Meth. **A**. DOI:10.1016/j.nima.2010.03.075.
- 35) J. Bonis et al., 第 7 回加速器学会, THPS104 (2010).