

先端加速器施設(ATF)の現状

STATUS REPORT OF THE ACCELERATOR TEST FACILITY

照沼信浩^{#, A)}, 久保浄^{A)}, 黒田茂^{A)}, 奥木敏行^{A)}, 内藤孝^{A)}, 荒木栄^{A)}, 福田将史^{A)}, 森川祐^{A)}, 田内利明^{A)}
ATF 国際コラボレーション^{B)}

Nobuhiro Terunuma^{#, A)}, Kiyoshi Kubo^{A)}, Shigeru Kuroda^{A)}, Toshiyuki Okugi^{A)}, Takashi Naito^{A)}, Sakae Araki^{A)},
Masafumi Fukuda^{A)}, Yu Morikawa^{A)}, Toshiaki Tauchi^{A)} and the ATF International Collaboration^{B)}

^{A)} KEK, High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} <http://atf.kek.jp>

Abstract

Accelerator Test Facility (ATF) at KEK is a research center for studies on issues concerning the injector, damping ring, and beam final-focus system for the ILC. ATF2 is a final-focus test beam line that aims to focus the low emittance beam from the ATF damping ring to a vertical size of 37 nm and to demonstrate the nanometer level beam stability, using numerous advanced beam diagnostics and feedback system. A beam size around 44 nm at the ATF2 focal point is routinely obtained. A position stabilization of the second bunch which is extracted as a multi-bunch beam in a pulse from the damping ring, has been studied by the intra-train fast position feedback. A smaller beam size of the second bunch was obtained by applying this feedback. Recent progresses conducted by the ATF international collaboration are reported.

1. はじめに

KEK の先端加速器試験施設(Accelerator Test Facility, ATF)では、国際リニアコライダー(ILC)^[1]で必要とされるナノメートル極小ビームの技術開発をはじめ、各種の先端的ビーム診断装置やビーム制御装置など、多くの加速器でも展開が期待される技術開発を進めている。

ATF は電子加速器システムであり、Cs₂Te 光陰極型高周波電子銃、1.3GeV S バンド線型電子加速器、1.3GeV ダンピングリング、ビーム取り出しラインおよび最終収束試験ビームラインで構成されている(Figure 1)。電子銃では、 2×10^{10} electrons/bunch を 2.8 nsec 間隔で 20 バンチ生成することが可能であるが、最近ではナノメートル極小ビームの技術開発に特化しており、 1×10^{10} electrons/bunch のシングルバンチを 3.1 Hz で生成してい

る。ダンピングリングは、線型加速器からのビームを 3 トレインまで蓄積できる。リングからビームを取り出すキッカー電磁石の flattop は約 300 nsec であり、この間に 3 バンチを蓄積すれば、その時間構造に応じたバンチ列を一度に取り出すことができる。これにより、150 nsec 間隔の 3 バンチや 300 nsec 間隔の 2 バンチなど、ILC を模した間隔でのマルチバンチを利用している。

2. ATF 国際コラボレーション

ILC をターゲットにしたナノメートル極小ビームの技術開発は、ATF ダンピングリングで生成される 10 pm の低エミッタンスビームとビーム最終収束システムの組み合わせで可能となる^[2]。

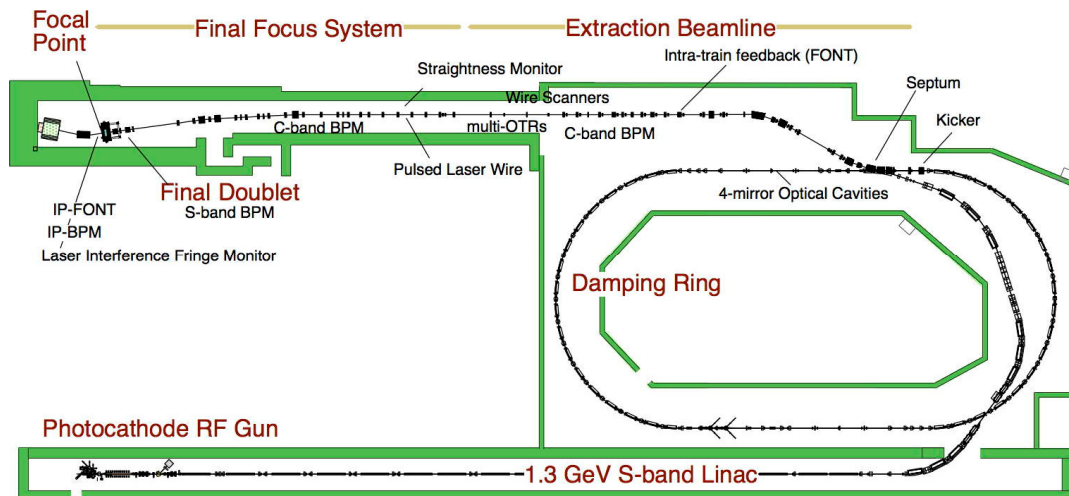


Figure 1: Layout of the ATF. 100m x 50m.

[#] nobuhiro.terunuma@kek.jp

この提案に基づき、2005年に国内外の研究機関の長が署名した協定書が取り交わされ、ATF 国際コラボレーションが発足した^[3]。ATF の最終収束試験ビームラインは、設計から建設にわたり国際的な分担で進められ、2010年から運用が開始された^[4]。現在の開発研究も国際的に協力して進められている。

最終収束試験ビームラインでの研究開発については、国際的な背景に基づくこと、ダンピングリングでの低エミッタンスビーム技術開発が中心であった時期からの更なる展開であること明確にするため、従来のものと区別して ATF2 と呼ばれている。

ATF で行われている研究開発は多岐にわたり、国内外の大学および研究機関から非常に多くの研究者が参加している(Figure 2)。特に ATF2 ビームラインの建設および commissioning 期(2006~10)では、担当するビーム診断・制御機器の立ち上げに海外から多くの研究者が訪れていた。2011年以降は機器の運用が軌道に乗り、ビーム光学技術開発に重心が移ったが、それでも年3000人日程度の状態が維持されている。

ATF のビーム運転は年間20週程度であったが、最近では電気代高騰などの影響で14週程度にせざるを得ない状況である。しかし、海外参加者の関心は高く、海外からの訪問者数に大きな変化は無い。ATF での研究開発では、新たな装置導入やその改善を行う時間が必要であり、通常2週間を単位としてビーム運転を繰り返すが、週末と2週間に続く1週間を保守・改善の期間として確保し、ビーム試験と装置開発が効率よく進められるようにしている。

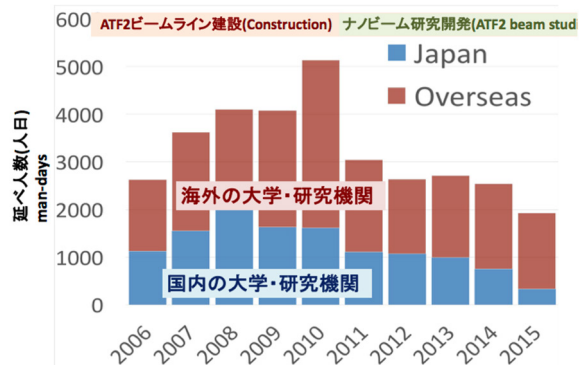


Figure 2: Number of visited researchers.

3. ナノメートルビーム技術開発

ILCでは想定するルミノシティを得るために、垂直方向6 nm(rms)まで絞られた2600バンチの電子ビームを同様な陽電子ビームと衝突させる。この2600バンチのビーム加速は超伝導RFシステムで行われるが、KEKのSTFを始め世界的に開発が進められている。一方、ナノメートル極小ビームの技術開発では、1990年代にSLACでGlobal Chromaticity Correctionという収差補正方法による最終収束システムの試験(Final Focus Test Beam, FFTB)が行われ、垂直方向70 nmのビームが確認されていた^[5]。現在のILC設計では当時とは異なるLocal Chromaticity Correction方式が採用されている^[6]。この方式ではGlobal方式と比べてビームラインが約1/3の

700 m程度に短くできるなど幾つかの利点がある。その反面、ビーム調整が複雑であり、何よりも原理実証が必要であった。このため、前節で述べたように、ATFダンピングリングで得られる低エミッタンスビームを利用したLocal Chromaticity Correction方式の最終収束システム試験計画(ATF2計画)が立ち上がったのである。



Figure 3: ATF2, final focus test beamline.

ATF2計画における目標は大きく分けて二つある。第一の目標はILC衝突点に相当する場所での垂直方向37 nmの極小ビームの安定した実現である。第二の目標は、この極小ビームの衝突点での位置を、ナノメートルレベルで維持安定化することである。これらはILCの設計ルミノシティ達成上、必須の技術である。

3.1 第一の目標：垂直37 nmの極小ビーム開発

ATF2ビームライン(Figure 3)はILC最終収束ビームラインと同じ光学設計に基づいている。Energy spreadは0.1%、natural vertical chromaticityはおよそ10000とされ、さらに電磁石のfield errorに対する許容度はILCのものと同様である。最終四極電磁石から衝突点までの距離L*やビームエネルギーを考慮すると、ILC設計値の垂直方向ビームサイズ6 nmは、ATF2において37 nmに相当する。これをATF2において実現することで、ILC最終収束技術を実証し、更なる高度化への知見を得ることを狙っている。

ILCでは電子および陽電子ビームの衝突散乱をモニターすることで、ナノメートルへのビームサイズ調整(ルミノシティ最適化)を行う事になる。しかしながらATFは電子ビームのみの加速器でありこの方法は使えない。そのため、直接電子ビームの大きさを測ることになる。しかしながら、通常のビームサイズモニター、例えば金属やカーボンによるWire Monitor、Optical Transition Radiation(OTR)やOptical Diffraction Radiation(ODR)を利用する放射モニター、さらにはATFで英国JAIと共同で開発したLaser Wire Scanner^[7]であっても分解能は1 μm程度であり、37 nmの測定には遠く及ばない。そのためATF2における極小ビームサイズの調整は、レーザー干渉縞と電子ビームとの逆コンプトン散乱を利用した測定を通して行われる^[8](IPBSM, Figure 4)。

IPBSMはATF2ビームラインのfocus point(ILCにおける衝突点IP)に設置されている。レーザーの交差角で

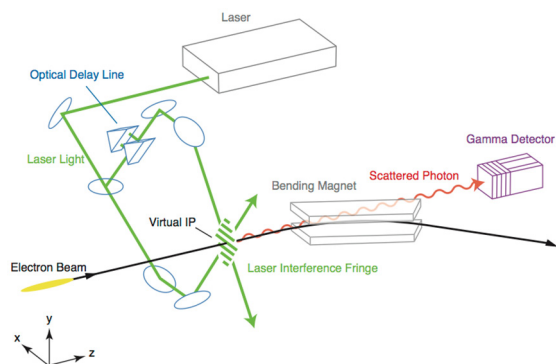


Figure 4: Schematic configuration of the nanometer beam size monitor.

干渉縞のピッチが決まり、それに応じてビームサイズの測定範囲が決まる。ATF2 の IPBSM では 3 種類の交差角モードが用意されており、設計上は 20 nm 程度までの測定範囲をカバーしている^[9]。ビームライン立ち上げの状態からは、5 μm のカーボンワイヤモニターでビームサイズ測定を行いながら 2 μm 程度までビームを絞り込む。続いて、IPBSM での最初の交差角モードを用いて 300 nm 程度以下まで追い込む。ここで第二の交差角モードに移り、さらに 100 nm 程度以下までビーム調整を進める。そして最終の交差角モードに切り替えて数 10 nm 台のビームサイズ調整を行う。ビームサイズが小さくなればなるほど、安定な測定が求められることとなり、モニター自身の高度化を進めていく必要がある。

極小ビームの調整では chromatic aberration の補正が重要であり、6 極電磁石およびスキュー6 極電磁石を使って技術開発が進められてきた^[10,11]。2012 年に初めて 100 nm の壁を越え、2014 年には FFTB 実験の 70 nm をさらに下回る世界最小ビームサイズ 44 nm^[12,13]までビームを絞ることに成功した (Figure 5)。ここで、このビームサイズは当初想定していたビーム強度の $\sim 1/10$ に相当する 1×10^9 electrons/bunch で得られたものであることに注意したい。光学設計の観点から、目標に近い値での極小ビーム達成により Local Chromaticity Correction 方式の技術検証は満足のいくレベルにあると判断できる。一方で、高いビーム電流ではビームサイズが増大しており、

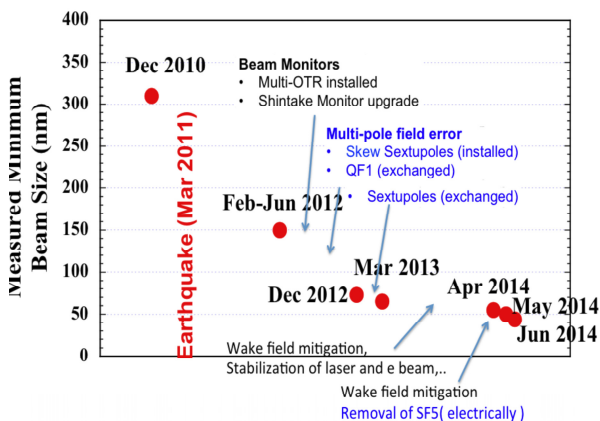


Figure 5: History of measured minimum beam size.

Wakefield に起因すると見られる大きなビーム電流依存性があり、その評価・検証が求められている。

このビーム電流依存性を低減するため、 β 値が大きく Wakefield の影響が大きいと推測される場所でのベローズや排気ポートのシールド強化、ビームダクト内面の段差軽減などを進めると共に、積極的に Wakefield の影響を打ち消す(低減する)ことを狙って、空洞型 BPM など大きな内部構造をもつ機器を載せたステージを導入し、遠隔操作でビームに近づけたり遠ざけたりして影響を評価している。

エネルギーの違いなどから wakefield の影響を評価すると、ATF2 での 1×10^9 electrons/bunch の状態は、ILC での設計ビーム強度 2×10^{10} 程度に相当すると見積もられている。つまり ATF2 で 44 nm を達成したことは、ILC での 7 nm とほぼ目標に近く、大きな問題とはならないと推測される。しかしながら、その妥当性を高めるためにも、状況を変えた実験からも評価することが望ましく、そのために、ATF2 ビームラインから全体の 1/3 にも及ぶ空洞型 BPM などを取り外し、wakefield の影響を計算上半分にして、ビーム評価試験を行うことを計画している。幾つかの R&D は実施できなくなるなど影響は大きいですが、本年度 11 月に行うことが ATF 国際コラボレーションとして合意されている。

3.2 第二の目標: ナノメートルでのビーム位置制御

ILC の電子ビームと陽電子ビームは、それぞれ約 10 km に及ぶ加速器ビームラインを通過する。それらは地盤振動や加速器機器の変動を受ける。衝突点での電子・陽電子ビームの衝突を維持するためには、これら極小ビームの衝突点での位置を数 nm レベルで安定化させることが重要である。ILC のビームは 1 ms の時間幅での多バンチであり、最もバンチ数が多いオプションでは 2600 個のバンチが 366 ns 間隔で衝突点に送られてくる。地盤振動などビーム位置を乱す要因となる周期はこれに比べて遅く、結果として 1 ms のバンチ列はコヒーレントに振動の影響を受けると見なせる。そこで先頭のバンチから位置のズレ情報を引き出し、後続のバンチ群の位置ズレを補正する Intra-train feedback^[14]技術(FONT)が提案され、Oxford 大学を中心に開発が進められてきた。

ATF の取り出しビームラインに 2 台の stripline kicker と 3 台の stripline BPM が設置され、高速 digital feedback system に接続されている。ここでダンピングリングから取り出される 150 ns 間隔の 3 バンチ beam を使い、FONT システムの開発を進めている。今までに対応速度 133 ns、ビーム位置ジッターを 1/3 の 0.8 μm まで低減させることに成功している。低減率は Stripline BPM の分解能に依存している。現在の安定化技術開発では、このシステムを ATF2 の仮想衝突点に、ナノメートル分解能の空洞型 BPM を用いて構築して試験を進めている。

ILC では、ビームがナノメートルレベルになる衝突点近傍は Vertex 検出器などで占有されており、直近の BPM は 2m ほど離れて設置される。そこではミクロンレベルのビームであり、想定する位置分解能も同程度で良く、Stripline 型 BPM が想定されている。つまり、ILC 衝突点ではナノメートルレベルのビーム位置安定度を直接確認

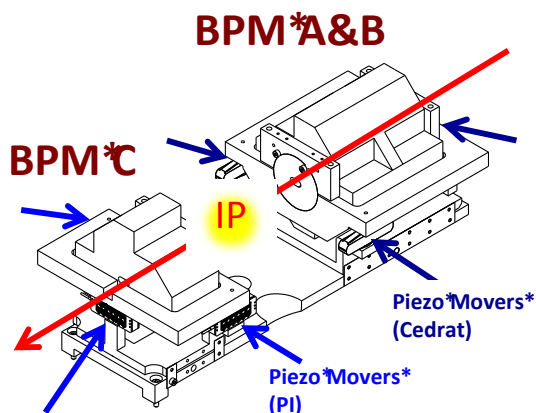


Figure 6: Cavity BPM on piezo mover for ATF2.

することは想定していない。ビームの位置安定度はルミノシティーの推移、つまりは衝突点で交差するビームからの反跳粒子を超前方検出器で計測することで行う。

一方、ATF2では仮想衝突点(近傍)にBPMを設置できる^[15]ので、ナノメートルレベルのビーム位置安定化の技術評価として直接確認できることが期待される。それには2 nm 分解能を持ち 150 nsec 後の次のバンチとの信号分離が可能となる Q 値の低い空洞型 BPM が必要となる。ビームサイズ測定用のレーザーとの干渉を避けるように、仮想衝突点上流に一体化された BPM2 台、下流に独立な1台が設置されている。仮想衝突点から直近の前後の BPM はそれぞれ 10 cm 離れている。これらは全て同じ真空チャンバー内に納められており、各々のブロックに位置調整用ピエゾステージが設置されていて、BPM ブロックを $\pm 150 \mu\text{m}$ 動かすことができる。これにより、BPM の相対位置調整や感度較正を行う (Figure 6)。ビーム位置安定度の測定は、ビーム収束点を、いずれかの BPM 位置に動かして実施する。

位置分解能 2 nm の BPM システムの実現は容易ではない。BPM 本体の形状精度は勿論のこと、信号処理回路の理解と高度化が必須であり、実際、これらに多くの時間が費やされている。位置測定範囲を確保した現在の通常の試験では、主に信号処理系の制限から分解能は 40 nm 台後半に留まる。分解能を追求した試験では、 1×10^{10} electron/bunch のビーム強度で 8 nm 程度が得られる評価されている。これが通常時の測定でも達成できるように、BPM システムの高度化を努力していくが、2 nm の確認という評価方法の見直しも含めて intra-train feedback 技術の確立を進めて行くことになる。

前述したように、最終収束ビームライン上流(約 50 m)の取り出しラインには別の FONT システムが設置されている。これによる後続バンチの位置フィードバックが下流の仮想衝突点 BPM でどの様に測定されるかという評価試験も進められている(Figure 7)。この試験では、固定位置への安定化というよりも、位置ジッターの相対的な改善として見て頂きたい。この BPM の位置では Feedback 無しで約 420 nm のビーム位置ジッターがある。これを上流の FONT feedback を用いると 1/6 の 74 nm まで大きく改善している^[16]。これは試験条件下での BPM の読み出し

位置分解能と同程度であり、そのためにフィードバックの成果が留められていると解釈している。

ATF2 ビームラインでのビーム軌道の振る舞いから、リングからのビーム取り出しなど、上流の何らかのドリフトによりビーム軌道がドリフトしていることが分かっていた。この対策として、PLC 制御によるビーム軌道補正用空芯コイルが ATF2 ビームラインに設置された。これを逆に利用して、強制的にビーム位置を変動させ、FONT フィードバックで補正する試験も行われた。詳細は奥木が本学会で報告する^[17]。

これらに加えて、衝突点でのビームサイズ測定システムのタイミング系の変更を行い、2 バンチ運転でも後続バンチのビームサイズ測定ができるように対応した。現在の空洞型 BPM 信号処理ソフトウェアでは、2 バンチ目のビーム軌道評価が不十分なため、最適なビーム調整が

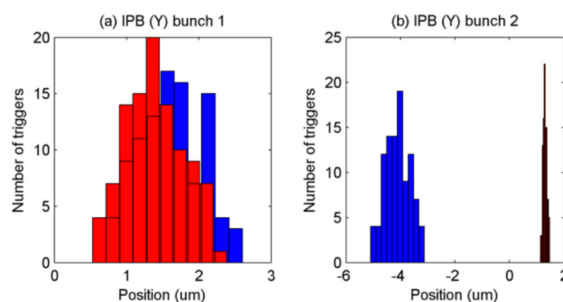


Figure 7: Results of the FONT feedback at ATF2-IP.

できていない状態ではあるが、FONT フィードバックの ON/OFF で 2 バンチ目のビームサイズに有意な改善が確認されている。

4. その他の技術開発

ATF2 ビームラインにおけるビーム取り出し毎の軌道変動の要因の一つは、ダンピングリングでの軌道変動であり、これを安定化することはナノメートルビーム技術開発にとって重要である。ATF2 ビーム制御の精度が上がり、ダンピングリングの電磁石や真空チャンバーの冷却水の温度(制御範囲 $\pm 1 \square$)に比例してビーム軌道が変動していることが明らかになった。そのため、冷却水クーリングタワーの制御を改善し、 $\pm 0.1 \square$ の制御を実現して、ダンピングリングでのビーム軌道を安定化した。詳細は内藤が本学会で報告する^[18]。

ATF で実施されている装置開発は多種多様である。その中から最近特に海外の研究者が中心となっている課題を紹介する。

ILC にとってビーム開発と共に重要なのが測定器に対するバックグラウンドの低減である。そのために最終収束システムでのビームハローの理解、そのコリメーションを目指した研究も行われている^[19,20]。2016 年 3 月に垂直方向の Beam Collimator が ATF2 ビームラインに導入さ

れた。仮想衝突点下流部では反跳電子測定のため高感度の Diamond Sensor^[21]の試験が行われている (Figure 8)。

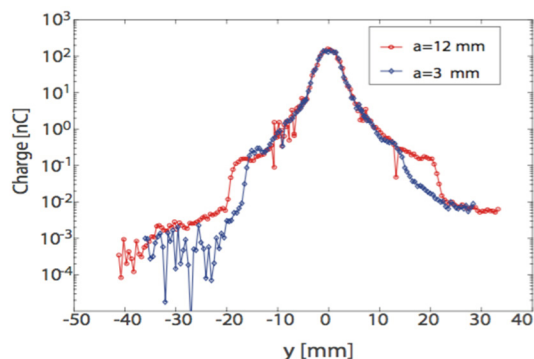


Figure 8: Vertical beam halo distribution by changing the collimator position, measured by a Diamond Sensor.

床振動などの影響によるビーム位置ズレを高速で補正するために、FONT システムが導入されているが、ビームが来る前に、あらかじめ床振動を測定して対応する補正キックを生成しておく feedforward 技術開発も進められている^[22]。これは FONT よりも更に高速な制御が必須となる CLIC で必要となる技術である。ATF2 の床振動を測定するために高感度振動計 14 個(Figure 9)が CERN から持ち込まれている^[23]。

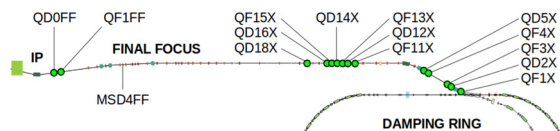


Figure 9: Vibration sensors installed in the ATF2.

ILC では衝突点以外のビームサイズ測定は、非破壊型モニターであり大強度のマルチバンチビームに耐えられるレーザーワイヤーが想定されている。これはシステムがやや複雑であり、より簡易なモニターの候補として Optical Diffraction Radiation (ODR) monitor の開発が CERN により進められている^[24](Figure 10)。装置は 2016 年 3 月に ATF2 に設置された。サブミクロンの分解能を目指して可視光から UV 領域の放射を利用する。

5. まとめ

先端加速器試験施設(ATF)では、国際リニアコライダー(ILC)で必要とされるナノメートル極小ビームの技術開発をはじめ、各種の先端的ビーム診断装置やビーム制御装置など、多くの加速器でも展開が期待される技術開発を進めている。国際コラボレーション体制のもとで国内外から多くの若手研究者が参加している。

ATF2 における第一の目標である垂直方向ビームサイズ 37 nm の実現では、Wakefield 対策、ビーム軌道の安定化、レーザー干渉縞型ビームサイズモニターの安定化などを進め、40 nm 台のビームサイズを良く再現することができている。

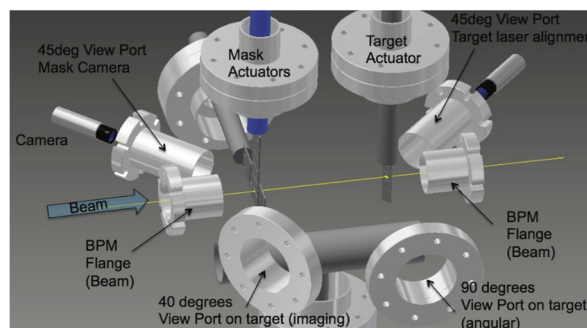


Figure 10: Schematic configuration of the ODR system installed in the ATF2.

第二の目標であるナノメートルレベルでのビーム位置制御技術では、ATF2 仮想衝突点に導入した空洞型 BPM の分解能を改善する努力を続けると共に、Intra-train 高速フィードバックの技術開発を進めている。衝突点でのビーム位置ジッターを 1/6 以下に低減するなど成果が上がっている。

衝突点での測定器バックグラウンド低減に向けた機器開発も始められるなど、ILC での総合的なナノメートルビーム制御技術開発が進行している。

参考文献

- [1] ILC Technical Design Report (2013), <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [2] "ATF2 Proposal", KEK Report 2005-2 (2005).
- [3] <http://atf.kek.jp/twiki/bin/view/Main/ATFIntroduction>
- [4] P. Bambade *et al.*, Phys. Rev. ST-AB 13, 042801 (2010).
- [5] V. Balakin *et al.*, Phys. Rev. Lett., 74 2479 (1995).
- [6] P. Raimondi and A.Seryi, Phys. Rev. Lett. 86, 3779 (2001).
- [7] L. J. Nevay *et al.*, Phys. Rev. ST-AB 17, 072802 (2014).
- [8] T. Shintake, NIM A 311, 455 (1992).
- [9] T. Suehara *et al.*, NIM A 616, 1 (2010).
- [10] T. Okugi *et al.*, Phys. Rev. ST-AB 17, 023501 (2014).
- [11] G. White *et al.*, Phys. Rev. Lett. 112, 034802 (2014).
- [12] K. Kubo, Proceedings of IPAC'14, WEZA01 (2014).
- [13] S. Kuroda, Proceedings of ICHEP'14 (2014).
- [14] P. Burrows *et al.*, Proceedings of IPAC'14, TUPME009 (2014).
- [15] S. W. Jang *et al.*, Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, THOAA02 (2016).
- [16] N. Blaskovic Kraljevic *et al.*, Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, THPOR035 (2016).
- [17] T. Okugi *et al.*, 本加速器学会, MOOL04 (2016).
- [18] T. Naito *et al.*, 本加速器学会, WEOL08 (2016).
- [19] R. Yang *et al.*, Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, MOPMB008 (2016).
- [20] N. Fuster-Martínez *et al.*, Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, THPOR030 (2016).
- [21] S. Liu *et al.*, NIM A 832 (2016) 231–242.
- [22] D. Bett, Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, WEPOR005 (2016).
- [23] D. Bett, Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, WEPOR005 (2016).
- [24] R. Kieffer *et al.*, Proceedings of IBIC2015, Melbourne, Australia, TUPB057 (2015).