

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)}, Alexander Aryshev^{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)}, Alexander Aryshev^{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 of 41 nm at the ATF2 focal point is achieved with the intra-train position feedback in 2016. The effect of the wakefield on the nanometer level beam has been studied by removing a half of components in the higher beta function region of the ATF2 beamline. 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技術の確立を目指し、先端的ビーム診断装置やビーム調整技術の開発を国際コラボレーション体制の下で進めている。

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 (ATF2) 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 1 ビームパルスあたり 20 バンチ生成することが可能である。ダンピングリングは、線型加速器からの

マルチバンチビームを 3 パルス分まで蓄積でき、最大で 60 バンチを蓄積する。入射・取り出しの繰り返しは 3.1 Hz である。ダンピングリングでは通常的に垂直方向 10 pm の低エミッタンスビームを生成している (今までに達成した最小のエミッタンスは垂直方向 4 pm である) が、この低エミッタンスビームを ATF2 最終収束試験ビームラインで利用することで、ILC で必要となるナノメートル極小ビーム技術開発が可能となる[2]。この技術開発を国際的に協力して実施するため、2005 年に国内外の研究機関の間で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。ATF2 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ている[3]。ATF を訪れた KEK 以外の研究者数を Figure 2 に示す。

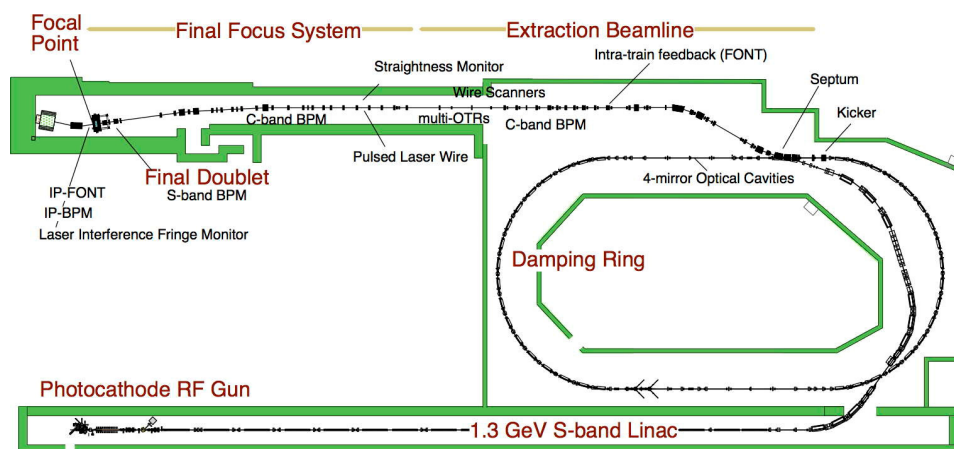


Figure 1: Layout of the ATF. 100m x 50m.

[#] nobuhiro.terunuma@kek.jp

ATF2 ビームラインの設計・建設期(2006~10)では、In-kind で担当するビーム診断・制御装置の開発や立ち上げのために、海外から多くの研究者が訪れていた。2011年以降は、ナノメートルビーム調整技術開発が中心となり、ハードウェア作業と比べて滞在期間が短くなった違いが現れている。国内では常駐する学生が少なくなったが、ビーム運転時には東大などから頻繁に学生が参加している。

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 週程度に縮減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。特に ATF の技術開発は CERN が検討している CLIC とも共通となるものが多く、人的協力のみならず、CERN がビーム運転経費の一部を負担するなどの協力も生まれている。

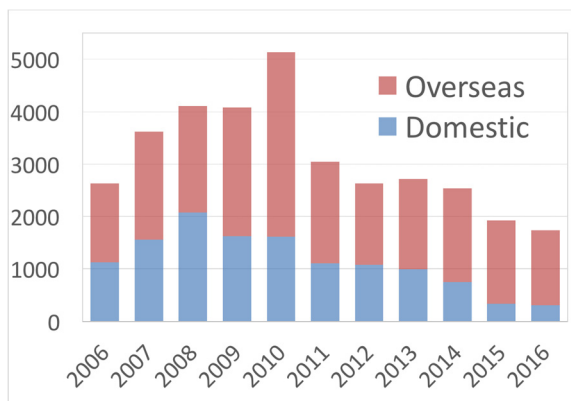


Figure 2: Number of visited researchers (man-days).

2. 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ーを得るために、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。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[4]。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。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が、ビーム調整が複雑になり、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。

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ーを達成する上で、重要な技術である。

2.1 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の違いなどにより、ILC 設計値の垂直方向ビームサイズ 6 nm は、ATF2 においては 37 nm に相当する。従って、ATF2 で 37 nm の極小ビームを実現することで、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う。

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(ルミノシティー最適化)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。直接電子ビームの大きさを測ることになるが、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[5]であっても分解能は 1 μ m 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測定は、1990 年代に SLAC で行われた FFTB のために開発された新竹モニター(通称)[6]を用いて行う。これは、レーザー干渉縞をもの差しとして電子ビームサイズを測定するものである。干渉縞の光子と電子ビームの逆コンプトン散乱を計測する。ATF2 では FFTB の装置を発展させたものを使用している(IPBSM, Figure 3)。

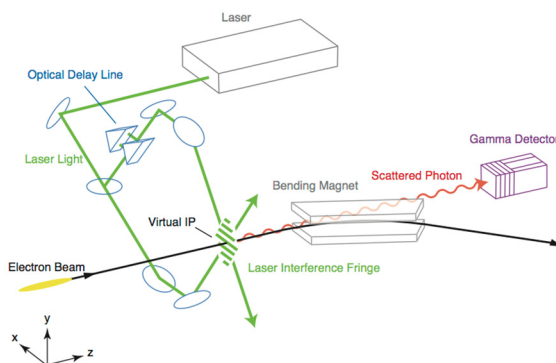


Figure 3: Schematic configuration of the nanometer beam size monitor at ATF2.

IPBSM は ATF2 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[7]。ビームライン立ち上げの状態からは、まず 5 μ m 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 μ m 程度までビームを絞り込む。続いて、IPBSM での最初の交差角(2° ~8°)モードを用いて 300 nm 程度まで追い込む。ここで第二の交差角

30° モードに移り、さらに 100 nm 程度までビーム調整を進める。そして最終の交差角 174° 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、バックグラウンドの低減と共にモニター自身の高度化が必要となる。

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[8,9]。2012 年に初めて 100 nm の壁を越え、2014 年には FFTB 実験の 70 nm をさらに下回るビームサイズ 44 nm までビームを絞ることに成功した。さらに、2016 年には次節で述べるビーム位置フィードバックを適用し、世界最小を更新する 41 nm を確認するに至った (Figure 4)。しかしながら、100 nm 以下の結果は、設計ビーム強度の $\sim 1/10$ である 1×10^9 electrons/bunch で得られたものである。光学設計の観点からは、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 Wakefield に起因すると見られる大きなビーム電流依存性 (ビームサイズの増大) があり、その評価・検証が求められていた。

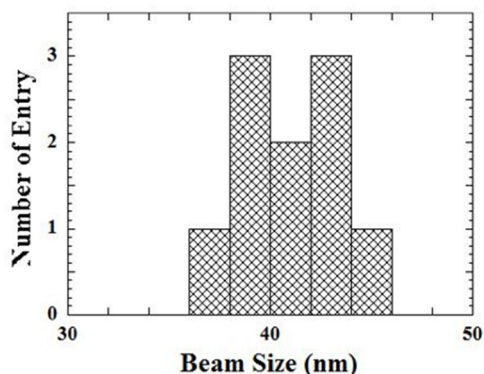


Figure 4: Results of 10 consecutive beam size measurements at low intensity, evaluated ignoring systematic error of beam size monitor.

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てするなど Wakefield の影響の評価を進めていた。

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 41 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ている。しかしながら、その妥当性を高めるためにも、状況を変えた実験で比較評価することが望ましい。そのために、2016 年 11 月に、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、同時にビームパイプの単純化を進めることで、wakefield の影響を計算上半分にする改造を実施した。Figure 5 は改造前後でのビームサイズの電流依存性を示したものである。高いビーム電流ではビームサイズが 100 nm を越えてしまうため、IPBSM の測定モードは 30°、ビームサイズ 100~300 nm の範囲での実験である。縦軸は IPBSM の信号強度変化 (Modulation) であり、数値が高いほど小さなビームサイズを意味する。11 月の結果は、バンチあたりの電子数が増えても Modulation の低下が大幅に改善されており、また絶対値も上がっている。現在は、wakefield 源を抑えたビームラインの構成を維持したまま、最終収束システムの技術開発を進めている。

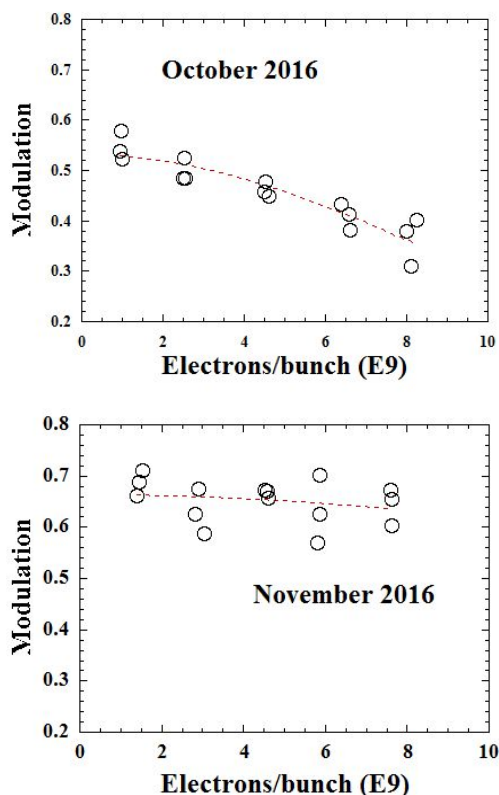


Figure 5: Beam intensity dependence of the beam size signals (modulation): measured in October (before reduction of wakefield sources) and in November (after reduction), 2016.

2.2 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してくる。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ビームサイズの 1/3 程度、つまり 2 nm 程度に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。そこで先頭のバンチから位置ズレの情報を引き出し、後続のバンチ群の位置ズレを補正する Intra-train feedback[10]技術(FONT)が提案され、Oxford 大学を中心に開発が進められている。

FONT の技術開発は ATF の取り出しビームラインと ATF2 の仮想衝突点の 2 カ所で行われている。ダンピングリングに最大 3 つのバンチを順次入射し、flat-top 300 ns のパルスキッカーで一度に取り出すことで、150 ns 間隔の 3 バンチまたは 200 ns 台の間隔で 2 バンチのビームを得ることができる。取り出しラインには、2 台の stripline kicker と 3 台の stripline BPM が設置され、高速 digital feedback system の基礎開発が行われてきた (Figure 6)。ここではミクロンレベルのビームであるが、応答速度 133 ns、仮想衝突点 BPM(IPC)の位置でのビーム位置ジッターを 1.7 μm から 1/8 の 290 nm まで低減させることに成功している。

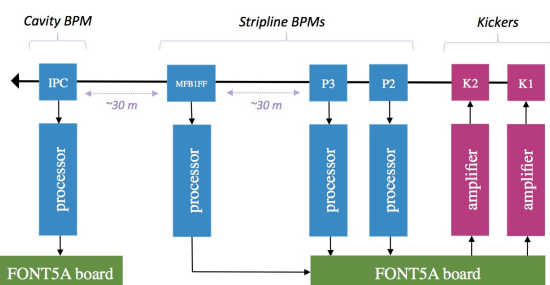


Figure 6: Setup of the upstream FONT feedback.

ILC では、衝突点のビーム位置安定度は、衝突点で交差する電子・陽電子ビームの反跳粒子から評価する。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。

一方、試験ビームライン ATF2 では仮想衝突点 (近傍) に BPM を設置できるので、ナノメートルレベルのビーム位置安定化を直接評価し、技術開発を進めることが可能である。そのためには 2 nm 分解能を持ち 150 nsec 後の後続バンチとの信号分離を可能とする Q 値の低い空洞型 BPM が必要となる。ATF2 では、ビームサイズを測定する IPBSM レーザーとの干渉を避ける必要があり、仮想衝突点(IP)を挟んで、上流に一体化された BPM2 台、下流に独立な 1 台を、同じ真空チェンバー内に設置した(Figure 7)。各々のブロックにはピエゾムーバーが取り付けられ、相対位置調整や感度較正を行うために BPM を $\pm 150 \mu\text{m}$ 動かすことができる。

仮想衝突点での FONT feedback の構成を Figure 8 に示す。ここで安定化の限界を決定するのは BPM の位置分解能となるが、そもそも分解能 2 nm の実現は容易ではない。しかも ILC では必要としない技術である。しかしながら、ナノメートル位置安定化技術を直接確認できるのは ATF2 だけであり、この高分解能を追求し、技術を

確立することは極めて重要である。高分解能のためには、BPM 本体の形状精度に加え、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。

IP での空洞型 BPM を用いた FONT feedback 試験の結果を Figure 9 に示す。Feedback off で約 420 nm のビーム位置ジッターがあるが、Feedback On ではジッターが 1/6 の 74 nm まで大きく低減している[11]。これは試験当時の BPM の読み出し位置分解能と同程度である。ATF2-IP の BPM 空洞は、加工したアルミブロックを積み重ね、ボルトで締め付けて構築されたものである。しかし、歪みにより接合部に空間が生じ、空洞の Q 値が設計の半分まで落ち込み、ビーム信号の減衰が早く、位置分解能が制限される問題があった。そのため、2017 年 5 月までに接合部を改善して、設計どおりの Q 値に戻す対策

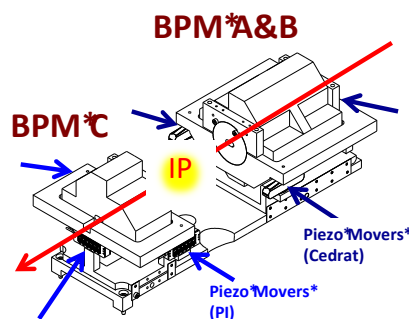


Figure 7: Cavity BPM on piezo mover for ATF2.

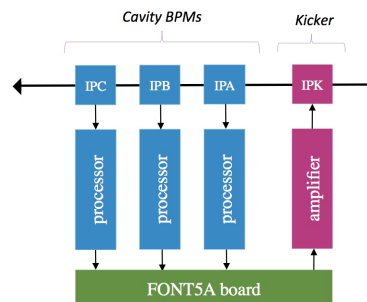


Figure 8: Setup of the IP FONT feedback.

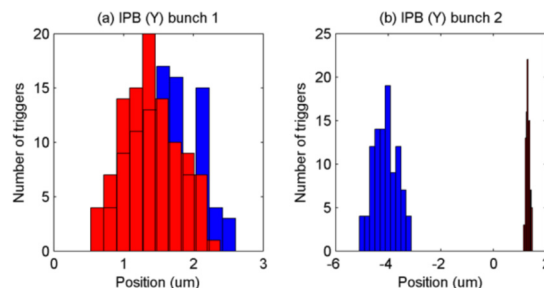


Figure 9: Beam position at IP BPM w/o FONT.

を施した。この結果、BPM の分解能が従来の 1/2 程度となる 20 nm まで大きく改善された。さらに今後は Wakefield 対策の結果としてビーム電流が増やせる状況になったことから、数 nm の分解能を目指して技術開発を進めることが期待されている。

3. その他の技術開発

近年、ATF の研究開発において、CERN の貢献が大きくなっている。CLIC では、より先端的な技術が必要であり、それは ILC にも役立つものになる。CLIC の最終収束ビームでは、ILC の 5 倍も大きい Chromaticity の補正技術が必要であり、それは ATF2 において 20 nm のビームサイズを実現することを意味する[12]。この技術開発を進めるために必要な Octupole magnet が CERN で製作され、2016 年 11 月に ATF2 ビームラインに組み込まれた(Figure 10)。

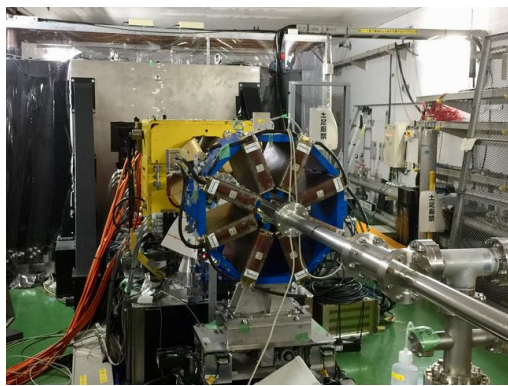


Figure 10: CERN's octupole (blue) installed in the final doublet system at ATF2.

ILC や CLIC 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ビームラインでのビームハローの理解、beam collimator の最適化が進められている[13,14]。2016 年 3 月に垂直方向の可動型 Beam Collimator が ATF2 に導入された(Figure 11)。ATF2 ビームラインの wakefield 研究の結果、従来から使用していた IPBSM バックグラウンド低減用固定 collimator (テーパ管) の影響が大きいことが判明した。そのため、固定型を撤去すると共に、可動型 collimator を低 wakefield 源の主たる collimator として運用している。

ILC 最終収束ビームラインで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[15]も CERN により進められている。

CLIC では、床振動によるビーム位置のズレを高速で補正するために、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する feedforward 技術が検討されており、この技術開発も ATF2 を利用して進められている。CERN から高感度振動計 14 個が持ち込まれ、FONT フィードバックと連動させるなどの試験が進められている[16]。

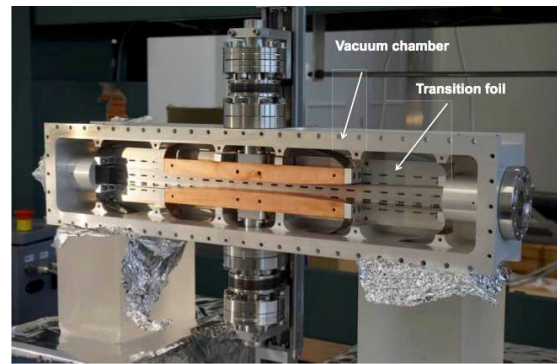


Figure 11: Schematic configuration of the ODR system installed in the ATF2.

4. 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研究者が参加しており、特に大学院生の教育の場として重要な役割を担っている。

ナノメートルビーム技術開発を行う ATF2 では 40 nm 台のビームサイズを実現すると共に Wakefield の評価試験などを進めている。衝突点でのナノメートル位置制御技術開発は、空洞型 BPM の分解能を改善しながら進めており、ビーム位置ジッターを 1/6 以下に低減するなどの成果を得ている。その他、CLIC との技術開発も進められており、ILC 技術の更なる高度化を狙った総合的なナノメートルビーム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] P. Bambade *et al.*, Phys. Rev. ST-AB 13, 042801 (2010).
- [4] V. Balakin *et al.*, Phys. Rev. Lett., 74 2479 (1995).
- [5] L. J. Nevay *et al.*, Phys. Rev. ST-AB 17, 072802 (2014).
- [6] T. Shintake, NIM A 311, 455 (1992).
- [7] T. Suehara *et al.*, NIM A 616, 1 (2010).
- [8] T. Okugi *et al.*, Phys. Rev. ST-AB 17, 023501 (2014).
- [9] G. White *et al.*, Phys. Rev. Lett. 112, 034802 (2014).
- [10] P. Burrows *et al.*, Proceedings of IPAC'14, TUPME009 (2014).
- [11] N. Blaskovic Kraljevic *et al.*, Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, THPOR035 (2016).
- [12] M. Patecki *et al.*, Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, THPMB043 (2016).
- [13] S. Liu *et al.*, NIM A 832 (2016) 231–242.
- [14] N. Fuster-Martínez *et al.*, Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, TUPIK075 (2017).
- [15] R. Kieffer *et al.*, Proceedings of IBIC2015, Melbourne, Australia, TUPB057 (2015).
- [16] D. Bett, Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, TUPIK097 (2017).