

ATF2 プロジェクト

東京大学 素粒子物理国際研究センター

佐 貴 智 行

sanuki@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

2006 年 (平成 18 年) 2 月 28 日

ATF2 プロジェクトとは、次世代電子陽電子加速器・衝突器 (リニアコライダー) において素晴らしい物理成果を上げるために進めている研究の一つである。

唐突ではあるが、ATF2 プロジェクトでは

(A) 37 nm という極めて小さなビームサイズの実現

(B) ナノメートルレベルでのビーム軌道制御の実証

の実現を目指している。リニアコライダーといえば、加速勾配が 36 MeV/m であるとか、全長が 40 km であるとか、システムの巨大さが目立つ中であって、非常に精緻な技術の開発を目指す ATF2 プロジェクトについて紹介したい。

1 ビームを加速しただけでは …

TeV エネルギーの世界を電子陽電子衝突で探るリニアコライダー計画は国際協力で建設を目指すことが 2004 年の夏に確認され、International Linear Collider (ILC) と命名された。その後、世界各地で加速器と測定器の開発研究が精力的に行われているのは高エネルギーニュース誌でも報告されているとおりである。

リニアコライダーはその名が示すように直線であるので、主線形加速器を収めるために長大なトンネルを必要とする。このトンネルを少しでも短くするために、あるいは、限りあるトンネルの中で少しでも高いエネルギーに到達するために、加速勾配を上げる必要があるのは言うまでもない。しかし、高い加速勾配が得られればそれで済むわけではない。何度も衝突のチャンスがある LEP のような円形衝突器と異なり、リニアコライダーでは電子や陽電子に与えられる衝突のチャンスはたった一度きりである。この状況下でも優れた物理成果を上げるためには、ビームが交叉する 1 回あたりの衝突確率を極限にまで上げることが必須である。すなわち、できるだけ多くの電

子や陽電子をできるだけ小さなバンチに押し込み、密度を最大限にまで高める。ILC では、長さ方向が 150 μm 、水平方向が 550 nm、垂直方向にいたっては僅か 5 nm という非常に狭い空間の中に、進行方向がよく揃った 10^{10} 個の電子や陽電子を詰め込む計画になっている。

リニアコライダーの全長は、重心系のエネルギーが 1 TeV の場合には電子側、陽電子側が各々 20 km ほどになる。わずか 5 nm の電子と陽電子のバンチを 20 km 走らせて、正面衝突させるといっても実感がわかない。これは、地球軌道上の太陽を挟んでちょうど反対の位置 (たとえば、1 月 1 日と 7 月 1 日の地球の位置) からピンポン球を打ち出して、正面衝突させることに相当する。これでは、衝突を保証することは絶望的に難しい。しかしながら、ILC は高速のフィードバックシステムを有する。ビーム軌道の位置を常に測定し、その結果を用いて補正しながら、衝突点まで正確に導くのである。5 nm の電子と陽電子のバンチを正面衝突させるためには、nm レベルでビームの軌道を測定して制御することが不可欠である。さもなくば、史上最高エネルギーの電子ビームと陽電子ビームは、虚しくすれ違うだけである。ビームを加速しただけでは、物理実験ができない。

2 最終収束系

上で述べたとおり、ビームを細く絞り込み、その軌道をナノメートルレベルで制御して確実に衝突させることが、リニアコライダーにおける物理実験には必須である。ILC においては、主線形加速器を出てから、電子と陽電子のそれぞれが 1,800 m ほどの「最終収束系」を持つ。このセクションでは、エネルギーや運動方向をそろえると共に、ビームを細く絞り込む。絞り込まれたビームのサイズや軌道は、高精度で瞬時に測定し、測定器の中央で相手のビームと衝突させるべく、高速のフィードバ

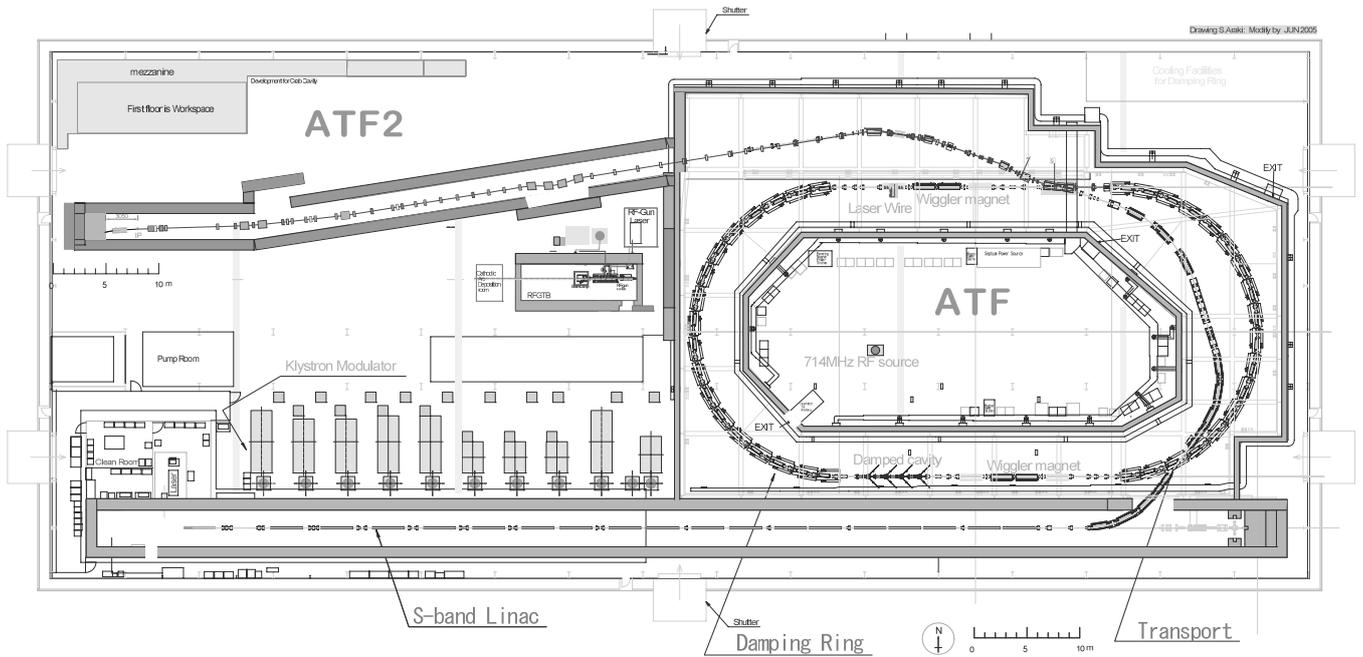


図 1: ATF2 全景図。

クをかける。このように、非常に高いエネルギーのビームを扱う巨大なシステムでありながら、高速で精緻な一面を持つのが最終収束系であると言える。

3 試験施設

主線形加速器の基幹技術である超伝導加速空洞を試験する施設は TTF (DESY)、SMTF (FNAL)、STF (KEK) などがある。一方、最終収束系を実証するためには Final Focus Test Beam (FFTB) という施設が SLAC にあったが、既に稼働を終了した。FFTB では、1994 年から始まった実験で、電子ビームを 70 nm 程度にまで絞り込むことに成功している。

その後、最終収束系の性能を向上させると同時に、長さを短くしてリニアコライダーの全長を少しでも短くすることを旨として、主に計算機シミュレーションによる研究が進められた。現在では、local chromaticity correction の原理に基づいたコンパクトな最終収束系が提案され [1]、ILC でも採用されると見込まれている。

物理実験をする上でも最終収束系は極めて重要なので、この新しい原理に基づく最終収束系が確実に動作することは実際にビームを使った試験によって確認したい。ところが、FFTB はすでに運転を停止しているため、新しい試験施設が必要になる。また、ビーム同士を実際に衝突させるために必要なナノメートルレベルの測定と制御の技術は開発が始まったばかりである。このナノメートル

レベルの技術を実際の電子ビームを用いて実証するためには、電子ビーム自身の大きさが十分に小さくしなければならない。ビームサイズがマイクロメートルであったら、ナノメートルレベルの技術の実証は決してできない。

ビーム自身を研究対象として最終収束系の実証を行った後には、この収束系から出てくる極細ビームを用いて測定・制御技術を実証することになる。このように、最終収束系の試験施設は、最終収束系自身の実証研究のみならず、リニアコライダーで必要になる種々のビーム診断装置の開発のためにも極めて重要である。

4 ATF2 プロジェクト

2004 年 11 月、リニアコライダーの実現を国際協力を目指す ILC 計画が提案されて最初の国際ワークショップが KEK において開催された。この場に於いて、日本グループは ATF2 プロジェクトを提案した [2]。ATF Damping Ring が作り出すリニアコライダー仕様の超低エミッタンスビームを取り出して ILC で使用する最終収束系のミニチュア版に通し、上に述べたような local chromaticity correction の原理に基づいたコンパクトな最終収束系の原理証明と、ナノメートルレベルのビーム制御技術の開発・実証を目指すプロジェクトである。これは、2000 年から日本国内で検討されていた計画 [3] を ILC-Asia, Working Group 4 の中で検討し [4]、ILC 用に発展させたものであった。図 1 に ATF および ATF2 の全景図を示す。

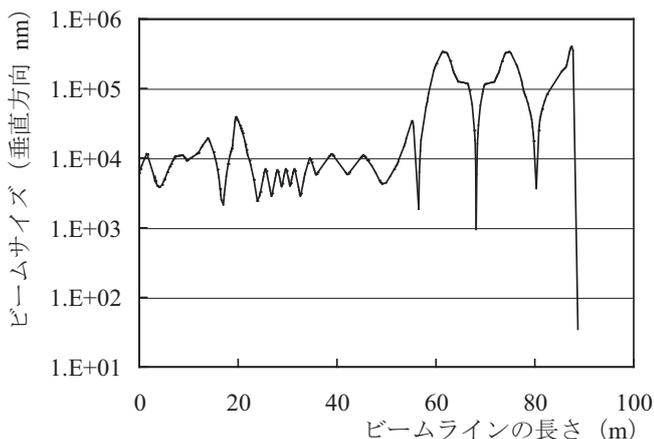


図 2: ATF2 におけるビームサイズ。ビーム焦点 (90 m 付近) において 37 nm にまで絞り込む。

2005 年度中は、ATF2 プロジェクトの目的を明確にし、その意義を明らかにすると同時に、目的を実現するために必要なハードウェアの検討を続け、プロジェクトを推進するための国際組織を作り、作業と予算の分配作業を進めてきた。2005 年 8 月に ATF2 Proposal Vol.1 [5] を公表し、「ATF2 とは何か?」(目的とハードウェア) について説明した。さらに、2006 年 2 月には「ATF2 を如何にして実現するか?」(スケジュール、推進体制、予算) を説明する ATF2 Proposal Vol.2 [6] を発表した。本紹介文は、これら二冊の文章を元としている。

冒頭でも紹介した ATF2 プロジェクトの目的をもう少し詳しく書くと、

- (A) 37 nm という極めて小さなビームサイズの実現
 - (A1) コンパクトな最終収束系の実証
 - (A2) 極小ビームサイズの維持・再現性の実証
- (B) ナノメートルレベルでのビーム軌道制御の実証
 - (B1) ビーム軌道安定化技術の実証
 - (B2) バンチ毎の軌道制御技術の確立

である。

目的 (A) のためには、local chromaticity correction の原理に基づいたコンパクトな最終収束系を構成する電磁石、高精度の電磁石用電源、磁石の位置を正確に制御するムーバー、ビームが磁石内の所定の位置を通過していることを確認するビームポジションモニタなどを開発・制作する必要がある。これらをコントロールする制御系や、ビームサイズを測定するモニタも必須である。図 2 に予想されるビームサイズを示した。また、目的 (B) を

実現するためには、ビーム焦点におけるビーム軌道をナノメートルの精度で測定する高精度ビームポジションモニタや、測定したビーム軌道位置情報を用いて最終収束磁石にフィードバックをかける高速のムーバーなどが必要になる。ハードウェアの詳細については、文献 [5] を参照されたい。

5 ATF2 と ILC 最終収束系

ATF Damping Ring が作り出す電子ビームのエミッタンスは非常に小さく、ILC の仕様を満たす。しかし、そのエネルギーは 1.3 GeV と、ILC の 250–500 GeV と比較して数百分の一である。これほどエネルギーが違っても ATF2 が ILC 最終収束系の実証に役立つのか確認しておく必要がある。

表 1 は、ILC と ATF2 の主要なビームパラメータを比較したものである。詳細は ATF2 の提案書 [5] に譲るが、ビームエネルギーを除くパラメータが非常に似通っていることが分かる。ATF Damping Ring から取り出されるビームを用いた実験では、ILC の最終収束系を通るビームを模擬することが可能なのである。

表 1: ビーム焦点におけるビームパラメータの比較

Parameters	ATF2	ILC
Beam Energy [GeV]	1.3	250
L^* [m]	1	3.5 – 4.2
$\gamma \epsilon_x$ [m-rad]	3×10^{-6}	1×10^{-5}
$\gamma \epsilon_y$ [m-rad]	3×10^{-8}	4×10^{-8}
β_x^* [mm]	4.0	21
β_y^* [mm]	0.1	0.4
η' (DDX) [rad]	0.14	0.094
σ_E [%]	~0.1	~0.1
Chromaticity W_y	~ 10^4	~ 10^4

ビームを正確に輸送するためには、マグネットなどを設計通りの位置に設置する必要がある。ビームが持つ性質が ATF2 と ILC で似通っていたとしても、ATF2 ビームラインの設置に要求される位置精度が ILC よりも圧倒的に緩い場合、ATF2 での設置に成功したとしても、ILC 最終収束系を実証したことにはならない。図 3 に設置に要求される精度をまとめた [5]。横軸は四極磁石の名前を示しており、左側が上流、右端がビーム焦点である。縦軸はビームサイズが 2% 大きくなってしまいう許容誤差を示している。これらは、計算機によるシミュレーションの結

果である。図 3 左上の図は、ATF2 で使用する磁石の磁場強度は、ILC よりも精密に制御する必要があることを示している。ATF2 は、ATF Damping Ring と同じ KEK のアセンブリホール内に設置するので、わずか 40 m ほどの長さに最終収束系のコンポーネントを押し込んでい。このために、ビームエネルギーの低さを考慮しても磁場強度は相対的に高くなってしまっており、磁場強度の変化に対して過敏に反応するためである。右上の図を見ると、磁石の回転方向の許容誤差は、ILC と ATF2 で非常に似通っていることが分かる。下の二つの図は、最終収束磁石 (QF1 と QD0) 以外の磁石においては、ATF2 で許容される設置位置の誤差が ILC よりも大きいことを示している。これは、ビーム焦点におけるビームサイズは ATF2 の方が大きいためである。以上のように、許容される誤差の量は誤差の種類によって異なるが、大まかに言ってしまうと、ILC と ATF2 では似通っている。

上で見たきたように、ATF2 と ILC では、同じようなビーム光学系を、同じような精度で設置し、同じような品質のビームを通す。いわば、舞台も主人公も、大きさこそ異なるが非常に似ている。従って、ATF2 は ILC 最終収束系の実証の場になるのである。

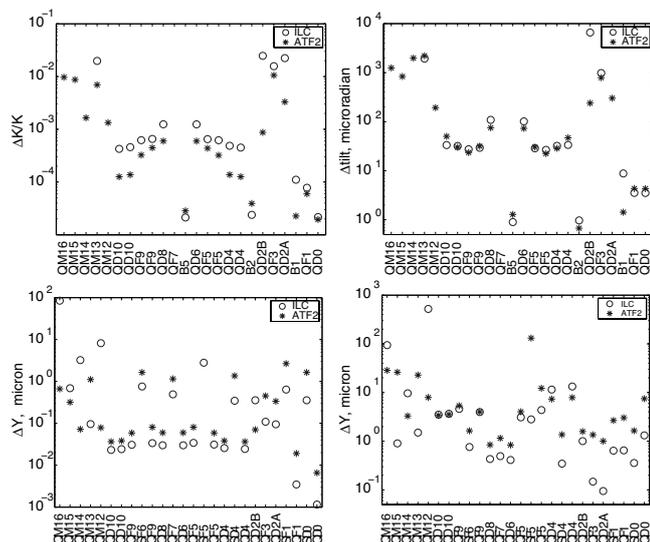


図 3: ATF2 (○) と ILC 最終収束系 (*) の磁石に対する許容誤差。ビームサイズが 2% 増大してしまう誤差を示している。Field strength error (左上)、Magnet tilt error (右上)、Jitter position error (左下)、Static position error (右下)。詳細については、文献 [5] を参照のこと。

6 推進体制

2004 年 11 月に ATF2 プロジェクトを ILC グループに提案した当初から、完全な国際協力によって進めてきた。ATF2 プロジェクトは、国際協力で施設を設計・建設するという意味でも、ILC のモデルになることを目指している。機器の製作や施設の建設の段階から国際協力を進めるために、方針の決定・作業の分担・予算の管理などを行う組織が必要である。

ATF2 グループが推進体制の確立に頭を悩ませているのと同時期に、ATF の国際協力体制をより明白にすべく、ATF International Collaboration が刷新された [7]。この際に、ATF の組織の中に ATF2 プロジェクトの代表者が指名され、ATF2 プロジェクトは ATF が掲げる主要なプロジェクトの一つとして定義された。ATF2 が提案された当初は、ATF において進められている研究とは独立して検討されてきた側面もあった。今後は、ATF と密接な関係を保ちつつ、ATF2 プロジェクト代表者の元で国際協力で進めていくことになる。

国際的な「分業」も進んできた。非常に大まかには、ビーム光学系の設計はアメリカ、フィードバック系の設計はヨーロッパ、マグネットとマグネットに取り付けるビームポジションモニタはアジアが中心になって進めている。しかしながら、テレビ会議、メーリングリストを活用した交流も盛んで、ある分野に特定の地域だけが関わるといったことはない。また、定期的に国際ワークショップを開催し、詳細な設計を進めつつある。現在は、コスト評価が終わり、世界各国の人的・物的・金銭的な協力をとりまとめている。幸いなことに、各地域の様々な研究機関から協力を得られる見込みである。

ATF2 のホスト国である日本の研究者は、ビーム光学系の設計や電磁石・ビームポジションモニタの設計・製作はもちろんのこと、床工事や冷却水系統の設計まで、非常に広範な分野で活躍している。しかしながら、ATF2 プロジェクトにおいても、人的資源は非常に厳しいと言わざるを得ない。ビームを診断するモニタやフィードバック装置などの新規開発項目が多いので、大学院生の皆さんでも興味を持って取り組めることと思う。私が属している大学の大学院生も、37 nm のビームサイズを測定するのに不可欠なビームサイズモニタ (新竹モニタ) の改良に取り組んでいる。血の気の多い大学院生の皆さんの参加を心待ちにしている。

