

## ATF2 の国際協力体制と第 3 回プロジェクト会議

佐貫 智行\*

## Report of Third ATF2 Project Meeting

Tomoyuki SANUKI\*

## Abstract

For achieving the high luminosity required at the International Linear Collider (ILC), it is critical to focus the beams to nanometer size with the ILC Final Focus System, and to maintain the beam collision with a nanometer-scale stability. To establish the technologies associated with this ultra-high precision beam handling, it has been proposed to implement an ILC-like final focus optics in an extension of the existing extraction beamline of ATF at KEK. The two major goals for this facility, called ATF2, are: (A) Achievement of a 37 nm beam size, and (B) control of beam position down to 2 nm level. The 3rd ATF2 Project meeting was held at KEK in December, 2006 to discuss the detailed design and construction schedule.

ATF2 プロジェクトとは、素粒子物理学の新たなパラダイムを切り開くと期待される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。

## 1. 国際リニアコライダー

宇宙開闢の瞬間に迫り、宇宙初期に起きた高エネルギー現象を解明し、質量の重い粒子を発見して詳細に研究するためには、最高エネルギーに到達できる加速器、すなわちエネルギーフロンティア・マシンが最も直接的な研究手段であり、もっとも威力を発揮する。特に、素粒子である電子とその反粒子（陽電子）の衝突実験では、非常にクリーンな環境で素粒子反応を詳細に調べることが容易である。これは陽子のような複合粒子の衝突実験にはない特長である。

ところが、電子のような軽い粒子を円形加速器で加速していくと放射光によるエネルギーロスが深刻な問題となる。この問題を軽減するためには、曲率半径を大きくすればよい。その極限が線形加速器・衝突器「リニアコライダー」である。

TeV エネルギー領域の物理を電子陽電子衝突によって詳細に研究し、物質の成り立ちや時空の構造を明らかにすることを目指して、世界各国の研究者が時に

は協力し、時には闘いながら、リニアコライダーの開発研究を進めてきた。そして、2004 年の夏、国際協力によって世界に一つのリニアコライダーの建設を目指す方針が確認され、国際リニアコライダー（International Linear Collider; ILC）と命名された。世界各国の 60 名以上の科学者が所属する国際設計グループ（Global Design Effort; GDE）が組織され、加速器の設計や建設に必要な様々な R & D が世界各国で活発に進められている。2007 年 2 月に発表された ILC の基準設計報告書（RDR）の草案<sup>1)</sup>によれば、計画の初期では全長 31 km の加速器施設によって電子と陽電子が加速され、500 GeV のエネルギーで 1 秒当たり 14,000 回交叉する。将来的には加速器を増強して、1 TeV のエネルギーに到達することを目指す。図 1 に、ILC の外観図を示す。

## 2. 最終収束系

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

\* 東京大学 素粒子物理国際研究センター  
International Center for Elementary Particle Physics (ICEPP), The University of Tokyo  
(E-mail: sanuki@icepp.s.u-tokyo.ac.jp)

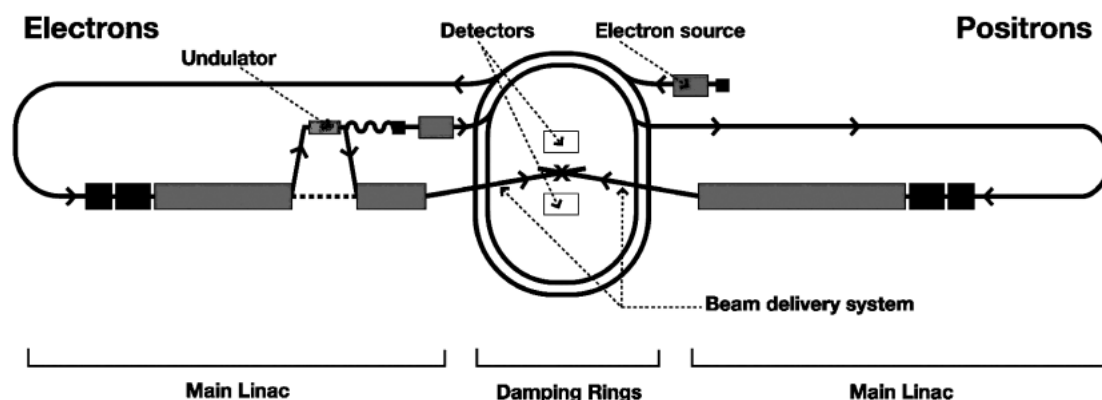


図1 ILCの外観図. 文献2)より.

チャンスがある KEKB 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、電子ビームと陽電子ビームが交叉する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め、密度を最大限にまで高める。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 2.2 km ほどのビーム輸送系を持つ。このセクションには「最終収束系」が組み込まれており、電子・陽電子の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。ILC の標準的なビームパラメータでは、長さ方向が  $300 \mu\text{m}$ 、水平方向が  $640 \text{ nm}$ 、垂直方向にいたっては僅か  $6 \text{ nm}$  という非常に狭い空間の中に、進行方向がよく揃った  $2 \times 10^{10}$  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  $1 \text{ TeV}$  の場合には電子側、陽電子側が各々  $25 \text{ km}$  ほどになる。わずか  $6 \text{ nm}$  の電子と陽電子のバンチを  $25 \text{ km}$  走らせて、正面衝突させるといっても実感はわからない。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。 $6 \text{ nm}$  の電子と陽電子のバンチを正面衝突させるためには、 $\text{nm}$  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。さもなければ、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。

幸いなことに、ILC は高速、かつ、高性能のフィードバックシステムを装備する予定である。絞り込まれたビームのサイズや軌道を瞬時に高精度で測定し、測

定器の中央で相手のビームと衝突させるべく、高速のフィードバックをかける。ビーム軌道の位置を常に測定し、その軌道をナノメートルレベルで制御して衝突点まで正確に導くのである。

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。そして、物理実験を成功させるために、最終収束系の十分な実証研究が不可欠である。

### 3. ATF2 プロジェクト

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、2004年11月に KEK で開催された。この場において、日本グループは ATF2 プロジェクトを提案した<sup>3)</sup>。すでに輝かしい成果を上げ続けている KEK の 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、コンパクトな最終収束系<sup>4)</sup>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<sup>5)</sup>を ILC-Asia, Working Group 4 の中で検討し<sup>6)</sup>、ILC 用に発展させたものであった。

日本が提案した ATF2 プロジェクトはその意義が大筋で認められたものの、「ゴールが不明確である」「予算規模がハッキリしない」などの問題も指摘された。そこで、世界各国のエキスパートからなるグループをただちに構成し、日本が主導する形で 2005 年度は、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た。その結果をまとめて、2005年8月に ATF2 Proposal Vol. 1<sup>7)</sup>として公表し、「ATF2 とは何か?」（目的とハードウェア）に

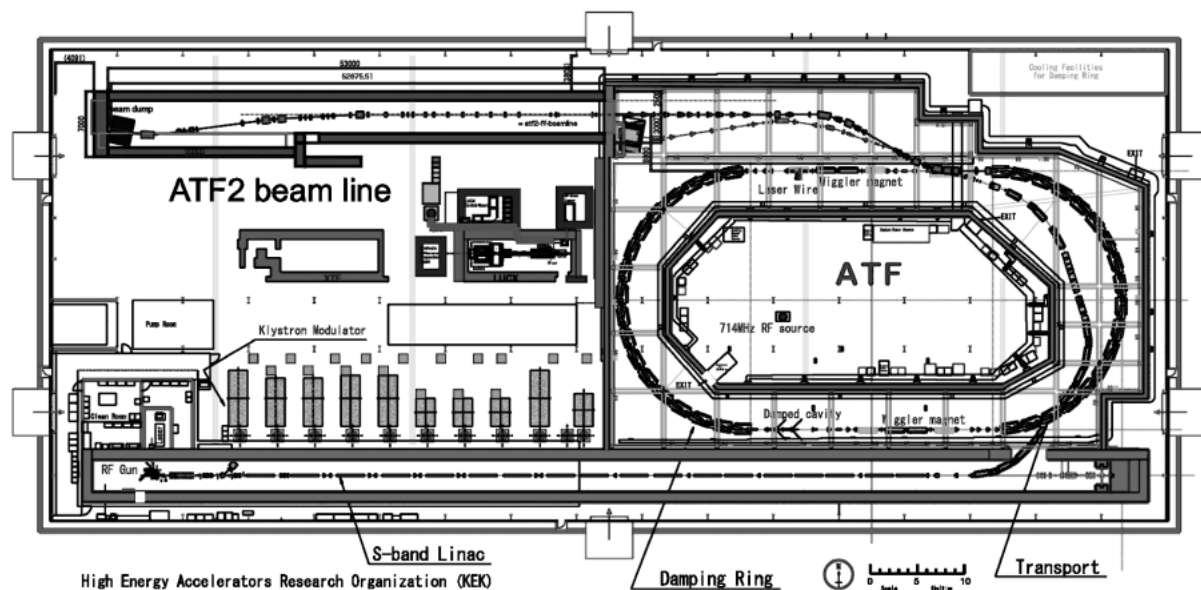


図 2 ATF2 の外観図。

ついて説明した。この中で、ATF2 プロジェクトの目的は以下のように定義されている。

- (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

図 2 に ATF および ATF2 の全景図を示す。

#### 4. 推進体制

ATF2 プロジェクトは 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。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が、本当に機能する組織を作ることは容易ではない。

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<sup>8)</sup>。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。こうして、2006 年 2 月には ATF2 を国際協力で建設する枠組みを確認し、「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<sup>9)</sup>の発表にまでこぎ着けたのである。ATF2 Proposal には、世界各国の 24

	ヨーロッパ	アメリカ	アジア
研究機関	12	6	7
研究者	51	22	36

図 3 ATF2 Proposal の著者リストにある研究機関と研究者の数。

の研究機関から 109 名の研究者が著者として名前を連ねている。これらを地域ごとに分けて示したのが図 3 である。ヨーロッパが健闘していることが判る。実は、英国からの参加者が多く、ヨーロッパからの参加者の 6 割を占める。英国では、10 以上の大学と研究所が LC-ABD (Linear Collider: Accelerator and Beam Delivery) というコンソーシアムを形成し、研究費とポストを得て加速器とビーム輸送系の研究を進めており、その効果が現れているのかも知れない。ATF2 プロジェクトも、その恩恵に与っているということなのだろう。

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。

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。

## 5. ATF2 プロジェクトミーティング

繰り返しになるが、ATF2 プロジェクトは 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。日常的な共同作業は、電子メールやテレビ会議を使うことになるが、本当に細かい点を詰めるためには、やはり集まって顔を突き合わせて議論するに限る。その場が ATF2 プロジェクトミーティングである<sup>10)</sup>。第1回目は米国 SLAC において、第2回は KEK において、いずれも 2006 年に開催し、主としてプロジェクトの目的やハードウェア、推進体制などについて話し合ってきた。

そして、この報告のタイトルにある第3回プロジェクトミーティングが 2006 年 12 月に KEK で開かれた。海外から 24 名、日本国内から 24 名が参加し、ハードウェアの詳細や機器のレイアウト、建設のスケジュールについて細かな議論が交わされた。今回のミーティングで感じたことは、大学院生やポスドクなどの若いメンバーからの報告が増えてきたことである。ILC が建設されたときに向けて若い加速器研究者の育成が課題であると言われることが多いが、ATF2 プロジェクトでは、若手研究者の育成という面でも成果を上げつつあるようだ。

予算の確保が難しいこともあって計画は遅れ気味である。しかしながら、そのような厳しい状況下にあっても、建設へ向けて各コンポーネントの設計と製作が進んでいることが次々と報告された。第1回、第2回のプロジェクトミーティングに比べると、非常に具体的な内容が多く、ATF2 の建設が近づいていることを実感した。

ミーティングの最後には 2008 年 10 月の実験を目指すことを確認し、各々の大学や研究所に課題を持ち帰った。今も、ATF2 建設へ向けた準備が世界各地で着々と進んでいるはずである。

## 6. おわりに

ATF2 プロジェクト、あるいは、ATF2 プロジェクトを含む ILC 計画全体は強力な国際協力の下で進められている。第3回 ATF2 プロジェクトミーティングは、そのごく一部でしかない。ATF2 プロジェクトに関わっていると、「諸外国から協力を求められるように、技術力を更に高めていくことが重要だ」と感じることが多い。我々が海外の研究者を必要とするだけでなく、我々も必要とされて初めて国際協力が成り立つ。さもなければ、我々は国際的な計画に参加させて



図4 第3回 ATF2 プロジェクトミーティングの様子。

いただくだけになってしまう。そうならないためにも、国際協力を進めるだけで良いわけでもなからう。時には厳しい国際競争もあった方が、実力を付けられるし、技術革新も進むに違いない。

宇宙誕生の謎や時空の構造を明らかにしたいという物理屋の夢のために、ILC という巨大プロジェクトの実現へ向けて様々な開発研究が国際協力で行われている。世界各国で平行して進められていた複数のリニアコライダー研究の一つにまとめることに成功し、国際協力が実現している背景には、プロジェクトの規模が大きくて金銭的にも一国では建設できないという理由も当然ある。しかし、金銭的理由を考えるだけでは楽しくない。“我々は何処から来て何処へ行くのか?” という「人類共通の興味」に答えるために、ILC プロジェクトを推進しているのだと信じたいものである。

## 参考文献

- 1) <http://www.linearcollider.org/cms/>,  
<http://lcdev.kek.jp/RDR/>.
- 2) The International Linear Collider-Gateway to the Quantum Universe.
- 3) <http://lcdev.kek.jp/ILCWS/>,  
<http://lcdev.kek.jp/ILCWS/WG4.php>.
- 4) P. Raimondi and A. Seryi, Phys. Rev. Lett. **86**, 3779 (2001).
- 5) J. Urakawa et al., KEK Preprint 2002-138 (2003).
- 6) <http://lcdev.kek.jp/ILC-AsiaWG/>.
- 7) ATF2 Group, “ATF2 Proposal Vol. 1”, CERN-AB-2005-035, CLIC note 636, DESY 05-148, ILC-Asia-2005-22, JAI-2005-002, KEK Report 2005-2, SLAC-R-771, UT-ICEPP 05-02 (2005).
- 8) <http://atf.kek.jp/collab/md/organization/>
- 9) ATF2 Group, “ATF2 Proposal Vol. 2”, CERN-AB-2006-004, DESY 06-001, ILC-Asia-2005-26, JAI-2006-001, KEK Report 2005-9, SLAC-R-796, UT-ICEPP 05-04 (2006).
- 10) <http://atf.kek.jp/collab/ap/projects/ATF2/>.