

電子・陽電子リニアコライダー（GLC計画）

駒宮幸男

東京大学大学院理学系研究科 〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1

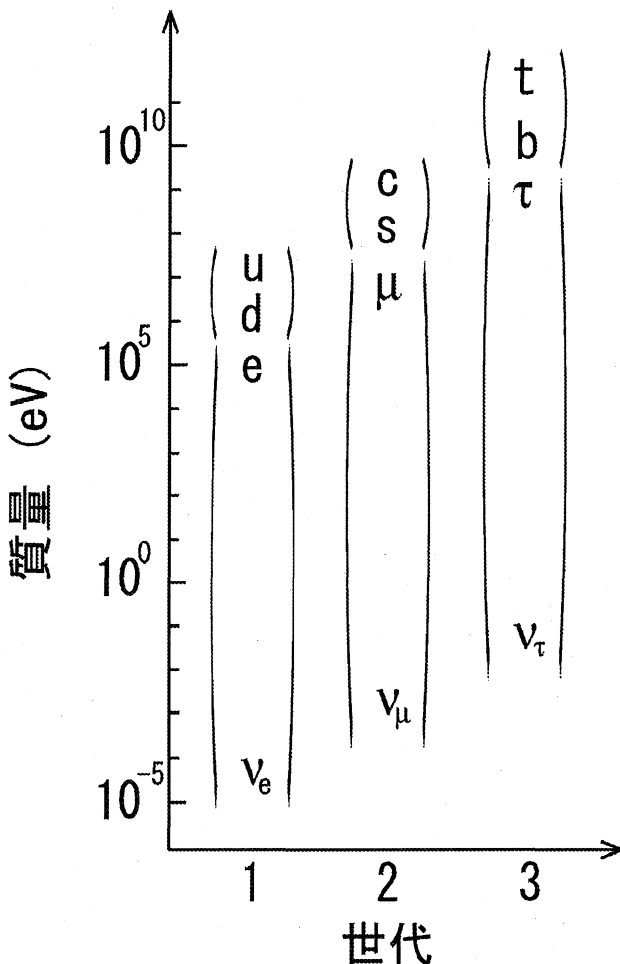
sachio@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

1 素粒子物理学の現状と電子・陽電子リニアコライダーの科学的な重要性

素粒子物理学は今大きな転換点に立っている。現在の「標準理論」を超えるパラダイムの転換が次世代の最高エネルギーの加速器によって確実にもたらされるであろう多くの実験的・理論的証拠がある。

1970年代に理論的に出来上がった素粒子の「標準理論」は、その後実験的な検証を受けて確立された。「標準理論」では、クォークとレプトンが物質を構成する基本的

図1：クォーク・レプトンの世代構造



な素粒子であり、その間に働く力（相互作用）はゲージ対称性で統一的に説明されている。陽子や中性子はクォーク3個からなる複合粒子で、もはや素粒子ではない。電子やニュートリノはレプトンの仲間でもクォークと同じレベルの素粒子である。我々の体や宇宙の星は u-クォーク、d-クォーク、電子の3種類から出来ており、これに電子ニュートリノを加えたクォーク・レプトン4種類を第一世代とすると、質量が重いだけで基本的には同じパターンが3世代繰り返されている（図1参照）。一方、相互作用はゲージボゾンと呼ばれる素粒子をやりとりすることによって力が伝達される。「標準理論」では、電磁相互作用、強い相互作用、弱い相互作用が、それぞれ、光子、W及びZボゾン、グルーオンというゲージボゾンによって媒介されている。一般の物質は原子の階層で既に電荷は中和されているので、我々は通常電磁相互作用を感じるのとは感電したときなどに限られ、地球の引力（重力相互作用）を専ら感ずることになるが、素粒子の世界では重力は解明されておらず、又他の相互作用に比べて非常に弱く無視できるため「標準理論」の枠には入っていない。ゲージ対称性があると素粒子は質量を持たない。ゲージ対称性を破り素粒子に質量を与えるのがヒッグス粒子の役割である。このヒッグス粒子の発見とその性質の解明が、現在、緊急かつ最重要な実験的課題である。「標準理論」の問題点を挙げると、(a) 重力相互作用を無視している、(b) 異なる相互作用が統一されていない、(c) 質量の起源「ヒッグスボゾン」が発見されていない、(d) 何故3世代のクォークとレプトンが存在するかの説明がなく、質量や粒子混合のパラメータが多すぎる、などがすぐに挙げられる。

高いエネルギー素粒子実験の目的の一つは、高温すなわち高エネルギーのビッグバンにより近づくことであり、宇宙初期において普通に起っていた素粒子反応を一瞬実験室で実現し、宇宙史を地上での実験で解き明かすことである。一方、最近の宇宙の観測によって宇宙のエネルギー組成が明らかにされてきた。これらの観測によって、恒星や星間ガスを構成している陽子、中性子、電子などのような我々が知っている粒子が担っているエネルギー（質量）は約4%に過ぎず、宇宙のエネルギー密度の殆どは宇宙の加速的な膨張と関係する暗黒エネルギー（約73%）と銀河に0.3 [GeV/cc]の密度で存在することが分かっている暗黒物質（約23%）が、占めているという驚くべき事実を我々は知った。暗黒エネルギーと暗黒物質の起源を素粒子物理学に求める試みも行なわれつつあり、極微の世界を探索する素粒子物理学と壮大な宇宙物理学は、もはや一つの大きな学問分野として融合されつつある。宇宙と関連して素粒子物理学をみれば、(e) 何故我々の住んでいる時空は空間3次元、時間1次元なのか、(f) 宇宙の暗黒エネルギーの正体は何

なのか、(g) 暗黒物質は何から出来ているか、(h) 宇宙には物質に比べて反物質が非常に少ないのは何故か。など更に多くの謎がある。

電子・陽電子リニアコライダー「GLC」^{脚注}は、これらの原理的な物理の問題のいくつかに正確な解答を与える画期的な加速器である。これらを順次説明していこう。

質量の起源であるヒッグス粒子は、LEPの実験などで軽いことが分かりパラメータ空間の隅に追い詰められ、CERNで2007年に稼働する陽子・陽子衝突型加速器LHCにおいて恐らく発見されるだろうが、質量や真空構造の原理的な説明はリニアコライダーが担う。ヒッグス粒子が質量の起源であることを証明するには、ヒッグス粒子とクォーク、レプトン、ゲージボゾンとの相互作用の強さを精密に測定する必要がある。リニアコライダーではヒッグス粒子(h)はZボゾンとともに生成され($e^+e^- \rightarrow h+Z$)、Zボゾンの性質はLEPの実験で非常に精密に測定されているので、ヒッグス粒子の生成・崩壊の詳細研究が可能である。リニアコライダーでは10万個以上のヒッグス粒子を生成できるので、ヒッグスファクトリーと呼ばれている。更にリニアコライダーの衝突エネルギーをTeV領域まで伸ばせば、ヒッグス粒子どうしの相互作用を測定でき、ヒッグス粒子が真空中に凝縮していることが証明できる。

脚注：今年4月に、Asian Committee for Future Accelerator が中心となって、それまでのプロジェクト名であったJLC (Japan Linear Collider) から国際性を重視したGLC (Global Linear Collider) に名称変更した。

素粒子には自転の量子数であるスピンを持っており、スピンの半整数 (1/2, 3/2, ...) の粒子はフェルミ粒子と呼ばれ、スピンの整数 (0, 1, 2, ...) の粒子はボーズ粒子と呼ばれる。フェルミ粒子とボーズ粒子の性質は全く異なる。フェルミ粒子は2個以上の同種粒子が同じ状態を占めることは出来ず (パウリの排他律)、ボーズ粒子はそれが可能である。電子はスピン1/2のフェルミ粒子であり、パウリの排他律によって原子は電子の殻構造を保っている。電子がボーズ粒子ならば全て一番低いエネルギーの状態に落ち込んでしまい、原子は我々が存在する余地のない構造に落ち込んでしまう。超対称性はフェルミ粒子とボーズ粒子を統一する対称性が我々の時空の構造 (空間3次元+時間1次元) に加えて存在するという画期的な理論であり、時空構造の数学的な拡張から自然に出てくる。超対称性があると、全ての素粒子にスピンが1/2異なる超対称性パートナーが存在しなくてはならない。超対称性パートナーの発見とその性質の解明もGLCでの重要な物理課題である。超対称性は重力を含めた全ての相互作用の統一への道を開く唯一の理論であり、超対称性があるとヒッグス粒子の質量を安定に保つことが出来る。宇宙の暗黒物質の最有力な候補は一番軽い超対称性粒子であり、超対称性の発見によって暗黒物質が解明される可能性もある。

空間3次元+時間1次元の時空構造 (超対称も含めて) に加えて小さくまるまった次元が存在し、その小さくまるまった次元の幾何構造によって全ての素粒子の性質が決まっているという超弦理論 (スーパーstring) を現在多くの理論家が研究している。超弦理論は実験的に検証することが困難であり、まだ「数学」の世界の話であるとされてきたが、このまるまった次元のうち幾つかの空間のサイ

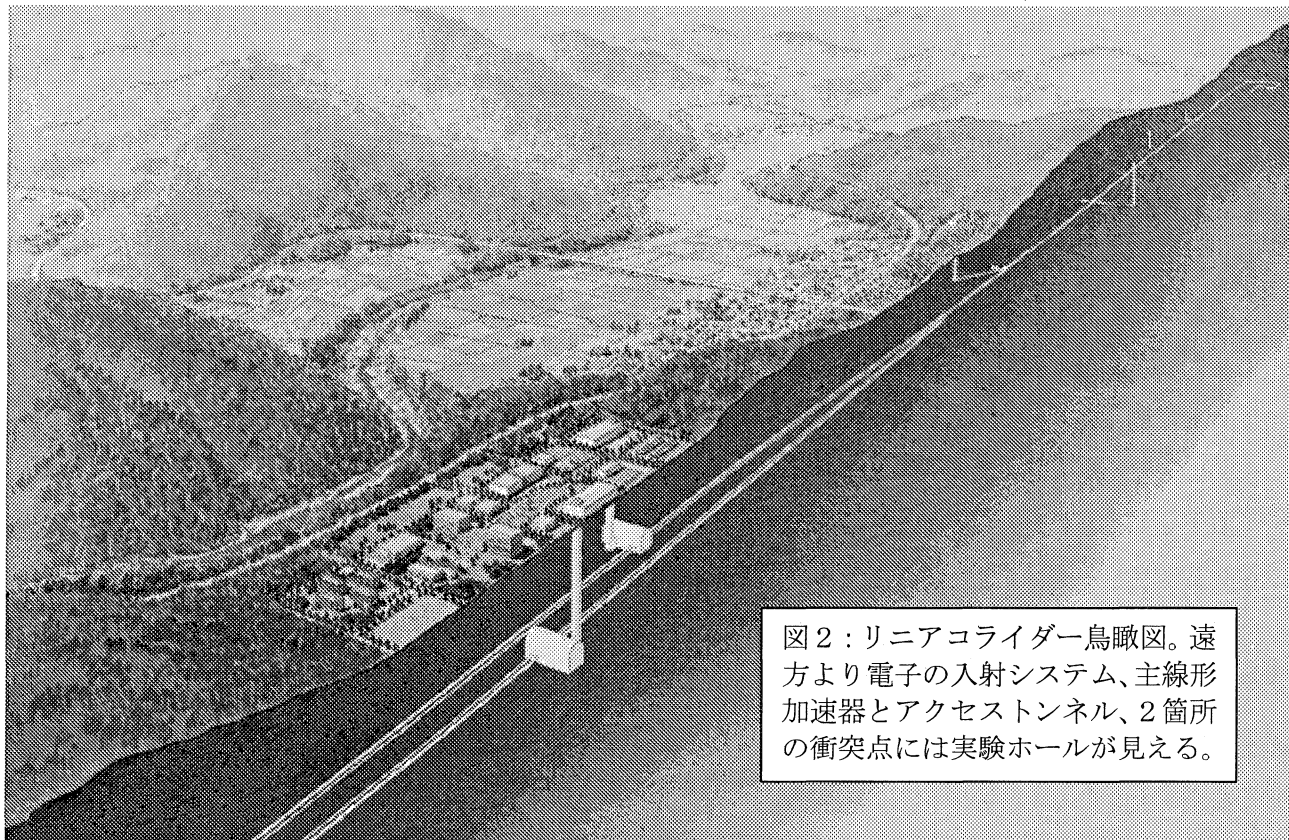


図2：リニアコライダー鳥瞰図。遠方より電子の入射システム、主線形加速器とアクセストンネル、2箇所の衝突点には実験ホールが見える。

ズが大きいと、高エネルギーの衝突実験でこの中から素粒子を直接たたき出して、まるまった次元の存在を検証することができる可能性も検討されるようになってきた。

これらの新粒子や新現象の発見と、それを説明する根源的な原理の解明はどれも、今までの素粒子物理を深いレベルで覆しパラダイムの転換をもたらす。

2 電子・陽電子リニアコライダーの構成

電子と陽電子は素粒子とみなすことができるので、 e^+e^- 衝突では素粒子の素過程をほとんどありのまま観測できるという本質的利点を有する。従って、複合粒子である陽子どうしの衝突実験に比べて実験は容易であり理論的な予測も正確である。また、電子と陽電子は粒子・反粒子の関係にあるので対消滅して、全ての衝突エネルギーを新たな粒子の生成に用いることができる。従って衝突エネルギーさえ高ければ、質量の重い新粒子を素過程で成できる。しかしながら、電子や陽電子は、質量が小さいので、加速器の円形軌道を回る時に放射光を出して、大きなエネルギーを失う。このエネルギー欠損は軌道半径に反比例しエネルギーの4乗に比例するので、高いエネルギーを得るには非常に大きな半径のコライダーが必要となる。世界最大のLEPの周囲は約27kmで東京の山手線の軌道に匹敵するサイズであり、円型コライダーでは予算的に、もはや限界にきている。そこで、電子と陽電子を直線で向かい合わせ

て一挙に加速して、正面衝突させる放射光の出ないリニアコライダーが考案された。

リニアコライダーは、前段システム（電子源、陽電子源、ダンピングリングなど）、殆んど長さの占める主線形加速器、衝突点近くの最終収束系の3システムより構成される。重心系エネルギー1TeVを得るには全長約30キロメートルの長さが必要である。鳥瞰図を図2に示す。円形加速器では粒子を回して周回毎に加速することが出来たが、リニアコライダーでは直線で一挙に最終エネルギーまで加速するため、加速器を短く保つには主線形加速器の加速勾配を上げる必要がある。また、衝突点ではビームを非常に小さく絞り込んで電子や陽電子の密度を上げ衝突頻度を増やし、エネルギーのバラツキも小さくする必要がある。このためには衝突点でのビームを絞り込む最終収束系の開発は勿論のこと、主線形加速器に入射する前にビームを十分に絞りこむ前段システム（ダンピングリングなど）の開発が必要となる。リニアコライダーの入射システムのテストのため、高エネルギー加速器研究機構のATF（Accelerator Test Facility）では世界一小さいエミッタンス（空間的運動量的なばらつき）を持つビームを作り出している。

現在、リニアコライダー加速器技術の開発は、日本、米国、ドイツで行なわれており、激しい国際的競争と同時に国際協力が行なわれている。最も重要な主線形加速器に関しては、わが国（高エネルギー加速器研究機構：KEK）と米国

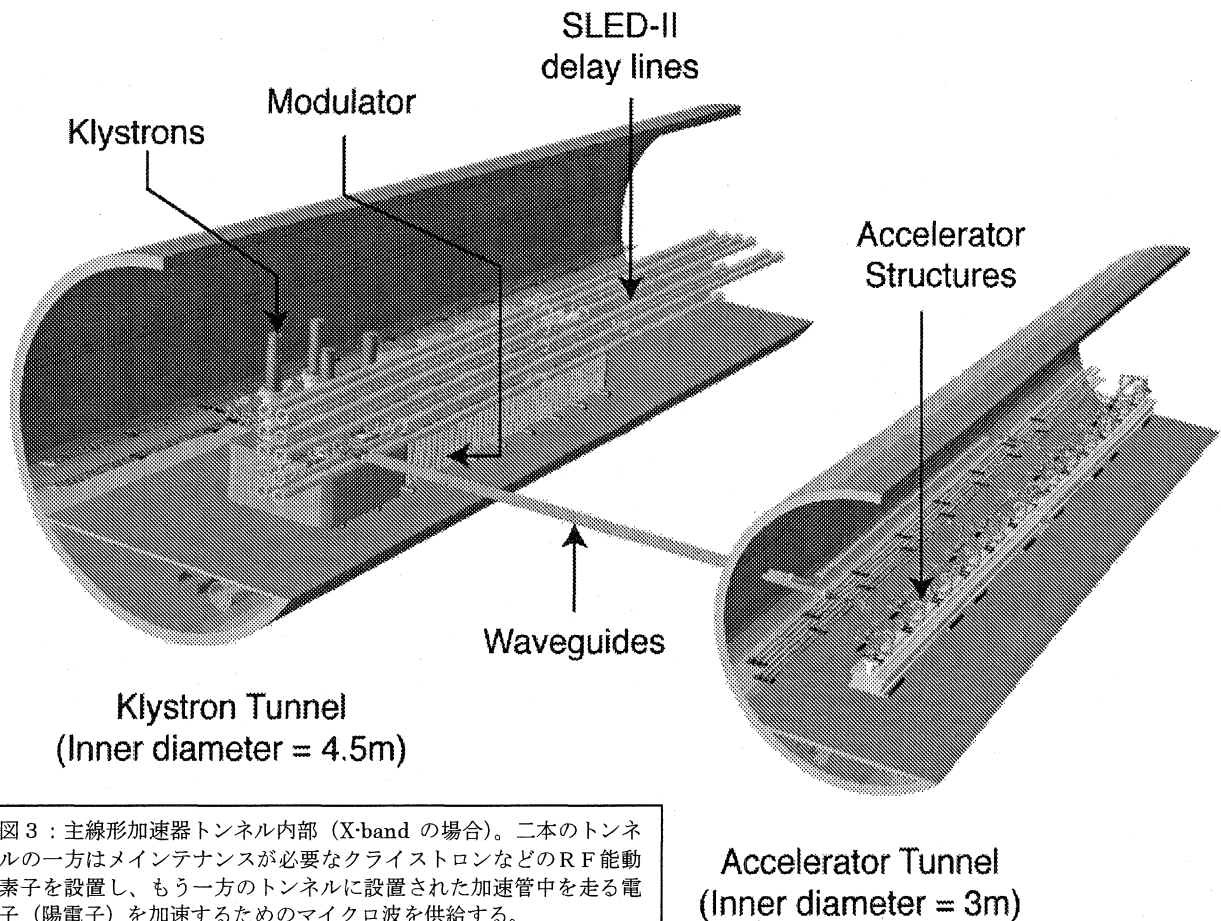


図3：主線形加速器トンネル内部（X-bandの場合）。二本のトンネルの一方はメンテナンスが必要なクライストロンなどのRF能動素子を設置し、もう一方のトンネルに設置された加速管中を走る電子（陽電子）を加速するためのマイクロ波を供給する。

(スタンフォード線形加速器センター：SLAC)は、高い加速勾配を達成するため常温の高周波加速管の開発を進めており、ドイツ(ドイツ国立シンクロtron研究所：DESY)は、大きなルミノシティが期待できる超電導の低周波加速管を開発している。

主線形加速器の重要なポイントは十分に高い加速勾配を安定に保つことである。これにより、高いエネルギーでの電子・陽電子衝突が現実的な大きさの敷地で可能となる。わが国の開発研究では、最新技術による主線形加速器を波技術を基礎としている。双方とも室温で動作する進行波型加速管を採用する。X-bandの技術は50 MV/m またはそれ以上の加速勾配を可能とする。この値は40年程前に開発され現在最も標準的なS-band(2.856 GHz)の勾配である10 MV/m(最大でもKEKのATF線形加速器の30 MV/m)と比べると特筆に値する。X-bandの場合のトンネルの中の様子を図3に示す。二本のトンネルの一方はメンテナンスが必要なクライストロンなどのRF能動素子を設置し、もう一方のトンネルに設置された加速管中を走る電子(陽電子)を加速するためのマイクロ波を供給する。C-band技術はX-bandの開発に時間がかかると予想される場合の現実的なバックアップ技術である。物理研究の要求を満たすには、200 GeVの重心系エネルギーで運転したLEP-IIの輝度の100倍、世界最高の輝度を誇るKEKのB-factory加速器の2~3倍の輝度が必要であり、目標の輝度は重心系エネルギー500 GeVの場合 $2.5 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。主線形加速器は同じユニットの繰返しであり、このユニットはクライストロンと呼ばれる高周波発生装置とその電源(クライストロン・モジュレータ)、パルス圧縮装置、加速管からなる。大きな積分ルミノシティ(衝突頻度)を実験に供するには、このユニットの信頼性が非常に重要である。クライストロン及びその電源の技術はX-band、C-bandともに成熟している。X-bandのパルス圧縮装置と加速管はほぼ完成し、SLACでの高電界試験がこの秋に予定されている。KEKではX-bandの加速テストのためGLCTAを建設し、この秋から試験運転にはいる。C-bandの線形加速器はSPring-8に建設中の自由電子レーザー(XFEL)に採用され、加速ユニットの高電界試験がSPring-8において2003年度中に行なわれる。これらの機器は、KEKとわが国の産業界との強力な連携のもとで設計・製作されている。

3 リニアコライダーを巡る国際的な動き

わが国の研究者はかねてより、次の高エネルギープロジェクトは電子・陽電子リニアコライダーが有望であることを認識しており、世界に先駆けて、1986年に報告された高エネルギー委員会の答申には、電子・陽電子リニアコライダーがわが国の次期基幹計画であることが明記され、その後の開発研究においていくつもの技術的なブレークスルーがあった。アジア諸国もわが国をホストとするリニアコライダーを国際プロジェクトとして推進することを提言し、ACFA(Asian Committee for Future Accelerators)は、1997年と2001年9月にリニアコライダーに関する提言を出した。このアジア諸国の後押しがプロジェクトにとって非常に重要である。2003年2月には、ACFA、KEK、とわが国の高エネルギー委員会が共同主催して、プロジェクト総体のまとめでありRoadmapであるGLC

Project Reportを公開し、シンポジウムを大々的に開催した。このようにわが国の高エネルギー物理学のコミュニティーは、リニアコライダーに関して先駆的な活動を行ってきた。

リニアコライダーがLHCでの陽子・陽子衝突実験と時期的にオーバーラップして走り、陽子・陽子衝突実験と電子・陽電子衝突実験の両方を、互いの長所を生かし短所を補いあって進めていくことを可能にするため、リニアコライダーを早期建設すべきことが、世界の素粒子実験(高エネルギー実験)の研究者の間では現在コンセンサスとなっている。わが国が主導権を握ることを可能にするのは、最終的には大きな予算を獲得することであるが、そのためにはわが国の研究者と産業界が一致して国際的なプロジェクトを鍛えて上げていくことが必須である。

わが国の加速器技術はこれまで産学で支えられてきた。KEKのBファクトリーは、現在 $10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ というとてもない世界最高のルミノシティを恒常的に記録し、実験に供された積算ルミノシティにおいても老舗のSLACのPEP-IIを遥かに凌いでおり、文字通りの世界一のビーム輝度を誇るコライダーとして君臨している。この一例を見てもわかるように、わが国の加速器技術は世界的に見ても進んでいる。

一方、エネルギーフロンティアの加速器はこれまで、米国とヨーロッパにのみ次々と建設されてきた。例外は唯一KEKのTRISTANであり、ドイツのPETRAの後、米国のSLCが稼働するまでエネルギーフロンティアのコライダーであった。次のエネルギーフロンティアの加速器はアジアに建設されるのが自然であり、ホストとなる条件を備えているのはわが国に他ならない。

4 リニアコライダーの社会や産業界などへの波及効果

リニアコライダーのように、学問上確実な結果が期待され、且つ、産業の基盤を高めるプロジェクトには、様々な階層の文化的、経済的、技術的な波及効果が期待される。

国民が科学に関心を持たなければ科学的な知識は増進されない。科学に関心を持つには切っ掛けが必要であり、戦後復興時の湯川秀樹博士のノーベル賞授賞や、構造的ともいえる不況の中での小柴先生のノーベル賞授賞は、科学への関心を増進させ将来への希望をもたらすものであった。リニアコライダーにおける新発見の興奮は社会に対して大きな刺激となり、科学に対する知的好奇心を喚起するとともに、若い世代に夢と希望を与える。技術とそれを支える科学的な知識は産業の基盤であり、若い世代が科学や技術に関心を持つことは社会にとって極めて重要である。

リニアコライダーは、即効的な経済効果をももたらす。リニアコライダーの加速器、測定器、各種施設的设计、建設、運転を担う多くの産業にもたらす直接的な経済効果は大きい。歴史を振り返ると、基礎科学の進展は経済的な発展や人類の福祉を生み出してきた。1980年代にはCE

RNにおいて研究者のコンピュータの間で、学問上の情報の交換が行なわれ始めたが、これを切っ掛けに始まったWorld-Wide-Webは、その後インターネットとその商業利用の爆発的な発展をもたらした。現在GRIDとよばれるIT技術も、CERNのLHCでの実験のグローバル化が大きく関与している。更に、高エネルギー電子加速器の技術は、シンクロトロン光、X線FEL、などへの応用の道を開き、物質科学、ナノテクノロジー、化学、構造生物学などに利用されている。治療用の加速器や、滅菌用の加速器への応用は枚挙に暇がないほどだ。リニアコライダのわが国への誘致は、わが国に多くの派生技術とその基礎技術をもたらすだろう。

リニアコライダの物理的な成果の直接的な応用への道は、長期的に見ていく必要があるだろう。100年ほど前に電子や原子核が発見された時には、これらが今日の産業の基盤を形成することを想像できなかったであろう。人類共通の知的財産を創造することは大きな文化的な貢献である。

素粒子物理や加速器技術においてわが国は今や世界のフロントランナーである。産業界にとって、ナノテク、IT、バイオテクノロジー、環境などは重要であり、国はこれらをその基盤から底上げする必要がある。加速器技術はこれを可能にする重要な手段である。リニアコライダはまさに、これらの重点技術分野の基盤を組織的に底上げするプロジェクトである。

参考文献

GLC Project, ACFA, 高エネルギー委員会、
高エネルギー加速器研究機構、2003年2月
<http://lcdev.kek.jp/ProjReport>