

解説

リニアコライダー

横谷 馨*

Linear Collider

Kaoru YOKOYA*

Abstract

The community of the high energy physics recently adopted the superconducting technology for the ILC (International Linear Collider). This will bring about a new phase of the linear collider development. An international design group will be formed in early 2005, aiming at the machine completion in the mid 2010's.

1. リニアコライダーとは

素粒子物理学の発展は、原子、原子核、核子（陽子・中性子）、クォークと、物質の内部構造を次々と明らかにし、粒子間の相互作用の究明により素粒子の統一的描像を与えてきた。現在ではクォークとレプトンを基本粒子としゲージ粒子（グルーオン、光子、W、Zなど）がそれらの間の力を媒介するという標準模型が得られている。これらは加速器技術の発展を背景として構築されてきたものである。現在、高エネルギー物理学で用いられる加速器は主に陽子陽子（または陽子反陽子）衝突型加速器（ハドロンコライダー）および電子陽電子衝突型加速器（ e^+e^- コライダー）である。前者については、 E_{CM} （重心系エネルギー）2 TeV の Tevatron (FNAL, 米国) がまもなく実験を終了し、14 TeV を目指して建設中の CERN の LHC (Large Hadron Collider) が 2007 年に完成するはずである。後者については、1989 年に完成した LEP (Large Electron Positron Collider, CERN 研究所, ジュネーブ) が E_{CM} 210 GeV に達し 2000 年に実験を終了して以来、新しい加速器は建設されていない¹⁾。

衝突エネルギーは上記のように e^+e^- コライダーの方がはるかに低い。しかし、陽子は 3 つのクォークからなるので、陽子陽子衝突ではクォーク同志の重心系エネルギーは低くなる。さらに、ハドロンコライダーの場合強い相互作用により多くの不要な事象が発生するが、これに比べて e^+e^- コライダーでは衝突が

クリーンである。したがって、全重心系エネルギーは低くとも e^+e^- コライダーにはハドロンコライダーとは異なるメリットがある。概して言えば、ハドロンコライダーは発見的探索、 e^+e^- コライダーは精密実験に適している。

e^+e^- コライダーの次の目標はエネルギー 500 GeV ないし 1 TeV である。このエネルギー領域に到達すれば、まず第一に標準模型中の残された重要問題であるヒッグス粒子の物理を解明できる。これはすべての粒子の質量の起源を説明する。さらに、標準模型を超える超対称性理論の検証、3 つのゲージ相互作用を含むすべての力の統一理論への足がかりなどが得られると期待される。

図 1 は e^+e^- コライダーのエネルギーを加速器建設

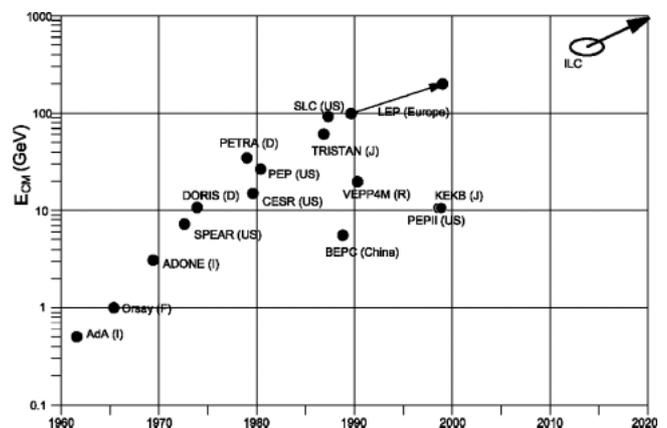


図 1 世界の e^+e^- コライダーの歴史

* 高エネルギー加速器研究機構 KEK
(E-mail: kaoru.yokoya@kek.jp)

年次に対してプロットしたものである。これからわかるように年々 E_{CM} は上昇しているが、1980 年ごろを境にして勾配が緩くなっている。これは円型加速器に電子（陽電子）をまわすとシンクロトロン輻射でエネルギー損失がおこり、高いエネルギーに到達するために極端に半径を大きくしなければならないからである（半径はおよそエネルギーの 2 乗に比例する）。この問題は LEP 建設よりはるか以前から予期されており、解決にはリニアコライダー（以下、LC と書く）しかないと考えられてきた。これは線形加速器 2 台を鼻を付き合わせるように配置して電子陽電子を衝突させるものである。この場合直線軌道でありシンクロトロン輻射の影響がないので長さはエネルギーの 1 乗でよい。一方、LC では各電子が加速器を 1 回しか通過しないので、高い加速勾配が要求される。1970 年代から各種の新しい加速方式が検討されてきたが、結局、エネルギー 500 GeV ないし 1 TeV の次世代 LC には従来からあるマイクロ波による加速以外に現実的なものはない、という結論になった。

リニアコライダーの第 1 世代は 1988 年に米国スタンフォード研究所で完成した SLC である。これは $E_{CM}=92$ GeV で Z^0 粒子の研究に活躍した。ただし、これは 1 台の線形加速器で電子陽電子を加速し、曲線軌道を通して衝突させる過渡的な形式である。曲線部はあるが 1 回しか通過しないので、シンクロトロン輻射の影響はこのエネルギー領域までなら許容できる。しかし、より高いエネルギーの第 2 世代では 2 台の線形加速器が必須である。

2. これまでの経緯

LC の開発研究は 1980 年代半ばごろに本格化した。1986 年には X-band (11 GHz のマイクロ波) による常伝導 LC 開発が日米協力で始まった。日本では加速機構のみならず、高度な技術が要求される減衰リング（後述）についても実機に近い規模のものを建設し、性能を実証した（ATF：高エネルギー加速器研究機構 Accelerator Test Facility）。やや遅れてドイツでは 1990 年ごろに超伝導技術によるリニアコライダー TESLA の開発が始まった。当初、超伝導では加速勾配が低い、建設費が膨大であるなどの問題があったが、技術の急速な進歩により、2000 年ごろには常伝導と肩を並べるようになった。

どちらの技術にしても建設費は数千億円が必要とみられ、これまでの多くの加速器のように世界に何台か作って結果を競うというわけには行かなくなった。2001 年夏に TRC (Technical Review Committee) と

いうものが組織され、約 30 名の加速器研究者が集まって、4 つの LC 計画の技術的評価を行った。一年あまりの検討の後、500 ページに及ぶ報告書²⁾を ICFA (International Committee for Future Accelerators) に提出した。これは各計画について問題点・今後の開発研究を列挙・比較したものである。予算・敷地については全く触れられていない。

「4 つの LC 計画」とは、超伝導の TESLA, C-Band 常伝導コライダー, X-band 常伝導コライダー, CLIC (CERN で研究中) であるが、このうち C-Band は X-band のバックアップとして位置づけられており、CLIC は遠い将来のより高エネルギーのコライダーのための技術と考えられた。したがって、次期コライダーとしての選択肢は超伝導あるいは常伝導（主に X-band）ということになる。

TRC は開発当事者（加速器研究者）による調査であり、選択作業にはバイアスがかかる。そこで、2003 年暮に第三者（物理理論・実験研究者・LC にかかわっていない加速器研究者）による ITRP (International Technology Recommendation Panel) が結成され、TRC 報告書を出発点として技術選択（つまり常伝導か超伝導か）が議論された。半年あまりの後、今年 8 月に超伝導技術を推奨する旨の答申を出した³⁾。ICFA は北京での国際会議 (32nd International Conference on High Energy Physics) 中にこれを正式に採択し、この LC を ILC (International Linear Collider) と命名した。

ITRP が超伝導技術を選択した主な理由は

- 超伝導による試験機 TTF (TESLA Test Facility) がすでに数年にわたって安定に運転されている、(加速勾配は最終目標 35 MV/m の 1/2 ないし 2/3 である。この試験機は自由電子レーザー FEL に使われている。)
- 設置位置の許容誤差が大きい、(常伝導では 5 μm , 超伝導では 200 μm 程度)
- バンチ間隔が大きいので、軌道フィードバック・粒子検出がより容易である、(常伝導では 1.4 ns, 超伝導では 300 ns 程度)
- 電力効率がよい。

などである。第 2 第 3 の点は原理的問題であり常伝導側でも条件はより厳しいが十分に実現可能と判断していた。第 1 の点が最も重要と思われる。常伝導で目標 (65 MV/m) の 2/3 の勾配で運転するのは容易と思われるが、FEL のような応用領域がなかったのが試験機を作らなかった理由である。

日米の主張していた常伝導技術は採用されなかった

が、これでLC研究を終えるわけではない。そもそも、技術選択をした理由は一国一領域では人的にも経済的にも賄えないからであり、国際協力がなくなればLCは建設できない。日本では常伝導加速と同時にATFによる減衰リングの研究を行ってきた。これは依然として、LCで要求される高品質のビームをつくれる世界唯一の加速器である。減衰リングは超伝導LCの弱点でもあり、未だに開発項目が多く、今後ともATFはLC開発には欠くことができない。また、これまで日本でのLC研究に採用していなかったが、超伝導加速器技術についても日本は世界のトップレベルにある。実際、TESLAの加速勾配目標値35 MV/mは日本の技術によって可能となった数字であり、従来の技術による上記のTTFでは24 MV/mまでしか運転に使われていない。

3. ILC 加速器

3.1 全体像

LCでは、各電子が加速器を1回しか通過しないため高い加速勾配が要求されるだけでなく、衝突点も1回しか通過しないので、高い反応確率を得るために衝突点でのビームサイズは極めて微細でなければならない。(ビームは扁平にするが、その高さは標準偏差で約3 nmである。)このため、LCはつぎのような複雑な構成要素からなる。

- (1) 粒子源 (電子源・陽電子源)
 - (2) 減衰リング
 - (3) バンチ長圧縮器
 - (4) 主線形加速器
 - (5) 最終収束系
- (2)(3)は高品質 (低エミッタンス) のビームをつくるもの、(5)は衝突点でビームを小さく絞る装置である。大きさの点でも費用の点でも最も目立つのは主線形加速器であるが、その他の部分についても従来の性能を大

きく上回る技術が要求される。

ILCの最終案はまだ存在しないが、出発点はTESLAである。ここでは主にTESLAの設計について説明しよう。詳細な設計レポートはTESLA TDR⁴⁾であり、その後の進展は報告書²⁾にいくらか記述されている。図2は現在のTESLAの概念図である。運転の形態を簡単に説明する。数値は $E_{CM}=500$ GeVの場合であり、800 GeVの場合の設計値を[]内に示す。1 TeVはTESLA計画としては考慮されていない。

まず、電子は図左端の電子源から5 GeVまで加速されて減衰リングに入る。これは一周17 kmの犬の骨 (dogbone) 型で、図には表現されていないが、建設費節約のため、長い直線部は往復とも主線形加速器とトンネルを共有する。電子はここに200[250] ms滞在して低エミッタンスになったのち、主線形加速器で加速され、収束系を通過して衝突点に向う。

電子は途中でアンジュレータを通過するが、この際に数10 MeVの光子を輻射する。この光子は標的に当たって陽電子を生成する。この陽電子は陽電子前段加速器 (図では陽電子側の主線形加速器の一部のようにになっているが、実際は別にするであろう) で5 GeVまで加速されて陽電子側の減衰リングに入る。以下はアンジュレータがないこと以外、電子と同じである。衝突点は2つ用意され、同種あるいは異種の実験を行う。

主線形加速器でのビームは、各バンチ $2[1.4] \times 10^{10}$ の電子 (陽電子) を含み、337[176] nsの間隔で2820[4886]個バンチが連なって1つのトレインをなす。これが5[4] Hzで繰返される。これをそのまま減衰リングに収めると周長300 kmにもなるので、減衰リング内では20[11.5] ns間隔に圧縮して貯蔵し、1バンチずつ337[176] nsの間隔で取出す。

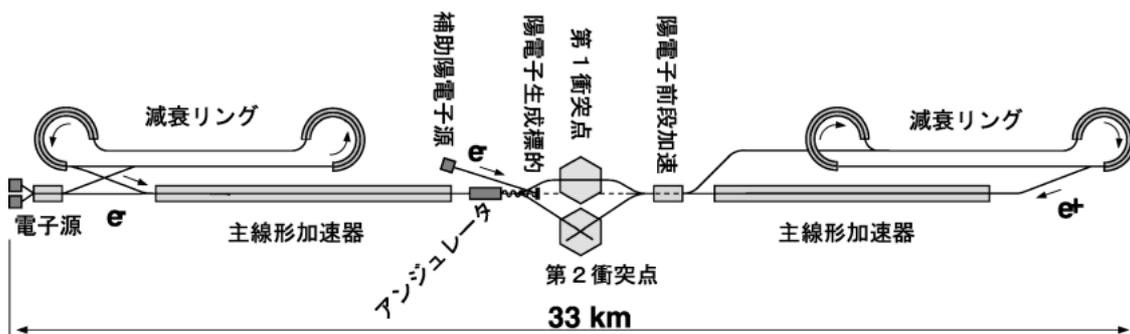


図2 TESLAの現行案の概念図

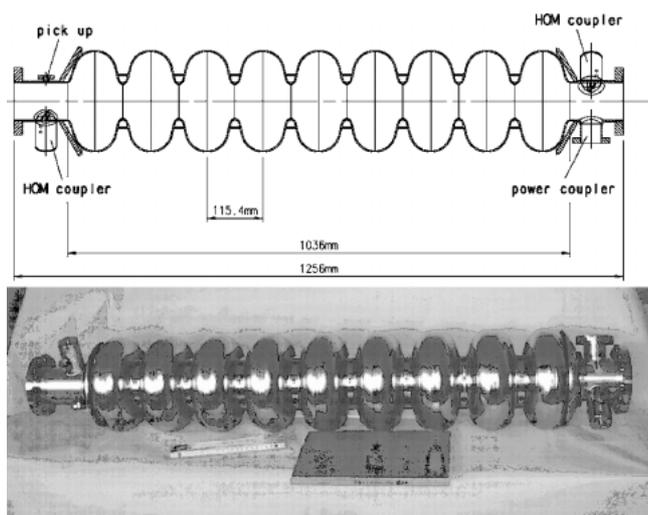


図3 加速空洞

3.2 主線形加速器

次に、最も大きな部分を占める主線形加速器について説明する。

図3は加速空洞の断面図および外観である。1空洞は9セルからなり、空洞部分の全長は約1mである。周波数は1.3 GHz、ニオブで作られる。

このような空洞12台をひとつのクライオスタットに格納し、3台のクライオスタット中の36台の空洞を1台のクライストロンおよびモジュレータで駆動する。これが1単位であり、コライダー全体は約580単位からなる。したがって加速空洞総数は約20000である。クライストロンは空洞と同じトンネルの中に置かれるが、モジュレータは地上5kmごと7箇所に配置されるホールに置かれ、モジュレータの出力パルスは最長2.8kmの高圧ケーブルでクライストロンに配られる。冷凍機システムもこの地上のホールに置く。

図4は主線形加速器を収めるトンネルの断面図である。TESLAの設計ではクライストロン(図の左部分)、主線形加速器(中央上の大きな円形)、往復の減衰リング(中央上の2つの小さな円形)がすべて1つのトンネルに格納されている。(常伝導設計では、クライストロンは並行する別のトンネルにあり、減衰リングはここにはない。)これは建設費を節約するのが主な目的であるが、運転上の種々の問題があり、ILCでは2トンネル案も検討されるであろう。

TESLAの試験施設TTFで用いられている加速空洞(図3)は内部を化学研磨したもので、主に加速勾配17 MV/m、最高24 MV/mで、すでに長期間にわたって運転されている。暗電流は十分に小さい。

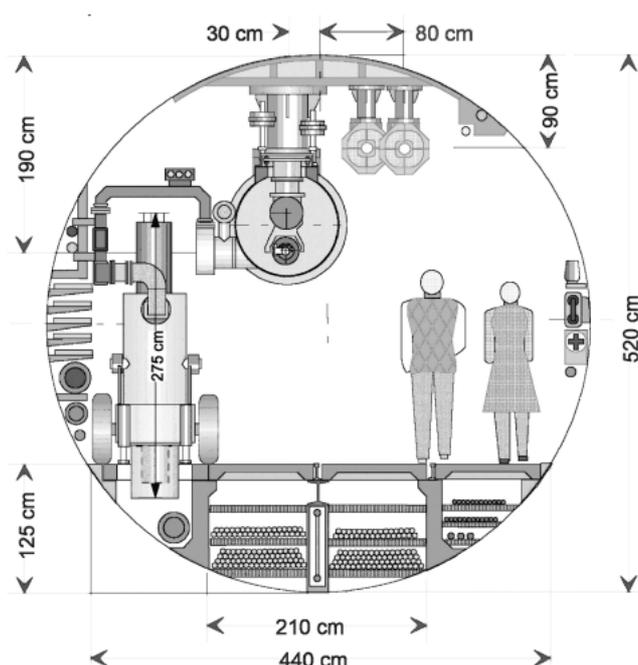


図4 トンネル断面図

FEL用にはこの勾配で十分であるが、LC用にはさらに高い加速勾配が要求される。TESLA設計では33kmの敷地で35 MV/mの勾配なら800 GeVまで可能としている。この勾配を実現するには、高エネルギー加速器研究機構(KEK)で開発された電解研磨法が必須である。TESLAでは現在までに約4台の電解研磨空洞が試験され35 MV/mを確認している。ただし、TTF用のクライオスタットで試験されたものは1台のみで、他は単体の試験であり、35 MV/mの定常運転はまだ行われていない。

加速勾配35 MV/mの場合、1 TeVに到達するには、約41kmの敷地全長が必要である。米国の場合敷地の長さには問題はない。TESLA計画はハンブルクから北西方向に33kmの敷地を用意していたが、同じ敷地で1 TeVを実現するには約45 MV/mの勾配が必要になる。より長い敷地を考えている様子はみられない。日本の場合、41kmを超える敷地候補はあるが、アクセスなどの他の要素も考慮する必要があるので、候補地の選択肢を広げる意味で35 MV/mより高い加速勾配が望ましい。

超伝導空洞の場合、ある限度以上の表面磁場では超伝導が破れるので理論的限界がある。空洞表面最大磁場と加速電場の比はTESLA空洞では45.6 Oe/(MV/m)である。加速電場35 MV/mの場合、表面最大磁場は1600 Oeに達する。現在の実験データからみて、表面限界磁場はニオブの場合1750 Oe前後と推

定される。したがって、運転の余裕も考慮すると、電解研磨法によって得られた 35 MV/m は、TESLA 型空洞では既に理論的限界に達していると思われる。これより高い加速勾配を得るには空洞表面最大磁場と加速電場の比を下げるしかない。新しい空洞の形状として、Jefferson Lab で LL 空洞と呼ばれる形状が設計されている。これは低損失 (Low Loss) を目的としたものであるが、磁場電場比は 37.4 Oe/(MV/m) とかなり低いので、これを用いれば、加速勾配 45 MV/m あたりまで可能性がある。現在、KEK においてこの空洞の単セル試験を本年 (2004 年) 12 月、8 セル試験を来年 9 月ごろに行う予定である。

3.3 減衰リング

主線形加速器以外の点での問題点を列挙しよう。

減衰リングは巨大である。常伝導の場合周長数 100 m でよいが、超伝導では前述のようなビーム構造が要求されるため大きくなる。この大きさのために以下のような問題が生ずる。

- (1) 1 バンチずつ取出すため、取出しキッカーとして、立上がり下がり 20 ns 以下、繰返し 3 MHz が要求される。(しかも、高い安定性 0.05% が必要である。) この立上がり下がり時間で周長が決まっている。
- (2) バンチ自身のつくるクーロン場 (空間電荷力) が横振動周期に拡がりをつくるが、周が長いためこの積分値が大きい。現在の TESLA 設計では、歪 4 極磁石により直線部での見かけのビームサイズを小さくすることによって空間電荷力を緩和している。
- (3) 振動減衰に寄与しない直線部が長いので、長いウィグラー磁石で減衰時間を稼いでいるが、これは軌道の安定領域を狭める。
- (4) 長い区間にわたって主線形加速器とトンネルを共有するため、主線形加速器の電磁ノイズ (特にクライストロンが源になる) によって取り出し時に軌道が乱される。
- (5) 主線形加速器の建設完了前、および主線形加速器の修理中は、減衰リングの試験が行えない。

このうち、(4)(5)は建設第 1 期 (500 GeV) にトンネル上流部に減衰リング、下流部に主線形加速器を配置することで回避できる。しかし、第 1 期の必要電力が上がることで、主線形加速器が長くなる第 2 期 (1 TeV) には検討を要する、という問題が残る。

(2)以降の問題を回避するため、バンチ間隔をつめた一周 3 km あるいは 6 km 程度のリングが現在精力的に検討されている。この場合トンネルは共有しない。

しかし、(1)がさらに厳しくなること、バンチ間の相互作用でビームが不安定になりやすいこと、などの欠点があるため、容易ではない。

3.4 陽電子源

つぎに、陽電子は、前述のように電子をアンジュレータに通すことで発生させる。この方式は 20 年前にソヴィエトで提案され TESLA 設計に採用されたものであるが、次のような欠点を持つ。

- (1) 陽電子減衰リングの試験は少なくとも、電子側の主線形加速器、衝突領域のトンネルが完成しないとできない。運転時でも、電子側故障の場合にはできない。
- (2) 陽電子生成のため電子エネルギーが少なくとも 150 GeV 必要である。したがって、 $E_{CM} < 300$ GeV では、陽電子生成用と衝突用に分ける必要があり、ルミノシティが半分になる。
- (3) アンジュレータ輻射後の電子を衝突に使うので衝突エネルギー幅の増加がある。(TESLA の初期の設計では衝突後のビームを陽電子生成に使っていたが、衝突後の電子はエミッタンスが大きくなっているためアンジュレータ輻射に向かないことが明らかになった。)

このうち、(1)は特に深刻である。これを回避するために、TESLA 設計では陽電子側調整用の補助陽電子源 (図 2 参照) を用意しているが、ビーム強度ははるかに低い。

常伝導の設計では、陽電子は従来の方式、すなわち、電子ビームを直接に標的に当てることで生成される。この方式では電子エネルギーは数 GeV でよいので、衝突ビームとは別の加速器をつくればよい。したがって上記の 3 つの問題はまったく起こらない。TESLA にこの方式が採用されなかったのは、1 トレインの電荷が非常に大きく (常伝導の場合の 40 倍) 電子による標的破壊が予想されたからである。しかし、最近の研究では標的破壊の問題は常伝導の場合と大差ないようである。破壊は長時間の発熱によるものでなく、短時間の応力で起こる。超伝導の場合、ビーム全長が 1 ms 程度あるため、応力の伝播に十分な時間があり、トレインの全電荷の効果は集積しないとみられる。これが実験的に確かめられれば、従来の方式が浮上する。欠点は、この方式では偏極陽電子が得られないことである。アンジュレータ方式ではヘリカルアンジュレータを使うことで得られる。ただし、アンジュレータへの要求が厳しいので TESLA では第 1 期には含めていない。

なお、減衰リングでは電子は長さ約 6 mm にバンチ

しているが、衝突点では $300\ \mu\text{m}$ の短いバンチが要求される。そのため減衰リングの後にバンチ長圧縮器が設置されるが説明は省略する。

3.5 Beam Delivery System

加速終了後のビームを衝突点まで運ぶビームラインを「Beam Delivery System (BDS)」と呼んでいる。

この部分は

- コリメータ (中心から大きくはずれた粒子を除去する)
- 最終収束系 (衝突点でビームを絞る)
- 実験装置 (粒子検出器)

からなる。電子・陽電子の両側あわせて全長約 4 km になる。このほかに使用後ビームを処理するビームダンプがある。BDS は常伝導の設計と大きな違いはないが、重要な問題として衝突点での両ビームの交差角がある。TESLA 設計では正面衝突になっている。常伝導では、バンチ間距離 (約 40 cm) が小さいので、本来の衝突点以外でのニアミスがあり、これを避けるために数 mrad から最大 20 mrad の角度を考えていたが、超伝導では距離 (337 ns すなわち約 100 m) が長いのでこの問題がない。しかし、近年の研究では、バックグラウンド事象が避けにくい、衝突後のビームの診断がむずかしい、などの理由で正面衝突は好ましくないとみられている。なお、第 2 衝突点では図 2 に表現されているように、光子・光子衝突を実現するために大きな (約 30 mrad) 交差角をとる。

4. 今後の動き

ITRP の答申は超伝導技術の選択であり、TESLA をそのまま用いるというわけではない。TESLA の設計には上記のようにまだ幾多の問題があり、今後国際協力で設計を煮詰める。来年早々に GDI (Global Design Initiative, 中央 GDI およびアジア・北米・欧州の各地域 GDI) が組織され、2009 年に想定されている建設開始まで ILC の開発設計作業が続けられる。もちろん、これ以前に敷地選定の問題が横たわっている。すべて順調であれば衝突実験開始は 2010 年代半ばである。

GDI の発足を前にして今年 (2004 年) 11 月に KEK において、ILC の第 1 回ワークショップを開催する。ここで国際協力による設計の第一歩が踏み出される。

参考文献および注

- 1) ここではエネルギー最前線の加速器のみ考えている。したがって B-Factory (KEKB, PEP-II) は別である。
- 2) *International Linear Collider Technical Review Committee Second Report*, SLAC-R-606, 2003.
<http://www.slac.stanford.edu/xorg/ilc-trc/2002/2002/erc.htm>
- 3) Final International Technology Recommendation Report, Sept. 2004.
http://www.ligo.caltech.edu/~skammer/ITRP/ITRP_Report_Final2.pdf
- 4) TESLA Technical Design Report (TDR), March 2001.
http://tesla.desy.de/new_pages/TDR_CD/start.html
- 5) 1st ILC Workshop, Nov. 13-15, 2004, KEK.
<http://lcdev.kek.jp/ILCWS/>