ILC (International Linear Collider) 計画

横谷 馨[†]

ILC (International Linear Collider) Project

Kaoru YOKOYA[†]

Synopsis: Electron-positron linear colliders have been under development since about 20 years ago and are the strongest candidates as future accelerators for high-energy physics. Two different technologies, normal and superconducting, have been competing. Regardless of the technology used, it was anticipated that the colliders would be too expensive to be afforded by one country or one region, and the decision was made to construct a single collider under international collaboration. The world high-energy physics community decided last summer that the next linear collider should be built utilizing the superconducting technology. Since then an international team has worked intensely studying the design of the collider. This article briefly describes the machine and summarizes the current status of the design.

Keywords: Linear collider, high-energy physics, superconducting linac

1. はじめに

次世代の高エネルギー加速器として関心を集めている「リニアコライダー」は、20 年来の開発研究に基づいて、広範囲の国際協力による設計の最後の詰めに入ろうとしている。昨年末に日本加速器学会誌に解説記事を掲載したが¹⁾、本稿はこれに基づいて、その後 1 年近くのめざましい進展を書き加えたものである。

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。

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ても 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。

2. リニアコライダーとは

Fig.1 は e^+e^- コライダーのエネルギーを加速器建設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ぬからである（半径はおおよそエネルギーの 2 乗

Received August 31, 2005

高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

High Energy Accelerator Research Organization (KEK),
Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

[†] E-mail: kaoru.yokoya@kek.jp

Fig. 1 History of e^+e^- colliders in the world.

に比例する)。1989年に完成したLEPが E_{CM} 209 GeVに達し2000年に実験を終了して以来、新しい加速器が建設されていないのはこのためである。^{*1}

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500GeVないし1TeV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。

LC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（Fig.2）。これは $E_{CM}=92\text{GeV}$ 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。

Fig. 2 Schematic layout of the SLC

^{*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-Factor (KEKB、PEP-II) は別である。

3. ここ数年の国際的な動き

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 (11GHz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 DESY（ドイツ電子シンクロトロン研究所、ハンブルク）では1990年ごろに超伝導技術（周波数1.3GHz）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 (5.7 GHz, X-bandの半分の周波数) 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、2004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

- A 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。）

- B 設置位置の許容誤差が大きい、(常伝導では $5\mu\text{m}$ 、超伝導では $200\mu\text{m}$ 程度)
- C パ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 1.4ns 、超伝導では 300ns 程度)
- D 電力効率(商用電力からビームエネルギーへの変換効率)がよい。

などである。[B] は超伝導というより低周波の利点である。ビームが加速空洞の中心をずれて通過した場合、後続ビームを横に蹴るようなモードが発生してビーム劣化をもたらす。この効果は空洞のビーム孔半径に敏感(4乗に反比例)なので、低周波のほうが設置許容誤差が大きい。[C] は、超伝導空洞では filling time (マイクロ波を満たすに要する時間)が長いので必然的にビームパルス全長が長くなり、軌道フィードバックが楽になる。粒子検出の点でもパンチの同定が容易になる利点がある。さらに、非常時にパルスの途中でビームを止めることも可能になる。[D] は、常伝導では1割程度、超伝導ではその約2倍である。これらに関しては常伝導側でも条件はより厳しいが十分に克服可能と判断していた。ITRPの判断に最も大きな影響を与えたのは[A]であろう。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。

4. ILC 加速器

4.1 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 5 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. パンチ長圧縮器
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、TESLAの設計⁴⁾をもとにした、現在考えられているひとつの案を概念的にFig.3に示した。当面の間用いる暫定的パラメータ(表1)が2005年2月に提示されたが、以下の数値はそれから採ったものである。

運転の形態を簡単に説明する。

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(damping ring)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 200ms 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(undulator、蛇行軌道をとらせる磁石)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(positron pre-linac、図では陽電子減衰リング直前に描いてあるが、実際は生成直後にある程度加速するであろう)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、各パンチ 2×10^{10} の電子(陽電子)を含み、 308 ns の間隔で 2820 個パンチが連なって1つのトレインをなす。これが 5 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 にもなってしまうので、減衰リング内では 20 ns 間隔に圧縮して貯蔵し、1パンチずつ 308 ns の間隔で取出す。

4.2 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。

加速空洞

Fig.4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 1 m である。周波数は 1.3 GHz 、ニオブで作られる。

このような空洞10台をひとつのクライオスタットに格納し、2台のクライオスタット中の20台の空洞を1台のモジュレータ(交流商用電力から直流パルスへの変換)およびクラ

Fig. 3 A conceptual example of the ILC complex.

Table 1 Main parameters of the ILC

Center-of-mass energy	0.5	1.0	TeV
Number of particles per bunch	2.0		$\times 10^{10}$
Number of bunches per pulse	2820		
Bunch interval	307.7		ns
Average current	10.4		mA
Accelerating gradient	35.0		MV/m
2 linac wall-plug power	121	242	MW
2 linac length	20.1	40.2	km
Number of cavities in 2 linacs	14240	28480	
Horizontal emittance	10		mm-rad
Vertical emittance	0.04		mm-rad
Horizontal beta function at IP	21	30	mm
Vertical beta function at IP	0.4	0.3	mm
Horizontal beam size at IP	655	554	nm
Vertical beam size at IP	5.7	3.5	nm
Bunch length	300		μm
Beamstrahlung energy loss	2.2	5.0	%
Beamstrahlung photons	1.257	1.429	
Luminosity	2.03	2.82	10^{34}

Fig. 4 Nine-cell accelerating cavity. The total length of the nine cells is about 1.0 m. (Courtesy of Kenji Saito, KEK)

イストロン（直流パルスから 1.3GHz 高周波への変換）で駆動する。これが 1 単位であり、重心系エネルギー 500 GeV の場合、コライダー全体は 712 単位からなる。したがって加速空洞総数は約 14000 である。

TESLA の試験施設 TTF で用いられている加速空洞は内

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（高電圧がかけられているとき、表面から電子が放出されて加速されてしまう現象）は十分に小さい。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、ILC では少なくとも当初案としては 35 MV/m の勾配が採用されるとみられる。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 では電解研磨空洞が試験され現在までに約 4 台の空洞で 35 MV/m を確認している。

加速勾配 35 MV/m の場合、1 TeV に到達するには、約 45 km の敷地全長が必要である。より高い勾配に達する空洞が実現できれば、全長を短くできる、あるいは、35MV/m で運転する場合にも余裕ができる。加速勾配を上げるとトンネル全長・加速管数は勾配に反比例して減るが、一方、所要電力は勾配に比例して上がるので高周波装置の増強が必要になり使用電力も上昇する。したがって、プロジェクトコスト（建設費・運転経費の和）はある勾配で最小になる。現在の評価では最適値は 35 MV/m と 45 MV/m の間であり、この範囲ではコストは数パーセントの違いしかない。

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加速勾配には理論的限界がある。電解研磨法によって処理された最良の空洞のデータをみると、すでにこの限界に達しているようである。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 1600Oe に達する。TESLA 空洞で得られた最高勾配は 40MV/m 前後であり、したがって、表面限界磁場はニオブの場合 1750 Oe 前後と推定される。運転の余裕も考慮すると、TESLA 型空洞では 35 MV/m が限界であろう。

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 (Fig.5)。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 45MV/m あたりまで可能性がある。前に示した Fig.4 は、KEK において開発中の LL 型空洞である。コーネル大学では Re-entrant 型と呼ばれる似た

Fig. 5 Cross-sections of the three types of cavities. In the reentrant and LL type the shoulder part is expanded in order to lower the maximum surface magnetic field.

ような形状の空洞で 2005 年 11 月に 47MV/m を達成している（ただし単セル空洞）。これは KEK での測定で追証された（Fig.6）。これらのデータから考えて、限界磁場に関する

Fig. 6 Measurement results of single-cell cavities. The upper plot are the results from a 2.2 GHz cavity made of single-crystal Niobium developed at Jefferson Lab (US). The gradient reached 44 MV/m. The lower plot shows the results of a 1.3 GHz reentrant cavity fabricated at Cornell University (US) and surface-treated at KEK. The gradient reached 47 MV/m. (Courtesy of Kenji Saito, KEK).

上記の推測は実証されたと見られる。^{*2}しかし、本稿の時点

^{*2} 本稿の成稿後、KEK において、LL 型単セル空洞で 47MV/m、

では新形状による多セル空洞の実証にはまだ至っていない。

RF システム

RF システム（マイクロ波発生システム）としては、TESLA-TTF で用いられているものがほぼ要求を満たしているので設計上の異論がすくない。モジュレータは pulse transformer 型、クライストロンは 10MW のマルチビーム型である。もちろん、コスト低減を目指した新しいタイプも検討されている。

冷凍システム

超伝導空洞は残留抵抗損失と冷却の効率を考慮して温度 2K に保つ。2K 部分への熱侵入を減らし冷凍機負荷を軽くするために、現在の設計では 40-80 K および 5-8 K の 2 重の熱シールドを採用する。Fig.7 はクライオスタットの断面図である。現在日本で考えている設計では、加速器全長を

Fig. 7 The cross-sectional view of a cryostat being developed at KEK. The diameter of the cryostat (large circle) is 965 mm. (Courtesy of Kiyosumi Tsuchiya, KEK.)

5km ごとに区分し、各区分の中央に大型ヘリウム冷凍装置からなるステーションを設置して、それぞれが前後各 2.5 km の区間を担当する。各部での外部からの熱侵入および空洞内高周波損失を補償して温度 2K を維持するに必要な冷凍機への電力は、1 ステーションあたり 5 MW あり、全 7 ステーション合計で約 36MW におよぶ。1TeV では加速勾配が同じならこの 2 倍になるであろう。現在 CERN において建設中の LHC（Large Hadron Collider、1 周 27 km にわたって超伝導磁石が配置される）の冷凍装置の場合、各ステーションあたり約 4 MW、8 ステーションの合計は ILC 500 GeV の値に近い。したがって ILC 冷凍装置は、ステー

Re-entrant 型単セル空洞で 52MV/m が達成された。前者は KEK、後者はコーネル大学で製作されたもので、表面処理はいずれも KEK において行なわれた。これらは現在のところ世界最高記録である。

ションの配置、全体の規模とも、LHC と同程度のものになる。ヘリウム圧縮機の大きさ、液体ヘリウム・低温ヘリウムガスの輸送配管の長さを考慮すると、山岳地帯に建設する場合は、コールドボックスを地下に、ヘリウム圧縮機を地上に設置する案が有力である。

トンネル

リナックは全長 40 km におよび地下のトンネルに置かれる。この長いトンネルは多数の部品を格納する。

1. 高周波源（クライストロン、場合によってはモジュレータ・冷凍機システムも）
2. 主線形加速器（加速空洞とその周辺）
3. 減衰リングのビームライン
4. 電子・陽電子の転送ライン

などである。TESLA 設計では、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 2.8 km の高圧ケーブルで地下の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。クライストロンおよび上記の [2] 以降はすべて 1 つのトンネルに格納される。これは建設費を節約するのが主な目的であるが、クライストロン修理中は加速器を止めるなどの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ている。

4.3 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 であるが、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。Fig.3 の減衰リングの周長は約 17 km もある。その大部分は主リナックとトンネルを共有し、かつ長い直線部の磁石配置はまばらなので建設費の問題は重要ではないが、周長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、立上がり下がり各 20ns 以下、繰返し 3 MHz が要求される。（しかも、高い安定性 0.07% が必要である。）この立上がり下がり時間で周長が決っている。
2. バンチ自身のつくるクーロン反撥場（空間電荷力）が横振動周期に拮抗りをつくるが、周が長いのでこの積分値が大きい。現在の TESLA 設計では、ねじれ 4 極磁石（通常の 4 極磁石をビーム軸のまわりに 45 度回転したもの）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）によって減衰リングからの取り出

Fig. 8 Measured beam-kick angle by a kicker developed at KEK. The horizontal axis is the timing. (Courtesy of Takashi Naito, KEK.)

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）にトンネル上流部あるいは下流部に減衰リング、残りの部分に主線形加速器を配置することで回避できる。しかし、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。

KEK では非常に速い立上り下がりのキッカーを開発中である。Fig.9 は最初のモデルのキッカー 1 台によるビームキック角をビームとのタイミングの関数としてプロットしたものである。立上り下がりとも 3.6 ns 以内であることがわかり、小さなリングに対しても有望である。

4.4 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。(あるいは、一度 150 GeV まで加速して光子を発生させた後、衝突用エネルギーまで減速する必要がある。)

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ので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 (Fig.3 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1ms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。KEK ではKEKBの電子リングに蓄積された電子を標的に当てて破壊状況を調べる実験を行った。現在、詳細結果は解析中であるが、(瞬時の標的破壊の問題に関する限り)ILCで従来の方法が可能であるという方向の結果が得られている。従来の方式の欠点は、偏極陽電子が得られないことである。このため当初は無偏極陽電子でスタートし、円偏光レーザーと電子のコンプトン散乱によって偏極陽電子を後で追加するという案も検討されている。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偏極陽電子が得られる。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6mmにパンチしているが、衝突点では300 μ mの短いパンチが要求される。そのため減衰リングの後にパンチ長圧縮器が設置される。TESLA案のような1段でよいか、2段圧縮が必要であるか、検討中であるが、詳細な説明は省略する。

4.5 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4km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40cm)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20mradの角度を考えていたが、超伝導では距離(308nsすなわち約100m)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。現在、0mrad(あるいは2mrad)の微小角と20mradの大角の2案があり、Fig.3に表現されているように、2つの衝突点を別の角度にする案もある(検出器も2台になるので当然予算の問題がある)。なお、光子・光子衝突を実現するためには大きな交差角が必要である。

5. 日本の取組み

LC技術の焦点は高勾配加速と高品質ビームの衝突である。日本ではこれに対応して2つの施設の建設を開始しようとしている。

ひとつは、超伝導加速の試験施設(STF)である。これはKEKの既存の建物内にリナック一式および電解研磨施設を設置する計画である。第1期(2005-2006年度)は、基本勾配および高勾配の空洞各4台の収納するクライオスタット、それに伴う高周波源・電子源を建設するものである。第2期(2007-2009年度)はまだ明確になっていないが、基本的には前述のILCリナック1単位建設を目標とする。これらにより、大量生産・コスト低減を考慮したILCのための工学設計を確立することが主な目的である。空洞製作技術においては日本は世界の最先端にあるが、その他のリナック技術に関してはかならずしもそうではない。近い将来の実機製作のための日本企業の技術養成も STF の重要な目的のひとつである。ドイツ(DESY)では前述のようにTTFがあってこれを延長しようとしている。米国ではFNAL(フェルミ国立研究所、シカゴ)にSMTFとよばれる施設を建設しようとしている。これらはいずれもSTFと同じような規模であり、ILCの工学設計確立と地域の技術育成の2つの面を持っている。

いまひとつは、ビーム収束技術完成のためのATF拡張計画である。ATFの取り出しライン延長上に収束系(ATF2と呼んでいる)を建設し、ナノメータ技術を確立することを目的としている。これに関してはATFに肩を並べる加速器が世界に存在しないので日本の独壇場である。ビームエネルギーが実機の1/200しかないため5nmのビームサイズは実現できない(35nm程度まで可能)が、ビーム中心位置をナ

Plan of Superconducting RF Test Facility (STF)

Fig. 9 Configuration of the STF being planned at KEK.

ノメータで制御する試験は可能である。これを実現するための各種の許容誤差は ILC の実機と大差ないので、ILC の設計および運転経験という意味で貴重である。また、ATF が人材養成の面でこれまで果たしてきた役割は計り知れない。ATF2 はこの面でも重要である。この施設は当初から、人的にも予算的にも国際協力で行われ、2008 年始めに運転開始を予定している。

6. 今後の国際的な動き

2004 年 11 月に KEK において、超伝導技術選択後の ILC の第 1 回ワークショップ⁵⁾が開催され、内外から 200 名を超える参加者が集まった。常伝導陣営でも技術選択を積極的に受入れて新しい体制がつくられ、これによって真の国際協力による設計の第一歩が踏み出された。このワークショップは好評を博し、第 2 回ワークショップも同じ体制で取り組むことが ILCSC で決定された。なお、次期 ILCSC 議長に高エネルギー加速器研究機構の黒川真一氏が選任された。

LC の設計チームとして GDE(Global Design Effort) とよぶ組織が 2005 年 3 月から徐々に形成されつつある。GDE は中央 GDE およびアジア・北米・欧州の各地域 GDE からなり、中央チームの長にはカリフォルニア工科大学のバリッシュ (Barry Barish) 教授が指名された。彼は前記の ITRP の議長をつとめた人物である。中央チームは、今後少なくとも 2 年間は特定の所在地を持たず、「virtual」で運営される。

第 2 回ワークショップ⁶⁾は 2005 年 8 月 15-26 日に米国 Snowmass で開催された。ここでは、設計の骨子 (本稿に説明した、加速勾配、陽電子生成法、減衰リングの大きさ・形状、トンネル数、交差角、衝突点数など) を決めるべく議論が行われた。本稿の時点 (2005 年 8 月末) ではまだいくつかの未定の部分が残されているが、年末までには (少なくとも暫定的に) 決定して文書化する予定である。これを、BCD (Baseline Configuration Document) と呼ぶ。このワークショップでほぼ合意に達した項目は以下のようなものである。もちろん、実際の建設までにはいくつかの変更が考えられる。

- 500 GeV の第 1 ステップでは 35 MV/m、1 TeV への増強時の追加部分は 40 MV/m の性能をもつ加速空洞を用いる。ただし、運転上のマージンを考慮して運転加速勾配はそれぞれ 31.5 MV/m、36 MV/m とし、これによってトンネルの長さを計算する。
- トンネルは 2 本が望ましい。(ただし、実際に選ばれるサイトにもよる。)
- 陽電子生成は、アンジュレータ法をベースラインとする。
- 減衰リングは、日本でのキッカー開発が評価され周長 6km の案が有力であるが、決定は 10 月末ごろに予定している小さなワークショップに持ち越す。
- バンチ圧縮は 2 段が望ましい。
- 衝突点は 2 つとし、交差角をそれぞれ 2 mrad および 20 mrad とする。

これによれば、図 3 にはすでにいくらかの変更は必要である (たとえば、全長はおよそ 50 km 程度になるであろう) が、まだ暫定的なのでこのままにしてある。

GDE の設定した今後の予定は以下のようなものである。

- 2005 年末までに、BCD を完成する。
- その後の変更の可能性をコーディネートするために Configuration Control Board (仮称) を置く。
- 2006 年末までに RDR (Reference Design Report) を完成する。これはコストの概略評価を含む。このためには、いくつかの「サンプルサイト」を念頭に置く必要がある。これは実際の敷地選定とは異なり、典型的な平地・山地、浅い・深いトンネルでの評価を行うものである。
- 2008 年あるいはそれ以降に TDR (Technical Design Report) を完成する。
- 敷地選定

すべてが順調であれば、2009-10 年ごろ建設開始、2010 年代半ばに衝突実験開始となる。

7. むすび

リニアコライダーは目前にせまった、物理と加速器の壮大な計画である。日本はこの計画において世界をリードできる素地をもっている。日本の貢献がなければ計画そのものが危機に瀕するであろう。この計画に積極的に参加して、是非成功に導きたい。

参 考 文 献

- 1) 横谷馨、「リニアコライダー」、日本加速器学会誌、1 (2004) 193-198.
- 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/>
- 6) 2nd ILC Workshop, Aug.15-26, 2005, Snowmass, Colorado, USA. <http://alcp2005.colorado.edu/>

横谷 馨 1947年8月15日生、1970年東京大学理学部物理学科卒業、1977年同理系大学院博士課程（素粒子理論）単位取得退学、1979年より高エネルギー物理学研究所勤務、加速器物理学を専攻。日本天文学会。理学博士。