

## はじめに

トピックスとして3年前のOHO'87で、横谷先生によってリニアコライダーの話が行なわれた。このときリニアコライダーの重要な点について、簡潔に説明がなされたので、筆者の下手な説明を聞く前に、まずOHO'87のテキストを読まれることをお勧めする。

筆者はトリスタン加速器の制御及び運転にかかわる仕事に従事しているので、加速器の理論家として世界的に優れた横谷先生とは全く違う観点からリニアコライダーの説明をするつもりである。即ち、簡潔に説明できないので具体的なリニアコライダーの説明になる。序論においてリニアコライダーの必要性をリング衝突型加速器と比較しながら議論する。また、衝突型加速器で最も重要な量としてのルミノシティについて検討する。そしてJLC(JAPAN LINEAR COLLIDER)計画及び海外の主なりニアコライダー計画について簡単に紹介する。2章ではリニアコライダーの特徴について最終収束系及びダンピングリングを中心に議論する。3章ではリニアコライダーで必要とされる研究及び技術開発についてまとめる。4章においてJLC計画を推進するために必要なATF(Accelerator Test Facility)計画の意義について検討してみる。最後のまとめの中で筆者のリニアコライダーについての意見を述べさせていただく。筆者はリニアコライダーについてまだ浅い知識しか持っていないので、以下に述べられる内容は簡単なものに限定させていただく。

### 1. 序論 (リニアコライダーの必要性)

高エネルギー物理学の一分野として加速器を使った高エネルギー実験が世界各国で行なわれている。その主な目的は物質の究極的構成要素とその究極の相互作用を探索することである。極微の世界を調べるには、調べたい領域の長さに反比例したエネルギー(運動量)を必要とする。このため加速器のエネルギーは半世紀足らずの間に一メガ電子ボルトから一テラ電子ボルトへと六桁も上げられたのである。この加速器の進歩に伴って行なわれた高エネルギー実験によって、我々は自然に対する理解を深めてきた。

表1に世界の主な稼働中及び計画中の衝突型高エネルギー加速器のパラメータを示す。

名前	国	衝突粒子	衝突 energy [TeV]	Luminosity [ $10^{33}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ ]	全長(周長) [km]
SLC	米	$e^+e^-$	0.10	0.0006	3.0
LEP	欧	$e^+e^-$	0.09	0.017	
			~0.19	~0.05	26.7
Tristan	日	$e^+e^-$	0.06	0.015	3.0
SPPS	欧	$\bar{p}p$	0.63	0.003	6.9
Tevatron	米	$\bar{p}p$	1.8	0.001	6.3
HERA	独	$ep$	0.31	0.015	6.3
LHC	欧	$pp$	16	6.2~37.9	26.7
SSC	米	$pp$	40	1~5	87.1
JLC	日	$e^+e^-$	1	6.2	16
TLC	米	$e^+e^-$	1	7.9	6
CLIC	欧	$e^+e^-$	2	1.1	26
VLEPP	ソ連	$e^+e^-$	2	1.0	20

表1 主な世界の稼働中及び計画中の衝突型高エネルギー加速器

トリスタン加速器と同類の電子陽電子衝突型リング加速器は、電子と陽電子ビームを加速するための加速空洞を設置する直線部と、偏向磁石が設置されるアーク部から構成される。一度リング内に入射された電子と陽電子ビームは数時間程度のビーム生存時間の間リング内を周回し続け、直線部中央に置かれた物理実験用ディテクター内で衝突を繰り返す。

電子陽電子衝突型リング加速器の場合には、アーク部で電子と陽電子ビームは放射光を放出してエネルギーを失う。従って、電子陽電子衝突型リング加速器で到達出来るビームの最大エネルギーは、直線部で加速された結果得られるエネルギーと、アーク部で偏向されるときに放射光損失するエネルギーとが均衡する定常状態で決定される。放射光損失は次式のように、ビームエネルギーの4乗(すなわち加速器運転に必要な電力の8乗)に比例し、偏向半径に逆比例する。

$$U_0 = \frac{4\pi}{3} \frac{r_e}{(mc^2)^3} \frac{E_0^4}{\rho_0} \quad (1)$$

実用的な単位で書き替えると、

$$U_0[\text{keV}] = 88.5 E_0^4 [\text{GeV}] / \rho_0 [\text{m}]$$

加速器運転経費の大部分を占める電力消費量を100MW程度に抑えると、ビームの最大エネルギーはリングの周長に大きく依存し、周長3kmのトリスタンでは最大エネルギーは約33GeVとなる。CERNで50GeVのLEPが1989年7月に完成したが、トリスタンの約1.5倍のビームエネルギーに到達するためにトリスタンの約9倍に相当する27kmの周長が必要であった。CERNではLEPの直線部にトリスタンで既に効果を発揮している超伝導空洞を設置し、加速効率を増加させ、さらにビームエネルギーを100GeVまで増加させるLEP-II計画を1993年までに完成させる予定である。

LEPリングでビームエネルギーを100GeV以上にさらに増加させることは、電力消費が増大し極めて非能率的である。LEP-IIの2倍の200GeVの電子陽電子衝突型加速器を実現するには、放射光損失の無い線形加速器を2台対向させ、電子と陽電子ビームをそれぞれ1台の線形加速器で加速し衝突させるリニアコライダー（衝突型線形加速器）が唯一残された方式の加速器である。

衝突ビーム型加速器に於ては、エネルギーと共に、ルミノシティと呼ばれる量が重要になる。これは、衝突頻度を示すパラメーターで、通常Lと書かれる。衝突断面積 $\sigma$ を持つ事象は、一つの衝突点に於て、単位時間にL $\sigma$ 回発生する。

電子陽電子衝突型リング加速器の場合、ルミノシティは次式で与えられ、一般にLinear Tune Shift Limitによって制限される。

$$L = \frac{fkN^2}{4\pi\sigma_x^*\sigma_y^*} \quad (2)$$

Beam-Beam効果の強さを表すLinear Tune Shift Parameterは次式によって表される。

$$\xi_x = \frac{r_e\beta_x^* N}{2\pi\gamma\sigma_x^*(\sigma_x^* + \sigma_y^*)} \quad (3)$$

$$\xi_y = \frac{r_e\beta_y^* N}{2\pi\gamma\sigma_y^*(\sigma_x^* + \sigma_y^*)} \quad (4)$$

ここで、fはRevolution Frequency, kはBeam当たりのBunch数、NはBunchの中の粒子数、 $\sigma_x^*$ 及び $\sigma_y^*$ は衝突点に於ける水平方向及び垂直方向のBeam Size,  $\gamma$ はビームエネルギー/ $mc^2$ ,  $r_e$ は古典電子半径、 $\beta_x^*$ 及び $\beta_y^*$ は衝突点に於ける水平方向及び垂直方向の $\beta$ 関数である。

上式から

$$L = \frac{\gamma I \xi_y k}{2e r_e \beta_y^* (1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*})} \quad (5)$$

但し、 $I(=efN)$ はBunch Currentを表す。ほとんどの電子陽電子衝突型リング加速器において $\sigma_y^* \ll \sigma_x^*$ であるので、

$$L \cong \frac{\gamma I \xi_y k}{2e r_e \beta_y^*} \quad (6)$$

と近似できる。

$\xi_y$ はIに比例して増加するのであるが、Linear Tune Shift Limit( $\xi_{\max}$ )を越えることができないので、 $\sigma_y^*$ がIに比例して増加することになる。これがBeam Blow-upである。一般に、 $\xi_y < \xi_{\max}$ ではルミノシティはIの2乗に比例して増加し、 $\xi_y = \xi_{\max}$ でIに比例して増加する。Beam SizeがBeam-Beam効果によって大きくなると、Detector Backgroundの増加やBeam Lifeの減少がおきる。このように $\xi_{\max}$ が電子陽電子衝突型リング加速器のルミノシティを支配する大きな要因である。

一方、リニアコライダーのルミノシティは次式で与えられ、

$$L = \frac{N^2 f k H_x H_y}{4\pi\sigma_x^*\sigma_y^*} \eta_L \quad (7)$$

リング加速器と比較して $H_x, H_y$ 及び $\eta_L$ なる項が追加されている。 $H_x$ と $H_y$ はpinch効果によって生じるルミノシティenhancement factorである。また $\eta_L$ は衝突するときのcrossing angleの効果及びバンチ長と $\beta_x^*$ が同程度である効果を取り入れるためのefficiency factorである。

$$\eta_L = \frac{2}{\sigma_z \sqrt{\pi}} \int_0^\infty \frac{\exp\left\{-\left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2 \left[1 + \left(\frac{\sigma_z \theta_c}{\sigma_x}\right)^2 \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{z}{\beta_x}\right)^2}\right)\right]\right\}}{1 + \left(\frac{z}{\beta_x}\right)^2} dz$$

$\theta_c$ はcrossing angleである。

$\sigma_z \ll \beta_x$ の場合は、

$$\eta_L \cong \frac{\sigma_x}{\sqrt{\sigma_x^2 + (\sigma_z \theta_c)^2}} \quad (8)$$

となる。

Enhancement factorはバンチの長さとその焦点距離の比として定義されるDisruption parameterと呼ばれる量によって決まる。

$$H_{x(y)} = f(D_{x(y)})$$

$$D_{x(y)} = \frac{\sigma_z}{f_{x(y)}} = \frac{2r_e N \sigma_z}{\gamma \sigma_{x(y)} (\sigma_x + \sigma_y)} \quad (9)$$

roundビーム ( $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ ) のとき、

$D_x = D_y$  である。

flatビームのとき、すなわち  $\sigma_x \gg \sigma_y$  のとき  $D_x \approx 0$  である。

Hは、 $D=0$ で $H=1$ であるが、一般には計算機シミュレーションによって求めるしかない。ここでは便利な近似式を以下に示しておく。

$$H_{x(y)} = 1 + 1.37 \left( \frac{1}{1 + D_{x(y)}} \right)^{-5.5} \quad (10)$$

以上の議論では  $\frac{\sigma_z}{\beta}$  に関するHの依存性を無視した。また、Beamstrahlungに関しては2-1節で簡単に紹介するが、詳しくは他の文献を参照してほしい。

以上のルミノシティの式からリングコライダーとリニアコライダーの比較を行なう。衝突エネルギーを増やして高エネルギー実験を行なうとき、必要とするルミノシティは $\gamma^2$ に比例して増加する。これは衝突の確率が $\gamma^2$ に反比例して小さくなるからである。表1に示されている様にTeV領域のコライダーでは $10^{33} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ 以上のルミノシティが必要になる。リングコライダーのルミノシティはTune Shift Limit( $\xi_{\max}$ )によって制限される。一方、リニアコライダーのルミノシティは、衝突後のビームを捨てるのでこれによって制限されない。ただし、ここでは議論しないが実験に対するバックグラウンドの問題によって制限される。普通、Disruption parameter  $D \approx 10$ 程度で、roundビームに対してルミノシティ enhancement factor  $H_x H_y = 6$ 程度、一方flatビームに対して $\sqrt{6}$ 程度である。また、ビームを捨ててもよいために、リニアコライダーの衝突時のビームサイズは数nmにできるが、リングコライダーの衝突時のビームサイズは数 $\mu\text{m}$ 程度に制限される。TeV領域のレプトンコライダー(電子陽電子衝突型加速器)でリングコライダーの唯一の利点は繰り返し周波数が高いことである。しかし、このリングコライダーの使用電力及びリングの周長は非現実的である。このようにnmのビームを安定に衝突させる技術的困難はあるが、リニアコライダーのルミノシティの

可能性に対する期待は計り知れない。

本格的なリニアコライダーは未だ世の中に存在しないが、変形リニアコライダーとして、1つの線形加速器で陽電子電子を共に加速して、出口で分けて大きな弧を描かせた後に衝突させる加速器がSLACで稼働している。第1図にこの衝突型加速器SLCの構成を示す。

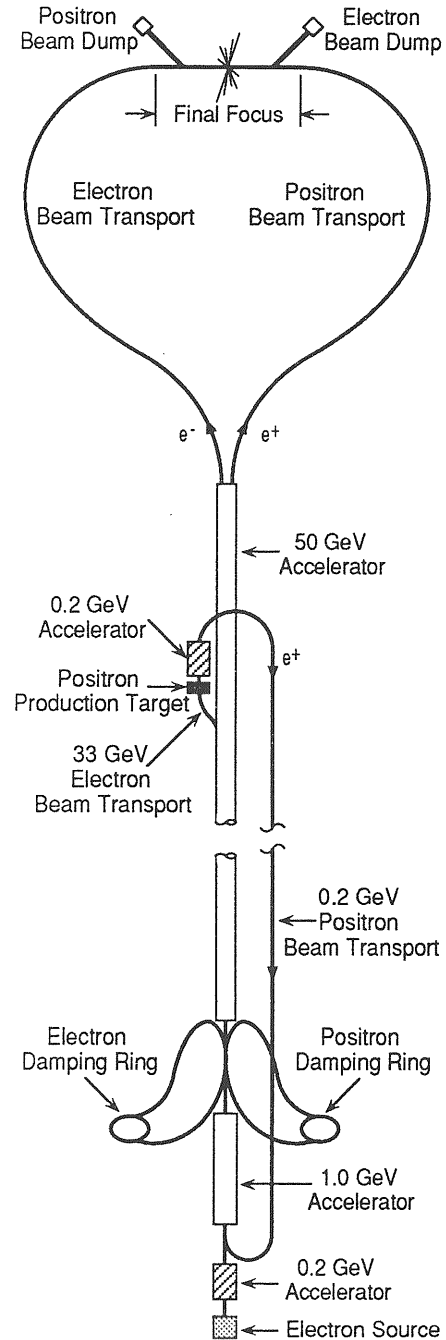


図1 Layout of the SLC.

電子銃から2つの電子の塊（バンチ）を発生し、バンチ圧縮して1.2GeVまで加速し、Electron Damping Ringに入射してビームのエミッタンスを小さくする。SLCを動かし初めるときは陽電子ビームがPositron Damping Ringの中にないので、ビームのエミッタンスが小さくなった2つの電子バンチをElectron Damping Ringから取り出し、これを33GeVまで加速して、陽電子生成用Targetに衝突させて陽電子を作る。これらの陽電子を集めて0.2GeVまで加速して、電子銃後の1.0GeV線形加速器に戻して1.2GeVまで加速してPositron Damping Ringに入射する。それぞれのDamping Ringに2バンチの陽電子と電子が回っている状態になる。7msec程度でビームのエミッタンスは十分に小さくなるので、電子銃から来た2つの電子バンチをElectron Damping Ringに入射する直前に、Positron Damping Ringの中から1つの陽電子バンチを取り出しその直後にElectron Damping Ringから2つの電子バンチを取り出し、これらのバンチの長さを圧縮した後33GeVまで加速する。

Beam Energy	50 GeV
Design Luminosity	$6 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
Repetition Rate	180 Hz (120 Hz achieved)
Bunch Population	$7 \times 10^{10}$ ( $3 \times 10^{10}$ achieved)
Bunches per Fill	$e^+ e^- e^-$ separated by 60 nsec
Polarization	45 % polarized $e^-$ (planned)
Wave Length $\lambda_{RF}$	10.5 cm
Peak Gradient	17 MV/m
Filling Time	800 nsec
Normalized Emittance	
$\gamma \epsilon_x$	$1.5 \times 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{m}$
$\gamma \epsilon_y$	$1.5 \times 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{m}$
Crossing Angle	0 mrad
$\beta_x^*$	7.5 mm
$\beta_y^*$	7.5 mm
$\sigma_x^*$	1600 nm (3000 achieved)
$\sigma_y^*$	1600 nm (3000 achieved)
$\sigma_z^*$	1000 $\mu\text{m}$
Final $(\Delta E/E)_{\text{rms}}$	0.5 % (0.2 % now)

表2 Parameters of the SLC.

先行している2つの陽電子電子はさらに50GeVまで加速され、アーク部の入口で2つに分かれて衝突領域まで輸送される。最後の電子バンチは33GeVで陽電子生成用Targetに衝突させて陽電子を作るのに使う。以上のことが120Hzの繰り返しで行なわれている。

この加速器で加速勾配を上げてビームエネルギーを70GeV以上にする場合、唯一度しか通過しないアークにおける輻射が問題になる。表2にSLCの主なパラメータを示す。最近得られているルミノシテは1時間当たり0.8Z<sub>0</sub>生成に相当すると言われている。

### 1-1. JLC計画

JLCは電子と陽電子をそれぞれ加速し正面衝突させるために、対向した2台の500GeV線形加速器システムから構成される。電子を加速する線形加速器システムは、電子源としてのRFガン、ダンピングリング入射器用の1.54GeV Sバンド線形加速器、ビームを低エミッタンス化するための1.54GeVのダンピングリング、第一バンチコンプレッサー、前段加速用の5.5GeVのSバンド線形加速器、第二バンチコンプレッサー、500GeVのXバンド主線形加速器、並びに衝突点でビームを収束させるためのファイナルフォーカス系で構成されている。一方、陽電子を加速する線形加速器システムは、ダンピングリング入射器用の1.54GeV Sバンド線形加速器からファイナルフォーカス系まで電子用線形加速器システムと同じ構成である。

JLC計画の加速器構成を図2に示す。2台のRF電子銃から200Hzで10バンチの電子ビームが発生加速される。これらの一方のビームは陽電子を生成するため10から30GeVまでの間のあるエネルギーまで加速され、陽電子発生用標的に衝突する。そして発生した陽電子を集めて1.54GeVまで加速し、1.54GeVのPre-Damping Ringに入射する。このPre-Damping Ringはビームサイズの大きい陽電子バンチを十分に受け入れられるように設計されている。もう一方の10バンチの電子ビームは1.54GeVに加速され、1.54GeVのDamping Ringに入射され、水平方向 $3 \times 10^6 \text{ radm}$ 、垂直方向 $3 \times 10^8 \text{ radm}$ の規格化エミッ

タンスになるまでリング内で放射減衰する。また陽電子バンチはPre-Damping Ringから取り出され、1.54GeVのDamping Ringに入射され、電子バンチと同じように放射減衰させられる。十分に放射減衰した両バンチは非常に安定な取り出しシステムによって取り出され、第一バンチコンプレッサーを通過して、5.5GeVまで前段線形加速器によって加速される。そして76 $\mu$ mまでバンチ長を短縮するため第二バンチコンプレッサーを通過して、ビームの進行方向は逆向きにされる。このようにバンチ長が76 $\mu$ mになった10バンチのビームはX-bandの主線形加速器で500GeVまで加速される。最後に、ビームの垂直方向の大きさ1.4nmでかつ水平方向の大きさ230nmにするため、10バンチのビームは約400mある最終収束系を通され、6.0mradの衝突角度で衝突して、ビームダンプに捨てられる。主なJLC計画のパラメータを表3に示す。また、このJLC計画では偏極電子ビームを使うことが考えられていて、偏極電子ビーム源の開発が進められている。さらに、前段線形加速器から後の部分、即ち第二バンチコンプレッサー、主線形加速器及び最終収束系は地下50m以上の大深度地下を利用した施設にする計画になっていて、加速器を大深度地下利用した場合の施設、並びに設備の設計が検討されている。

Beam Energy	500 GeV
Design Luminosity	$6.2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
Accelerating Frequency	11.424 GHz
Accelerating Gradient	
In a Structure	100 MeV/m
Averaged in Linac	70 MeV/m
Total Length	16 km
Bunch Population	$1.0 \times 10^{10}$
Bunches per Fill	10 bunches
Bunch Spacing	1.4 ns
Repetition Rate	200 Hz
Normalized Emittance	
$\gamma \epsilon_x$	$3 \times 10^{-6} \text{ rad} \cdot \text{m}$
$\gamma \epsilon_y$	$3 \times 10^{-8} \text{ rad} \cdot \text{m}$
$\sigma_x^*$	230 nm
$\sigma_y^*$	1.4 nm
$\sigma_z^*$	76 $\mu$ m
Crossing Angle	6.0 mrad
$\beta_x^*$	14 mm
$\beta_y^*$	0.05 mm
Total Length of FF/Beam	365 m
Distance Between	
Last e <sup>+</sup> Quad and e <sup>-</sup> Quad	2.0 m

表3 Parameters of the JLC.

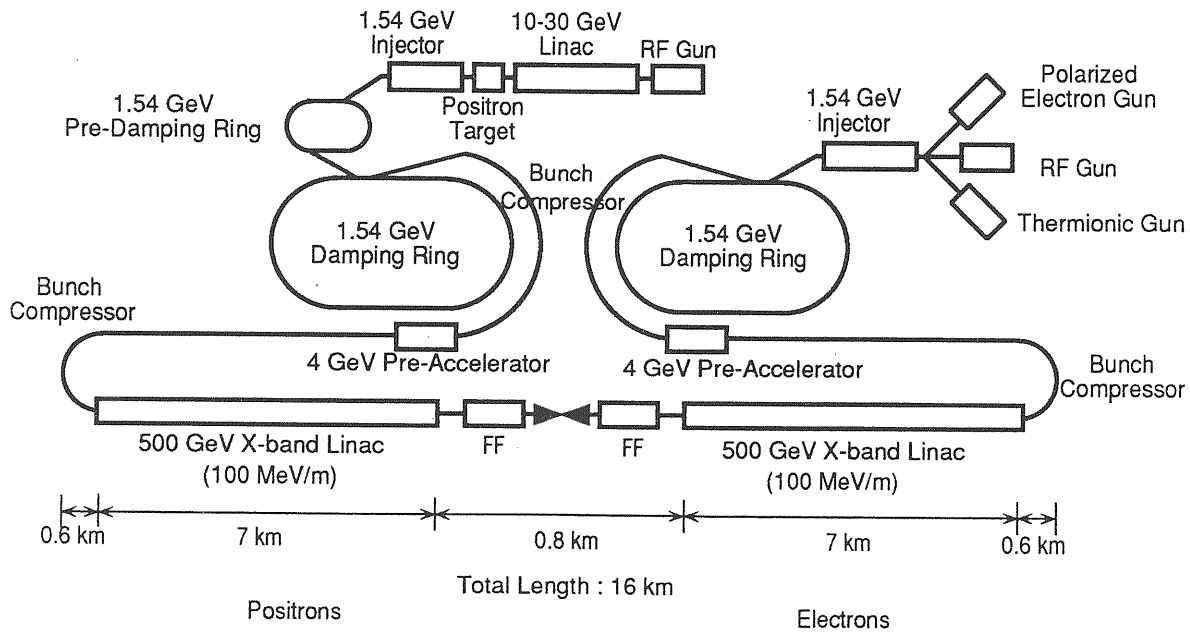


図2 Layout of the JLC (Japan Linear Collider) Project.

## 1-2. 海外の主なリニアコライダー計画

### SLACのNLCとTLC計画

NLC(Next Linear Collider)計画の加速器構成を図3に示す。この計画はJLC計画とほとんど同じ構成で、違う点はDamping Ringのエネルギーが1.8GeVで、L-band線形加速器を入射器として使用していることと、0.5GeVの前段陽電子Damping RingとAchromatic Isochronousを使って効率よく陽電子発生用標的から発生した陽電子を集めていることである。バンチコンプレッサーのエネルギーは第1バンチコンプレッサーが1.8GeVで第2バンチコンプレッサーは18GeVである。NLC計画のビームの衝突エネルギーは250GeV以上で、ビームパルスの繰り返しは180Hzとなっている。また、システムチェックを行なうためにNLC陽電子入射器側には図3の右上に示された電子源と0.5GeVリニアックがある。

SLACではこのNLC計画は中間段階のものとして考えている。本命はTLC計画である。TLC計画の構成を図4に示す。またその主なパラメータを表4に示す。

Damping Ringからのビーム取り出しによるビームのふらつきは、線形加速器中でTransverse Wake Fieldをもたらしたり衝突点でのビーム位置のふらつきになる。このことは線形加速器でのビームロス及び衝突点でのビームのすれちがいをもたらし、ルミノシティの極端な減少を生みだす。

これに対してTLC計画では、LC88で取り出しシステムにDC SeptumとDouble Kicker Systemを使って、Kickerのふらつきによるビームへの影響を打ち消して安定な取り出しを行なうと同時に、ビームにFeedforward制御を行なって取り出されたビームの位置のふらつきを衝突点でのふらつきに換算して $0.1\sigma$ 以内にすることを提案している。JLC計画でも同様なことを検討している。

Beam Energy	500 GeV
Design Luminosity	$8 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
Repetition Rate	360 Hz
Bunch Population	$1.4 \times 10^{10}$
Bunches per Fill	10 bunches
Polarization	$e^-$
Wave Length $\lambda_{RF}$	1.7 cm
Acc. Gradient	186 MV/m
Filling Time	60 nsec
Normalized Emittance	
$\gamma \epsilon_x$	$2.7 \times 10^{-6} \text{ rad} \cdot \text{m}$
$\gamma \epsilon_y$	$3.0 \times 10^{-8} \text{ rad} \cdot \text{m}$
Crossing Angle	4.0 mrad
$\beta_x^*$	27 mm
$\beta_y^*$	0.09 mm
$\sigma_x^*$	390 nm
$\sigma_y^*$	2.2 nm
$\sigma_z^*$	70 $\mu\text{m}$
Final $(\Delta E/E)_{rms}$	0.14 %

表4 Parameters of the TLC.

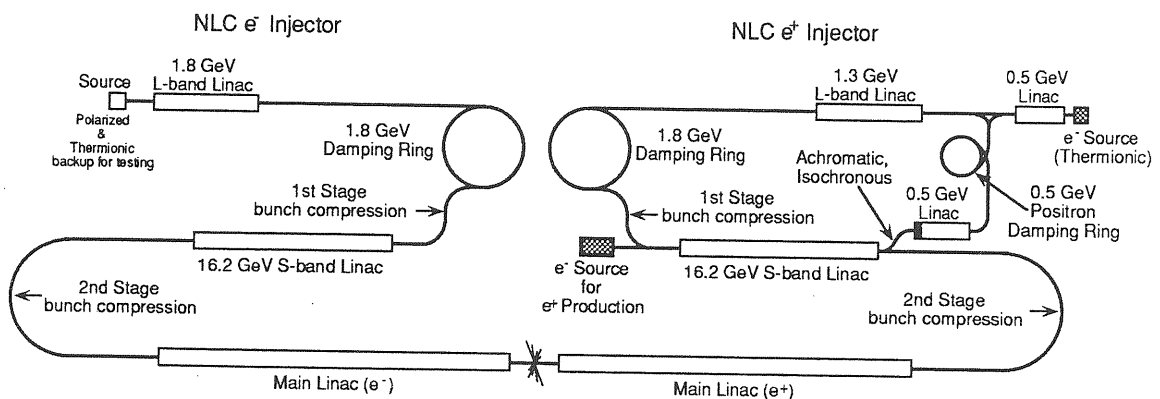


図3 Layout of the NLC.

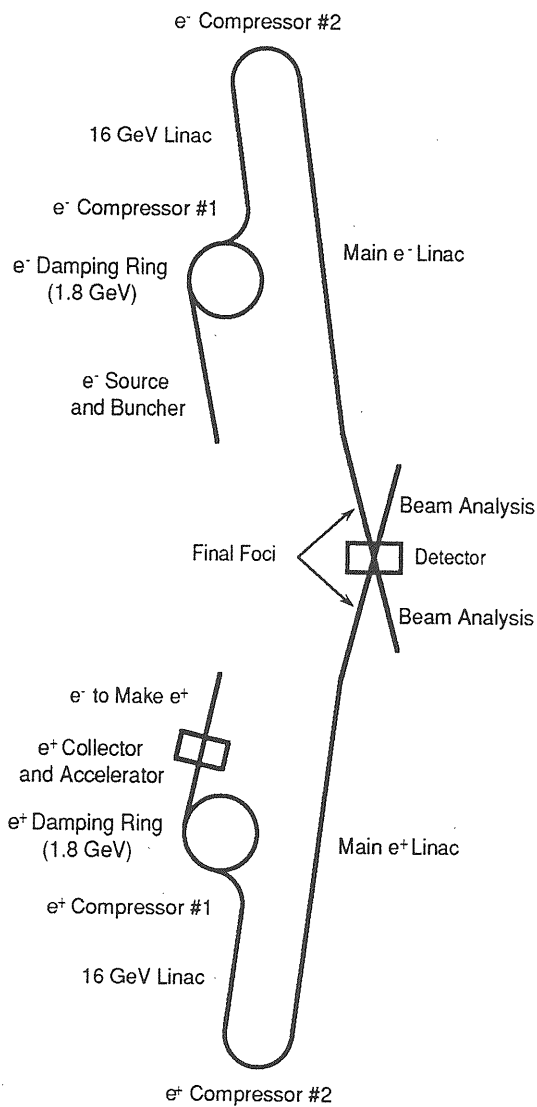


図 4 Layout of the TLC.

### CERNのCLIC計画

CLIC(CERN Linear Collider)計画は今まで述べてきた計画と線形加速器部の加速高周波発生方式が異なる。ここではTwo beam accelerator方式が採用されている。これについてはOHO'84において平松先生が解説されている。また、KEKにおいても平松先生をリーダーとするグループはTwo beam accelerator方式を使ったLC(Linear Collider)計画の提案をしている。CLIC計画の加速器全体構成は図5のようになっている。その主なパラメータを表5に示す。

Beam Energy	1 TeV
Design Luminosity	$1.1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
Repetition Rate	1690 Hz
Bunch Population	$5 \times 10^9$
Bunches per Fill	1 bunch
Wave Length $\lambda_{RF}$	1.0 cm
Acc. Gradient	80 MV/m
Filling Time	12 nsec
Normalized Emittance	
$\gamma \epsilon_x$	$1.6 \times 10^{-6} \text{ rad} \cdot \text{m}$
$\gamma \epsilon_y$	$5.0 \times 10^{-7} \text{ rad} \cdot \text{m}$
Crossing Angle	less than 3 mrad
$\beta_x^*$	30 mm
$\beta_y^*$	0.4 mm
$\sigma_x^*$	60 nm
$\sigma_y^*$	12 nm
$\sigma_z^*$	200 $\mu\text{m}$
Final $(\Delta E/E)_{rms}$	0.4 %

表 5 Parameters of the CLIC.

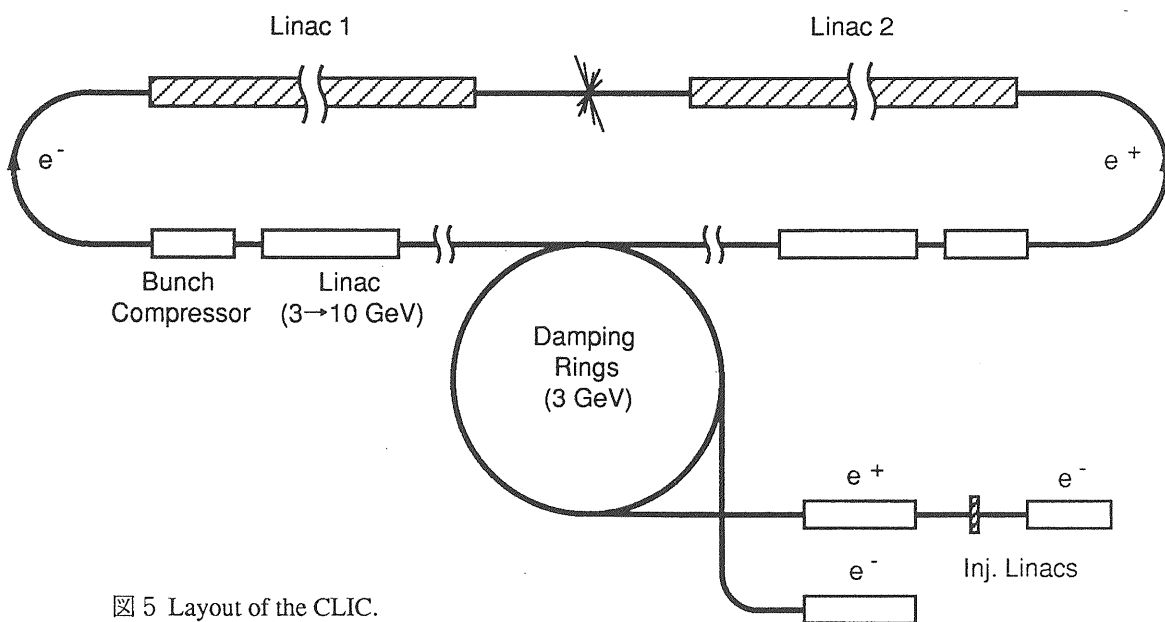


図 5 Layout of the CLIC.

## ソ連のVLEPP計画

VLEPP計画の加速器は他のリニアコライダーと比較して陽電子及び電子生成の方式に特徴がある。ここでの説明はLC90（KEKで今年の3月に行なわれた）でBalakin達によって行なわれた話にもとずいているのと著者の理解力不足のために、不正確な記述になっていることをお断りしておく。

まず電子源で発生した大強度単バンチビームを加速してエネルギー圧縮した後3GeVまで加速してDamping Ringに入射する。Damping Ringで低エミッタンスビームにして、前段加速した後バンチコンプレッサーを通過させて150GeVまで加速する。150GeVに加速された大強度単バンチビームはヘリカルアンジュレーターを通過しながら円偏向したガンマー線を前方にだして僅かに減速する。150GeVのビームはさらに1TeVまで加速されて、最終収束系に入り衝突する。一方円偏向ガンマー線は偏極電子陽電子発生用標的に衝突して、低エネルギーの偏極電子陽電子が発生する。これらの偏極電子又は偏極陽電子を集めて加速し、150GeVのビームと分けるためエネルギー分析器を通過させる。エネルギー分析器で大きく偏向された低エネルギー偏極ビームは3GeVまで加速されDamping Ringに入射される。ここで記述されたことが成り立つ為には、ヘリカルアンジュレーターで発生した円偏向ガンマー線が偏極ビームに変換され再びそのビームが円偏向ガンマー線を発生するまでの変換利得が1以上でなければならないことである。このことについて十分な検討が進められているようである。

また、最初の偏極陽電子ビーム発生過程は、バンチコンプレッサーの終わりにある電子ビーム発生装置で電子ビームを作り150GeVに加速することによって偏極陽電子ビームが作られる。このように考えると最初に述べた電子源は必要ないようであるが、この電子源は加速管、エネルギーコンプレッサー、Damping Ring、バンチコンプレッサーなどを試験及び調整するのに使用される。図6にVLEPPの加速器構成を示す。ビームの衝突エネルギーは1TeVで繰り返しは100Hzとなっている。表6にVLEPPの主なパラメータを示す。

Beam Energy	1 TeV
Design Luminosity	$1.0 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
Repetition Rate	100 Hz
Bunch Population	$10 \times 10^{10}$
Bunches per Fill	1 bunch
Polarization	$e^+, e^-$
Wave Length $\lambda_{RF}$	2.1 cm
Acc. Gradient	100 MV/m
Filling Time	70 nsec
Normalized Emittance	
$\gamma \epsilon_x$	$6 \times 10^{-6} \text{ rad} \cdot \text{m}$
$\gamma \epsilon_y$	$6 \times 10^{-8} \text{ rad} \cdot \text{m}$
Crossing Angle	0 mrad
$\beta_x^*$	100 mm
$\beta_y^*$	1.0 mm
$\sigma_x^*$	1000 nm
$\sigma_y^*$	10 nm
$\sigma_z^*$	700 $\mu\text{m}$
Final $(\Delta E/E)_{rms}$	1.0 %

表6 Parameters of the VLEPP.

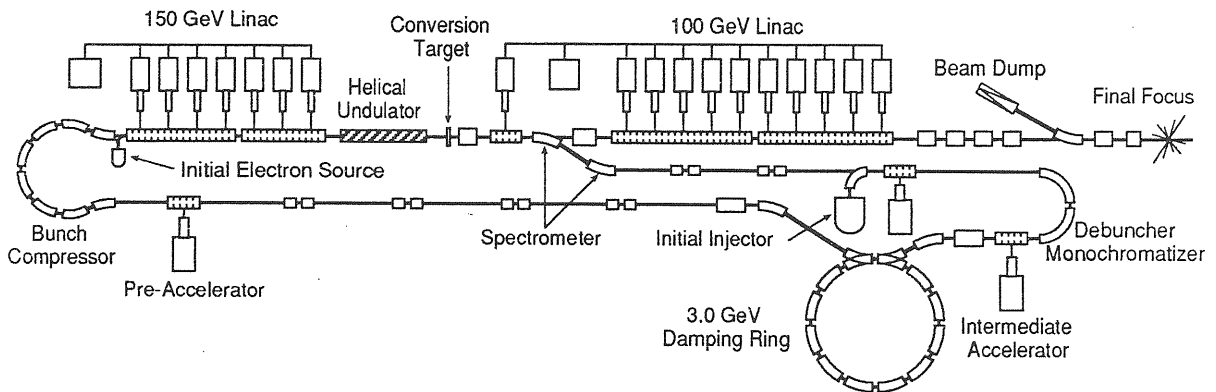


図6 Layout of the VLEPP.



## 2. リニアコライダーの特徴

リニアック、電子銃、陽電子発生及びビームトランスポート（バンチコンプレッサー系を含む）については別に講義されるので、ここでは最終収束系とダンピングリングについて説明する。

ここで紹介してきたリニアコライダーではリングコライダーと比較して繰り返し周波数が遥に低いので、ルミノシティに関してリニアコライダーは基本的に不利である。しかし、序論でも述べたようにリニアコライダーでは衝突後のビームを捨てられるので、一回の衝突でビームが激しく変形しても気にならない。これによってビームを数nmまで絞ることができ、また電子陽電子間の強い引力による衝突中のビームのTransverse方向の収縮効果（pinch効果）を利用できる。最近、超伝導空洞を利用したリニアコライダーが提案されるようになった。これはリングコライダーと同程度の繰り返しで運転できることを特徴としている。しかし、この超伝導リニアコライダーでは陽電子のエミッタンスを小さくするためのDamping Ringの施設が大きなものになってしまう。これはビームの繰り返しが高くなることによって、ビームを放射減衰させるのに使うことのできる時間が短くなるからである。以下に、序論で紹介したリニアコライダー計画の特徴を簡単にまとめておく。

- 1) ビームの繰り返しは100Hzから2kHz程度である。
- 2) バンチ当たりの粒子数は $(0.5 \sim 10) \times 10^{10}$ である。
- 3) 加速勾配は80MeV/m～186MeV/mである。
- 4) 衝突点での垂直方向のビームサイズは数nm程度で、水平方向のビームサイズは数十nm程度から1000nmまでである。
- 5) 規格化エミッタンスの水平成分及び垂直成分は、それぞれ数 $\mu\text{radm}$ と数十 $\text{nradm}$ である。
- 6) バンチ長は70 $\mu\text{m}$ ～700 $\mu\text{m}$ である。
- 7) Disruption Parameter(9式)の値は $D_x$ が1以下で、 $D_y$ は3から20の範囲にある。
- 8) Beamstrahlungによって生じる重心系エネルギーの拡がり及び実験検出器に与えるバックグラウンドの影響を考慮しなければならない。

### 2-1. 最終収束系

ビームエネルギー500GeVで $10^{24}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に近いルミノシティを得るためには衝突点でのビームサイズを水平方向約200nmで垂直方向約2nmにする必要がある。この時、衝突中に相手のビームによって作られた高い磁場でシンクロトロン放射が起こり、ビームエネルギー損失が無視できなくなる。この放射はbeamstrahlungと呼ばれ、その平均の相対エネルギー損失 $\delta$ は次式で与えられる。

$$\delta = \frac{F_1 r_e^3 N^2 \gamma}{\sigma_z (\sigma_y)^2} \left[ \frac{4}{\left(1 + \frac{\sigma_x}{\sigma_y}\right)^2} \right] H_Y \quad (11)$$

$$F_1 \approx .22,$$

$$\gamma_e \approx 2.82 \times 10^{-15} \text{ m}$$

pinch効果を考慮して、

$$\sigma_x = \frac{\sigma_x}{H_x}$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma_y}{H_y}$$

としてある。

Flat ビームでは以下のように近似できる。

$$\delta \approx \frac{F_1 r_e^3 N^2 \gamma}{\sigma_z} \frac{4}{(\sigma_x)^2} H_Y \quad (12)$$

$H_Y$ は量子効果を考慮するための補正係数である。

$$H_Y \approx \left( \frac{1}{1 + 1.33 Y^{\frac{2}{3}}} \right)^2 \quad (13)$$

$$Y = \frac{F_2 r_e \lambda \gamma N}{\sigma_z \sigma_y} \left[ \frac{2}{1 + \frac{\sigma_x}{\sigma_y}} \right] \quad (14)$$

$$F_2 \approx .43$$

$$\lambda \approx 3.86 \times 10^{-13} \text{ m}$$

平均の相対エネルギー損失 $\delta$ の式からflatビームを使う方が有利になる。

リニアコライダーではroundビームよりもflatビームを使う方向で検討が進められている。ここでB.Palmer氏の報告に従って簡単にroundビームとflatビームを比較する。flatビームの長所として、主に以下のものが考えられる。

1. ダンピングリングで作られる低エミッタンスビームの水平方向と垂直方向のエミッタンス比は100:1程度が期待できる。

2. 加速管の構造において、roundアイリスを楕円又はスロットに変えて、transverseウェーク場を小さくできる。これは、小さな垂直エミッタンスをblow-upさせないでflatビームを輸送できることを示している。

3. 最終収束系でのクロマティシティ補正のための2重極磁石によるシンクロトン輻射はビームエミッタンスをblow-upする。このblow-upは原理的には水平方向のみで、非常に小さな垂直方向エミッタンスは影響されない。

4. 最終収束系の4重極磁石を弱く出来て、特殊な収束システムを必要としない。

その他、flatビームには幾つかの長所があって、ルミノシティenhancement factorによる短所を考慮しても、flatビームの方がroundビームと比較してルミノシティ利得が12程度あると述べている。

しかし、最終収束系のアラインメントで要求される精度は、垂直方向のビームサイズが前述のように小さいために、非常に厳しい値になる。ここではJLC計画の結果を簡単に紹介する。

ビームサイズが大きくなって、ルミノシティが $\frac{1}{\sqrt{2}}$ になる垂直成分の許容誤差は以下のようになる。

4重極磁石の垂直方向の振動 $\sim 8\text{nm}$

4重極磁石の強さの変動 $\sim 3 \times 10^{-5}$

4重極磁石のねじれ角の変動 $\sim 0.03\text{mrad}$

ビームの位置がずれて、ルミノシティが $\frac{1}{\sqrt{2}}$ になる垂直成分の許容誤差は4重極磁石の垂直方向の振動で $\sim 2\text{nm}$ となる。

以上の値は最終収束系用4重極磁石の内でも最も厳しいものの値である。

この節の最後の話として、Synchrotron Radiation Limit(Oide Limit)について結果のみ紹介する。

最終収束用4重極磁石でのSynchrotron

Radiationによって、衝突点のビームサイズの最小限界が生じる。これは量子化された放射によって生じるエネルギーの拡がりや4重極磁石の収束機能を乱すために起きる現象である。

その最小限界のビームサイズを表わす式は以下のようになる。

$$\sigma_{y\min}^* = \left(\frac{7}{5}\right)^{\frac{1}{2}} (\gamma \epsilon_y)^{\frac{5}{7}} \left[ \frac{275}{3\sqrt{6\pi}} r_e \lambda_e F(\sqrt{KL}, \sqrt{KI^*}) \right]^{\frac{1}{7}} \quad (15)$$

この式で[ ]の値は4重極マグネットが長くその磁場が弱いときに小さくなるが、この値は $\sigma_{y\min}^*$ に1/7乗で効くために最小限界のビームサイズは垂直方向の規格化エミッタンスで決まる。[ ]の値及び式の導出については生田勝宣氏の論文を見てください。

## 2-2. ダンピングリング

ダンピングリングの設計を行なう場合、まず実効ダンピングタイムと呼ばれる量を考えなければならない。入射線形加速器からビームパルスがf[Hz]の繰り返しでダンピングリングへ入射され、ダンピングリングから取り出される。リング内を周回している電子又は陽電子のエミッタンスは主に放射減衰と放射励起によって決まる平衡状態のエミッタンスに収束していく。

ビームのエミッタンスの時間変化は下記の式に従う。

$$\begin{aligned} \epsilon_x(t) &= \epsilon_i \exp\left(-\frac{2t}{\tau_x}\right) + \left(1 - \exp\left(-\frac{2t}{\tau_x}\right)\right) \epsilon_x \\ \epsilon_y(t) &= \epsilon_i \exp\left(-\frac{2t}{\tau_y}\right) + \left(1 - \exp\left(-\frac{2t}{\tau_y}\right)\right) \epsilon_y \end{aligned} \quad (16)$$

ここで $\epsilon_i$ は入射ビームのエミッタンス、 $\tau_{x,y}$ は水平及び垂直方向のダンピングタイム、 $\epsilon_{x,y}$ は水平及び垂直方向のリングの平衡状態でのビームのエミッタンスである。

線形加速器の保存量は規格化エミッタンスで、エミッタンスを $\gamma$ 倍したものである。 $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に近いルミノシティを得るためにはこの規格化エミッタンスの垂直成分が $3 \times 10^8\text{radm}$ 以下になる必要がある。よって、規格化エミッタンスの

水平成分は $3 \times 10^{-6}$ radm以下にする必要がある。一般に入射ビームはroundビームでその規格化エミッタンスは $10^{-3}$ radm程度である。それゆえビームを減衰するのに必要な時間は

$$\gamma \epsilon_i \exp\left(-\frac{2t}{\tau_y}\right) \leq 10^{-9} \text{ より決まる。}$$

$$t \geq 7\tau_y \text{ となる。}$$

今 $N_p$ パルストレイン（バンチのひと塊をトレインと呼ぶ）のビームがリング内を周回しているとする。ダンピングタイムの条件式は以下のようになる。

$$7\tau_y \leq \frac{N_p}{f}$$

ここで $\frac{\tau_y}{N_p}$ を実効ダンピングタイム（ $\tau_{\text{eff}}$ ）と呼ぶ。

$$\text{よって、} \tau_{\text{eff}} \leq \frac{1}{7f}$$

例えば、 $f=200\text{Hz}$ の時、 $\tau_{\text{eff}}=7.14\text{msec}$ となる。

$\rho_B$ を偏向半径とすると、ダンピングタイムは $\frac{\rho_B}{\gamma^3}$ に比例する。一方、規格化エミッタンスは $\frac{\rho_B}{\gamma^3}$ に反比例する。この矛盾する関係があるのので、ダンピングリングではこれらの両方の値を小さくする装置としてDamping Wigglerを使用することになる。ここでは話を簡単にするために、Separated function FODO LatticeとDamping Wigglerを使用した場合に限定する。

ダンピングリングでは入射及び取り出し系のキッカー電磁石の性能が全体の設計に決定的な影響を与える。キッカー電磁石の立ち上がり（立ち下がり）時間とFlat Topの時間の和を $t_k$ とすると、リングの周長 $L_R$ は $t_k N_p c$ 以上でなければならない。ただし、 $c$ は光の速度である。

以下にダンピングリングの設計に関係する式及びパラメータについてまとめる。

$\rho_w(\text{m})$ ：ウィグラーの偏向半径

$L_w(\text{m})$ ：ウィグラーの全長

$$\eta = \frac{L_w}{2\pi\rho_w} = \frac{|\theta_w|}{2\pi}$$

$$L_R(\text{m}) = 2\pi\left(\frac{\rho_B}{F} + \frac{\eta\rho_w}{F_w}\right)$$

$F$ ：アーク部での偏向磁石の占有率

$F_w$ ：直線部でのウィグラー磁石の占有率

$E(\text{GeV})$ ：ビームエネルギー

ビームがリングを一周するとき放出する放射光のエネルギーは次式で表わされる。

$$U = U_0 + U_w = U_0 \left(1 + \frac{\eta\rho_B}{\rho_w}\right)$$

$$= 88.5E^4 \left(\frac{1}{\rho_B} + \frac{\eta}{\rho_w}\right) [\text{keV}] \quad (17)$$

ここでウィグラー磁石の効果を偏向磁石に含めるために次式の半径(Equivalent radius)を定義する。

$$\rho_{\text{eq.}} = \frac{\rho_w}{\eta + \frac{\rho_w}{\rho_B}} \quad (18)$$

この半径を使うと放射損失は以下の式で表わせる。

$$U = 88.5E^4 / \rho_{\text{eq.}} \quad (19)$$

また、ダンピングタイムは次式のようにになる。

$$\tau_x \approx \tau_y \approx 2\tau_s = 2\left(\frac{E}{U}\right)\left(\frac{L_R}{c}\right)/(1-D)$$

$$\approx 7.533 \times 10^{-5} L_R E^{-3} \rho_{\text{eq.}} [\text{sec}] \quad (20)$$

( $D \approx 0$ )

ビームのリング内滞在時間を $7\tau_y$ であると仮定する。

上の式から入射リニアックの繰り返しは次式で表わせる。

$$f = 1.896 \times 10^3 E^3 / (\rho_{\text{eq.}} t_k c) \quad (21)$$

また、放射光の全パワーは以下の式で表わせる。

$$P = 88.5 \left(\frac{E^4}{\rho_{\text{eq.}}}\right) eN \frac{1}{t_k} [\text{kW}] \quad (22)$$

リングの自然平衡エミッタンスは

$$\epsilon_{0x} = 1.4675 \times 10^{-6} E^2 \frac{\frac{(H)_B}{\rho_B} + \frac{(H)_w \eta \rho_B}{\rho_w}}{\left(1 + \frac{\eta \rho_B}{\rho_w}\right)(1-D)} \quad (23)$$

となる。(D ≈ 0)

$\langle H \rangle_B$  と  $\langle H \rangle_w$  は Courant-Snyder dispersion invariantで、それぞれ偏向磁石とウィグラー磁石内での下の式で表わされる量の平均である。

$$H \equiv \gamma \eta_x^2 + 2\alpha \eta_x \eta'_x + \beta \eta'^2_x \quad (24)$$

ここでの $\alpha, \beta, \gamma$ はツイスのパラメーターで、 $\eta$

はディスパージョン関数である。

$$\varepsilon_B = 1.4675 \times 10^{-6} E^2 \frac{\langle H \rangle_B}{\rho_B}, \quad (25)$$

$$\varepsilon_w = 1.4675 \times 10^{-6} E^2 \frac{\langle H \rangle_w}{\rho_w}, \quad (26)$$

$$p = \frac{\rho_w}{\rho_w + \eta \rho_B}. \quad (27)$$

とおくと、

$$\varepsilon_{0x} = p \varepsilon_B + (1-p) \varepsilon_w. \quad (28)$$

となる。

自然平衡エミッタンスは次ぎの不等式のどちらかを満足しなければならない。

$$\varepsilon_B \leq \varepsilon_{0x} \leq \varepsilon_w$$

$$\varepsilon_w \leq \varepsilon_{0x} \leq \varepsilon_B$$

ダンピングリングでは  $\varepsilon_{0x} \approx 10^{-9}$  radm なので、 $\varepsilon_w \leq \varepsilon_{0x} \leq \varepsilon_B$  の条件でリングを設計することになる。

ウィグラー磁石のピッチの長さを  $l_p$  として、ウィグラー磁石内の  $\beta_x$  の平均値を使うと、

$$\langle H \rangle_w = \langle \gamma^2 + \beta \eta'^2 \rangle \equiv \bar{\beta}_x \frac{l_p^2}{48 \rho_w^2} \quad (29)$$

$$\frac{\beta_x}{(1 + \alpha_x^2)^{\frac{1}{2}}} \gg 0.271 p$$

$$(1 + \alpha_x^2)^{\frac{1}{2}}$$

上の条件を満足させることは簡単であるから、

$$\varepsilon_w \approx 3.06 \times 10^{-8} E^2 \bar{\beta}_x l_p^2 / \rho_w^3 \quad (30)$$

と近似できる。

リングのモーメンタムコンパクション係数は次ぎの式で評価できる。

$$\alpha = (\alpha_{\text{arc}} L_{\text{arc}} + \alpha_w L_w) / L_R$$

ここで  $\alpha_{\text{arc}}, \alpha_w$  はアーク部及びウィグラー部のモーメンタムコンパクション係数である。

上と同様の近似で

$$\alpha_w = - \frac{l_p^2}{48 \rho_w^2}$$

になる。この値は非常に小さいのでリングのモーメンタムコンパクション係数はほとんどア

ーク部のモーメンタムコンパクション係数で決まる。

ウィグラーがある場合のビームのエネルギー巾は

$$\sigma_p^2 = 1.467 \times 10^{-6} E^2 \rho_{\text{eq}} \frac{\left( \frac{1}{\rho_B^2} + \frac{\eta}{\rho_w^2} \right)}{(2+D)} \quad (31)$$

( $D \approx 0$ )

となる。

ビームのバンチ長は次式によって与えられる。

$$\sigma_z = \frac{R \alpha}{v_s} \sigma_p \quad (32)$$

R: リングの平均半径

$v_s$ : シンクロトロンチューンで次式で与えられる。

$$v_s = \left( \frac{\alpha h e \hat{V} \cos \phi_0}{2\pi E} \right)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{\alpha h U (q^2 - 1)^{\frac{1}{2}}}{2\pi E} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (33)$$

$$\cos \phi_0 = \sqrt{1 - \frac{1}{q^2}}, q = \left( \frac{U}{e \hat{V}} \right)^{-1}$$

ここで、h: ハーモニクス数、 $\hat{V}$ : 加速電圧の最大値である。

よって、Longitudinal規格化エミッタンスは次ぎの比例関係を持つ。

$$\varepsilon_m = \gamma \sigma_p \sigma_z \propto \gamma^{\frac{3}{2}} \alpha^{\frac{1}{2}} \quad (34)$$

以下に重要な近似式を与えておく。

アーク部のディスパージョン関数

$$\eta_x \approx \frac{\beta_x'^2}{R'} \approx \frac{R'}{v_x^2} \quad (35)$$

$R'$ : アーク部の平均半径  $v_x$ : アーク部の水平方向のチューン

アーク部のモーメンタムコンパクション係数は

$$\alpha_{\text{arc}} \approx \frac{\beta_x}{R} \frac{\beta_x'}{R'} \approx \frac{1}{v_x} \frac{1}{v_x'} \quad (36)$$

Longitudinal Impedance Thresholdの式は

$$\left( \frac{Z}{n} \right)_t \leq \frac{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_z \left( \frac{E}{e} \right) \alpha \sigma_p^2}{ceN} \quad (37)$$

$$n = \frac{R}{\sigma_z}$$

である。

実際にリングを設計するときは、以上の関係式やパラメータ以外に Touscek life、Intrabeam Scattering、残留ガスとの弾性散乱や Bremsstrahlungなどを考慮してリングのパラメータを決める。決めたパラメータに従って、リングの Lattice を作り Optics を計算する。そして種々のシミュレーションを行なって問題が見つければ、もとのパラメータを変更して、同じことを繰り返してリングの設計を進める。

ダンピングリングのエネルギーの決定においては、種々の条件を考慮しなければならないが、エネルギーの下限は主に Intrabeam Scattering で決まる。

Touscek life や Longitudinal Impedance Threshold も考慮して最適なエネルギーを調べると、1.2 から 3.0 GeV の範囲になる。リニアコライダーのダンピングリングのエネルギーは種々の条件に従って信頼性の高い経済的なリング設計ができる最適値に決めなければならない。

リング内のバンチ当たりの粒子数は Longitudinal microwave instability (Turbulent bunch lengthening) によって制限される。Longitudinal microwave instability が起きる Longitudinal Threshold Impedance の値が高くなるように設計しなければならない。リングの Longitudinal Impedance を  $0.2\Omega$  以下にすることは不可能であると言われている。

ダンピングリングの規格化エミッタンスの垂直成分を数十 nradm 以下にするためにはカップリング (エミッタンス比) を小さくしなければならない。カップリングの原因として以下のものが考えられる。

1. 偏向マグネットの磁場に垂直成分がある場合または 4 極マグネットの中をビームが垂直方向にマグネットの軸からずれて動くとき、垂直方向にディスパージョンが発生する。このディスパージョンによって垂直エミッタンスが発生する。

2. 6 極マグネットの中をビームがマグネットの軸に対して垂直方向にずれた軌道上を動くか 6 極マグネットの軸が垂直方向にずれている場合、ディスパージョンの水平成分がある場所ではそのディスパージョンが垂直方向へ回り込んだりベータatron 運動が結合するた

めエミッタンスの水平成分が垂直方向へ回り込む。

3.4 極マグネットの回転誤差も上に述べた運動の結合を通じて、垂直方向のエミッタンスを増やす。

カップリングを  $\kappa$  とすると、それぞれのエミッタンスは以下ようになる。

$$\epsilon_x = \frac{1}{1 + \kappa} \epsilon_{0x} \quad (38)$$

$$\epsilon_y = \frac{\kappa}{1 + \kappa} \epsilon_{0x} \quad (39)$$

$\kappa$ : coupling constant (emittance ratio)

以上のことからマグネットのアラインメントを従来の加速器よりも 2 から 3 倍以上精度良く行わなければならない。1% 以下のカップリングは得られない。

これ以外に多くの設計上考慮すべき問題はあがるが、話が複雑になるので省略させていただく。

この節の締めくくりとして、ダンピングリングを建設する場合に要求される主な技術について以下に要約する。

1) 入射及び取り出し系のキッカー電磁石は高い繰り返しで動作して、立ち上がり及び立ち下がり時間ができるだけ短くて (60 nsec 以下)、Flat Top の時間が長い (~13 nsec) 台形磁場を発生しなければならない。また、ビームのふらつきを小さくしなければならないので、各 Element の安定度は普通のものより 10 倍以上必要である。

2) エミッタンスが放射光用低エミッタンスリングと比較して 1/10 以下になるため、アラインメント誤差やマグネットのフィールド誤差などがエミッタンス増加を引き起こすため、位置にして  $50\mu\text{m}$  以下の設置精度が要求される。

3) マルチバンチ運転を行なうので、Coupled bunch instability を十分に考慮した RF 系を製作しなければならない。

4)  $1\mu\text{m}$  以下の相対精度でビーム位置を測定しなければならない。

5) 磁場が高く (~2.0 T)、ピッチの短いウイグラーを多数精度良く製作しなければならない。

### 3. リニアコライダーのための研究及び技術開発

ビームエネルギー500GeV程度でルミノシティ $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ を得るには最終収束系で水平方向に約200nm,垂直方向に約2nmまでビームを絞って、反対方向からきたビームと実験装置内で衝突させなければならない。このような非常に困難なことを実現するためには、以下に示す研究及び技術開発が必要である。

1) 電子陽電子リニアコライダのパラメータに関する研究。コンピューターシミュレーションを使って最適なパラメータを求める研究。

2) 衝突点領域に関する研究。

ビームビーム相互作用に関する理論的研究。衝突点周辺のバックグラウンドの評価と実験装置の設計。

3) リニアックやダンピングリング内でのビームダイナミクス、大電流のマルチバンチや単バンチの不安定に関する理論的研究。

4) 最終収束系電磁石内でのビームダイナミクスに関する理論的研究。

最終収束磁石の開発研究。

5) 100MeV/mの高加速勾配が得られるリニアック加速管の製造に関する開発研究。

高加速電界発生に伴う加速空洞内での電界放出電子と加速管内壁表面処理に関する研究。

6) Xバンド大出力マイクロ波源の開発研究。

100MW級のXバンド大出力クライストロンの開発。電磁圧縮方式を利用したクライストロン用パルス電源の開発。RFパルス圧縮方式による大出力マイクロ波発生技術の開発研究。

7) ダンピングリングの開発研究

超低エミッタンスダンピングリングの設計。高安定短パルスキッカー、ウィグラー磁石、超高真空技術、低インピーダンスRF空洞の開発研究。

8) バンチコンプレッサーの設計。

9) ビームモニターの開発研究。

Sバンドリニアック、ダンピングリング、Xバンドリニアック、並びに衝突点周辺におけるビームモニターの開発研究。

10) 計算機制御系に関する研究開発。

システム設計、ネットワーク、マンマシーンインターフェース、光通信、システム信頼性、制御言語に関する研究、並びに低レベルRF

制御技術の開発研究。

11) アラインメントに関する研究開発。

リニアック、ダンピングリングのアラインメント、並びに最終収束系のアクティブフィードバックアラインメントに関する研究開発。

12) 電子陽電子源の開発研究。

レーザーを利用したRF電子銃、大電流陽電子ビーム発生装置の開発研究。

13) 加速器用施設の大深度地下利用。

加速器を大深度地下利用した場合の施設、並びに設備の設計。

#### 4. ATF計画の意義

電子陽電子リニアコライダを建設するには従来の加速器技術を1~2桁上回る技術が要求される。従って、Sバンド並びにXバンドリニアック、ダンピングリング、最終収束系等を使用される加速器構成部品は設計するだけでは評価出来ない。実際にこれらを試作して試験することで初めて開発の成果が確認出来る。ATF(試験加速器施設)はリニアコライダの全構成部品がシステムとして試験できる設備で、現在その一部分の建設がトリスタン日光実験室においてほぼ完成して、Sバンドリニアック加速管で85MeV/mのビーム加速に成功している。

ATF計画の加速器構成を図7に示す。熱電子線源、RF電子銃又は偏極電子線源から大強度単バンチビーム( $10^{11}$ 程度)又は1.4nsec間隔の10バンチビーム( $10^{10}$ 程度)を発生して、1.54GeV S-band Test Injectorで加速した後Damping Ringに入射する。電子ビームは放射減衰により水平方向及び垂直方向の規格化エミッタンスが $6.0 \times 10^{-6}\text{radm}$ 及び $3.0 \times 10^{-8}\text{radm}$ 以下になるまでリング内を回り取り出される。取り出された低エミッタンスビームは1.0GeV X-band Test Linac及び1.54GeV最終収束系Testシステムで使用される。また1.54GeV S-band Test入射器からのビームを使って陽電子発生標的のテストが行なわれる。

このATF最終収束系Testシステムで得られる垂直方向のビームサイズは30nmである。一方、JLC計画で要求される垂直方向のビームサイズは1.7nmである。我々が今達成できているビームサイズは数 $\mu\text{m}$ 程度であるので、中間段階の最終収束系TestとしてATF計画を実行することは

JLC計画を成功させる必須条件である。また、Damping Ring及びX-band Test Linacを使ったビーム試験は従来の加速器技術を1桁も上回る技術開発につながる。ATF計画で調べることのできないリニアコライダの重要な部分はビームビーム相互作用による衝突点周辺のバックグラウンドである。幸いビームビーム相互作用の研究は非常に進んでいて、コンピューターシミュレーションによってある程度正確に予測できるようになってきた。

## 5. おわりに

リニアコライダの設計は、種々のシミュレーションを行なってより確かなものにしていかなければならないが、多くの新しい領域の内容を含んでいるため、実際にATFのような試験加速器施設を建設して、ビームによる多くの試験を通じて改良を行なわなければならない。例えば、ダンピングリングの場合、垂直方向のエミッタンスは $\sim 5 \times 10^{-12}$  radm程度で、このような超低エミッタンスは種々の補正を行わない限り得られない。例え全てのエレメントを精度よく製作できても、リング全体として性能を十分に出せるかはリング全体の調整に非常に依存して

いる。また、最終収束系では数nmのビームを衝突させなければならないため、特殊なビーム光学系と高精度の位置設定システムが必要である。ATFでは30nmのビームを種々の調整を行なって作り、どのような問題があるか調べることになっている。実際にダンピングリングの性能及び最終収束系の性能が十分に発揮され30nmのビームを得られても、ビームの位置が変動すると十分なルミノシティは得られない。この次世代のリングと考えられるダンピングリングと最終収束系の試験施設を出来るだけ早く建設することは、加速器技術の進歩向上につながると同時に、日本に世界で最初の本格的なリニアコライダを実現することを早める。

リニアコライダを建設するには、従来の加速器技術を1~2桁も上回る技術が要求される。今までの大型加速器建設で得られた新しい技術を発展させ、ビームの超精密制御や加速管の精密加工及び超精密設置などの技術開発が伴ってリニアコライダは建設されることになる。この研究成果が他の自然科学や科学技術、更に産業界に及ぼす影響は計り知れないものがある。著者はリニアコライダが高エネルギー物理学の学問上のみならず、技術開発のうえでもフロンティアとしての役割を果たすと信じる。

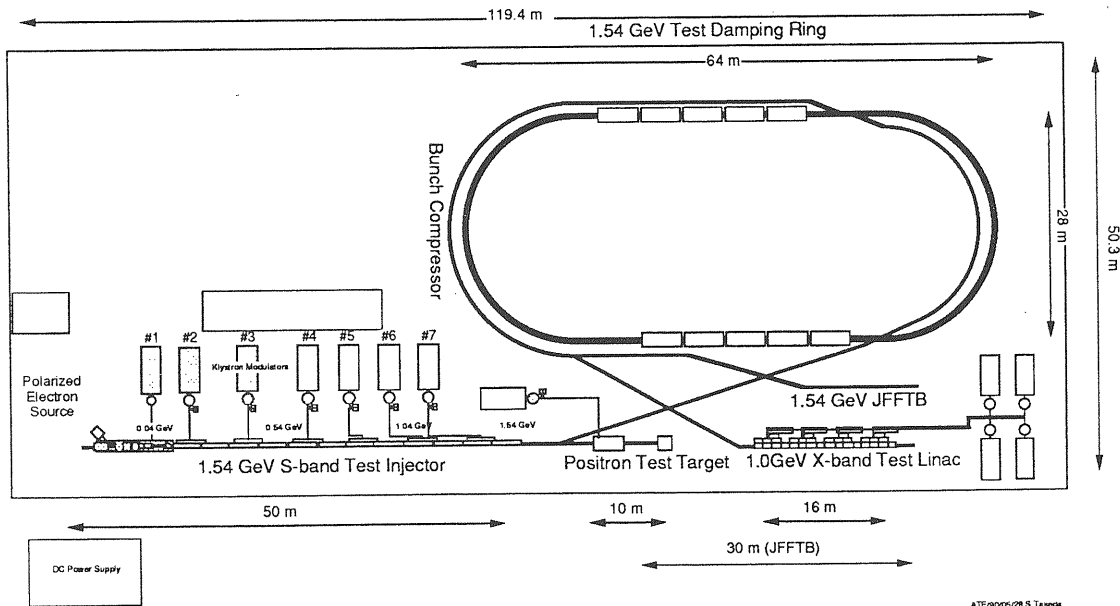


図 7 Layout of the ATF.

最後に、著者はリニアコライダーについてまだ浅い知識しか持っていないため内容を限定させていただいたが、説明で不十分なところあるいは誤ったところがあると思うので、その点についてはご容赦願いたい。本文を書くのに参考にした文献と多少意欲のある人のためにリニアコライダー全般（著者は一部分しか読んでいない）を説明した文献を上げておく。また、紹介したリニアコライダー計画の設計ルミノシティを練習問題として計算されることをお勧めする。Factor 2以内で一致した結果が得られるはずである。

- 15) P.B.Wilson, SLAC-PUB-3674, Oct. 1985
- 16) P.B.Wilson, SLAC-PUB-3985, May 1986
- 17) G.A.Loew, SLAC-PUB-4038, July 1986
- 18) P.B.Wilson, SLAC-PUB-4310, May 1987

#### 参考文献

- 1) 横谷馨、” トピックス：リニアコライダー” “OHO87”
- 2) 平松成範、” 新しい加速器” “OHO84”
- 3) “OHO88”
- 4) 高エネルギー物理学研究所将来計画検討資料(I) JLC, 竹田誠之、吉岡正和編集
- 5) Proceedings of the First Workshop on Japan Linear Collider(JLC), KEK Report 90-2 April 1990, Edited by S.Kawabata
- 6) Y.Kimura, Pro. European Particle Accelerator Conference (held at Nice, 1990)
- 7) Proceeding of the International Workshop on Next Generation Linear Colliders, LC88, SLAC-335, UC-28(M)
- 8) Proceedings of the Third Meeting on Physics at TeV Energy Scale, KEK Report 90-9 June 1990 H, Edited by K.Hidaka and C.S.Lim
- 9) 萩原薫、JLC(Japan Linear Collider)とTeV領域の物理
- 10) Proceeding of the International Workshop on Next Generation Linear Colliders, LC90 (held at KEK, 1990)
- 11) M.Bassetti, S.Guiducci, L.Palumbo, CLIC Note 60 15th April 1988
- 12) R.D.Ruth, Proceedings of the IEEE Particle Accelerator Conference, Accelerator Science and Technology, March, 20-23, Chicago
- 13) K.Oide, Physical Review Letters Vol.61 1713(1988)
- 14) R.B.Palmer, SLAC-PUB-4295, April 1987