

ABSTRACT

In order to construct a TeV linear collider in Japan in the next decade, several R & D programs have been started at KEK. In this paper those are outlined, and also tentative parameters are given for a (0.5+0.5) TeV collider with  $L=10^{33} \text{cm}^2 \text{sec}^{-1}$ .

1. はじめに

e+e-衝突の物理を重心系エネルギー  $E_{\text{CM}}$  で0.1~1 TeVまで押し進めるためにはリニアコライダ方式による加速器に頼らざるを得ないため、各国でその基礎研究が盛んになってきたが、ここではそのおおよその動向と日本における現状について紹介する。

リニアコライダーはe+e-各々を  $E_0 = E_{\text{CM}}/2$  まで加速する2本のリニアックを基本要素とするが、物理実験用としては衝突点での十分なルミノシティが要求されるために、強力なe+源、ビームエミッタンスを可能な限り小さくしてリニアックに送り込むためのダンピング・リング、衝突点直前のビーム収束系などもリニアックに劣らず重要である。

さてSLACでは単一のリニアックでe+e-両方を加速し、 $E_{\text{CM}}=0.1 \text{ TeV}$ を狙うや、変則的なリニアコライダー「SLC」がビーム調整の最終段階に入っている。これには上記のようなリニアコライダーとしての基本要素が全て含まれており、それらの性能如何がエネルギー、ルミノシティともにSLCのほゞ1桁上を狙う新しいリニアコライダーの設計に大きな影響を及ぼすことになるので、その成果が大いに注目されることである。

特にリニアックの加速方式については、近来様々な新しい考え（集団加速方式、レーザー加速、ウエイク場加速、逆FEL加速等々）が提案され実験も始められているが、何れも実用には程遠い段階にある。むしろ1TeV位まではほゞ従来通りの加速管にマイクロ波を供給してビーム加速を行う方式以外には差し当り良い案はない。ただ加速電界Gは、建設コストやビーム安定性への考慮から、 $G=0.1\sim 0.2 \text{ GV/m}$ と通常のリニアックに比べ1桁以上大きくなる。従ってマイクロ波源のピーク電力も莫大な値が要求されることになるが、ピーク電力と加速管断面積は比例するので、マイクロ波周波数はどうしてもXバンド以上にする必要がある。結局、Sバンドのものに比べて極めて小さい加速管で高電界を達成すること、そのための新しいマイクロ波源を開発することが最低解決すべき課題となる。

前者については必要な高電界が支えられる様な金属表面の加工、処理技術、加速能率の犠牲を最小限に止めながら横方向のウエイク場の発生が出来るだけ小さくなる加速管構造の探索が主な問題である。一方後者のマイクロ波源に付いては従来クライストロンを大電力化する方向が有力であるが、リニアックに沿って相対論的電子ビームラインを設置し各加速管に必要なマイクロ波電力を取り出すいわゆる2ビーム加速方式（TBA）も真剣に検討されている。リニアック全体としては横方向のエミッタンスの増加を極小に抑えるための $\mu\text{m}$ 以下の精度での加速管位置だしの技術やベータートロン波長を全体にわたって数m程度にする強力な収束磁石系なども並行して研究、開発しなければならない。

この様に従来のリニアックやストレージリングの技術を受け継ぐ形でのリニアコライダーも

きわめて多くの解決すべき問題点がありTeV級のコライダー建設までの道のりは甚だ長いと感じられるが、最近になってB(ボトム)中間子を大量に作るための加速器が要求され出し、中でも $E_{cm}=10\sim 11\text{GeV}$ の $e+e-$ リニアコライダーが有力な案として検討され始めた。エネルギーとしてはSLCの1/10であるが高ルミノシティが必要とされるところからTeV級のリニアコライダーと殆ど等しい技術が要求される。従ってTeV級のリニアコライダー建設の前段階としてこの様ないわゆるBファクトリーを作ることも非常に有意義であると考えられる。

## 2. 日本のリニアコライダー(JLC)の概要

JLCの素案としては高エネルギー物理学将来計画次期計画検討小委のワーキンググループで発表された木村案(1986年3月)が基になる。それは建設場所をKEK地下100mとし、KEKの受電容量300MWのうちの200MWを使って $E_{cm} 1\sim 2\text{ TeV}$ のリニアコライダーを作ろうとするもので、リニアックはKEKを中心に半径5Kmの円内に納めようとする。ルミノシティを $10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、リニアック周波数をXバンドにしたときのビーム及びリニアックについての諸パラメータが示されている。

この案に沿った一つの具体例 $E_0=1/2E_{cm}=0.5\text{ TeV}$ 、各ビーム当りのリニアック長 $L=3\text{Km}$ のコライダーでルミノシティ $L=1 \times 10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を実現するための主としてリニアックに関するパラメータを以下に求めてみよう。リニアックは毎秒 $f_r$ の繰り返しで運転され $N$ 個の $e+$ 又は $e-$ がたまつたr.m.s.半径 $\sigma_t$ 長さ $\sigma_z$ の円筒状のバンチが衝突するとそのルミノシティ $L_1$ は

$$L_1 = f_r N^2 H(D) / 4\pi \sigma_t^2$$

となる。ここで $H(D)$ は衝突時にローレンツ力で $e+$ と $e-$ が引き合つてバンチが収縮しルミノシティが増加する係数で、収縮の度合を表すパラメータ $D(=r_0 N \sigma_z / \gamma \sigma_t^2)$ 、 $r_0$ =電子古典半径  $2.82 \times 10^{-15}\text{m}$ )が1.5以上の広い範囲にわたり5~6の値をとることが計算機シミュレーションの結果分かっているので以下では $H(D)=5.7$ と仮定しておく。1回のリニアックのパルス中に $b$ 個のバンチが含まれていると全体のルミノシティは次のように書ける。

$$L = bL_1$$

加速管に所定の加速電界 $G=E_0/L$ を発生させるために必要なエネルギー $U$ は、 $G^2$ を単位長さ当りの電磁場エネルギー $u$ で割ったエラスタンス $s$ (W.R.Smytheの電磁気学の教科書を参照)あるいはマイクロ波の波長 $\lambda$ で $s_0=\lambda^2 s$ と規格化したパラメータを使って  $U=Lu=LG^2/s=L\lambda^2 G^2/s_0$ と書き表すと構造の異なる加速管を比較する上で都合がよい。リニアコライダーでは通常マイクロ波パルス長を加速管のフィリング・タイムに等しく設計するので、全体の平均マイクロ波電力は $f_r U$ となり、 $ac \rightarrow rf$ の変換効率 $\eta_{rf}$ 、構造効率 $\eta_s(=[1-\exp(-2\tau)]/2\tau)$ 、 $\tau$ :減衰定数)を使えば交流電力は

$$P_{ac} \sim f_r L \lambda^2 G^2 / \eta_{rf} \eta_s s_0$$

となる。ここで $L=3\text{Km}$ 、 $G=167\text{MV/m}$ 、 $P_{ac}=100\text{MW}$ の値について、 $\eta_{rf}=0.45$ 、 $\eta_s=0.55$ を仮定し $s_0$ としてSLACの構造の値 $0.7\text{ V}\cdot\text{m}/\text{pC}$ を採用すれば $f_r \lambda^2=0.21\text{m}^2\text{s}^{-1}$ が得られる。ピークマイクロ波電力は $\lambda^2$ に比例し短波長で小さくなるが、 $f_r$ にとっては逆に不利である。この場合たとえば $\lambda=3\text{cm}$ とすれば $f_r=233\text{Hz}$ となる。

次にバンチ当りの粒子数 $N$ を制限するものとして加速管中でのローディング及び衝突時の

beam-strahlungによるエネルギースペクトラム幅の増大がある。前者については、単一バンチ内の $(\Delta E/E)$ を2%まで許すとき、ビーム・ローディングパラメータ $\eta_b = eNs_0/G\lambda^2$ の上限は6.5%までとれ、マイクロ波の頂上からのバンチ位置のズレも $\sigma_z/\lambda = 0.02$ とすれば8%で済むことが計算されている (P.B.Wilson、SLAC-PUB-3674,1985)。すなわち $\lambda = 3\text{cm}$ 、 $\sigma_z = 0.6\text{mm}$ とすれば $N = 8.7 \times 10^{10}$  ( $eN = 1.4\text{nC}$ )となる。

最後に、衝突時のbeam-strahlungによる $\Delta E$ を抑えると衝突点でのバンチの横方向寸法 $\sigma_t$ が決まる。相手バンチのつくる磁場で放出する光子の $\hbar\omega_c$ が $E_0 = \gamma m_0 c^2$ より十分小さいとすると $(\Delta E/E_0) \sim 0.22 r_0^3 \gamma N^2 / \sigma_z \sigma_t^2$ であるので、これが30%まで実用的に許容しうるとすれば、上の $\sigma_z$ 、 $N$ の値を使って、 $\sigma_t = 0.45 \mu\text{m}$ が得られる。

従って、 $L_1 = 4.0 \times 10^{32} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ となるので $b = 3$ とすれば $L = 1.3 \times 10^{33} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ と所定の値が達成できる。又ビーム電力は $e^+$ 、 $e^-$ 各々4.9MWとなることが確かめられる。

ここで3Kmの長さの加速管中のバンチの横方向の振幅増大を見積ってみる。これには単一バンチ内のblow-upと多バンチのblow-upが考えられる。Chao、Richter、Yao (SLAC-PUB-2561, 1980) 及びYokoya (DESY-86-084, 1986)によれば単一バンチの前方部分が横方向ウエイク場を作って後方を乱す強さは

$$A = (6\pi)^{-1/2} \eta^{-1/6} \exp(3\sqrt{3} \eta^{1/3} / 4)$$

で与えられる。但し $\eta$ はウエイク場の強さを示す量で

$$\eta = r_0 N (1 + 2/\sqrt{3}) \sigma_z W_1 (L/k_0 \gamma_f) \ln(\gamma_f / \gamma_i)$$

$k_0$  : 平均の収束力 ( $\text{m}^{-1}$ )

$\gamma_i, \gamma_f$  : リニアック入口、出口での $\gamma$

となる。 $W_1$ はウエイク場の立ち上がりの強さでSLACの加速管では $1.7 \times 10^8 \text{m}^{-4}$ であるが、 $\lambda^4$ に比例するので $\lambda = 3\text{cm}$ では $W_1 = 2.6 \times 10^{10} \text{m}^{-4}$ となる。ここで $k_0 \sim 2\text{m}^{-1}$  (ベータトロン波長 $\sim 3\text{m}$ )ととると $\eta = 70$ 及び $A = 24$ が得られる。もし入射時に $x_0$ だけ中心からずれると出口では $x \sim x_0 A [\gamma_i / \gamma_f]^{1/2}$ だけblow-upするが、 $x$ は $\sigma_t$ より十分小さいことが望ましいので入射エネルギーを仮に2GeVととると $x_0 \ll 0.7 \mu\text{m}$ でなければならず、又入射角の誤差も $1.5 \mu\text{rad}$ よりも十分に小さくしなければならない。加速管のアライメントについても同様に評価すると、3Kmを100セクションに分けたときの各セクションの中心よりのズレはr.m.sで $1.3 \mu\text{m}$ より十分に小さくなければならない事が分かる。

多バンチの効果についての詳細はYokoyaの論文を参照されたいが、バンチ間隔が一定であれば横方向のウエイク場による影響は $\lambda = 3\text{cm}$ の場合Sバンドにくらべ150倍にもなるので $b = 3$ といえども偏向モードに十分の分散を作ったり、ベータトロン振動のランダウ減衰効果を期待しなければならないであろう。

### 3. 1987 SLAC/KEK ワークショップについて

TeV級のリニアコライダーに関するワークショップが今年3月にSLACで開催されたがその中で特にリニアック加速管構造及びRF源についての部会での動向を紹介する。P.B.WilsonがSLACの敷地に建設することを想定してまとめた $G = 170\text{MV/m}$ 、 $L = 1.75\text{Km}$ 又は $3\text{Km}$ 、マイクロ波周波数11.4

GHz (SLACの4倍) のリニアックの諸パラメータを出発点として議論が進められた。

まず構造に関しては、マイクロ波の短波長寄りに移るほど横方向のウェイク場が $\lambda^{-3}$ に比例して強くなることを懸念して、できるだけ滑らかな形状でなおかつ規格化エラストランス $s_0$ が小さくない加速管を探す努力がSLACでなされている。diskの形状を様々変えたもの、導波管をくねらせたphase-slip-structureやundulating waveguide structure(UWS)などが $Vg/c$ 、 $s_0$ 、aperture径(2a)等に関してSLAC  $2\pi/3$  disk loaded structure (DLS)と比較された。今のところDLS程の $s_0$ の大きい構造は見つからない様であるが、2aが大きく取れ、従ってウェイクも小さくなるであろうUWSに多少注目している様であった。

SLAC型加速管による高電界試験に関してはSLAC、KEK双方から実験結果が報告され、Fowler-Nordheimの電界放出の公式における電界のenhancement項 $\beta$ が120近辺で共に一致したことは面白い。

マイクロ波源に関しては通常のクライストロン方式も、TBA方式、レーザートロンやジャイロトロンなど新しい方式、そして出力パルスの圧縮や変調器と多岐にわたっている。クライストロンについてはM.A.AllenによるSLAC5045球の報告があり、67MWピークが安定に出ること、SLCの電子エネルギーが0.2%に納まる程安定に働いていることなどが紹介され、リニアコライダーに必要な0.1~1GW級のマイクロ波源も既存のクライストロン技術で不可能ではないという話ぶりであった。その続きにT.D.LeeによってSLACの3倍の周波数での30MW及び100MWのクライストロンの提案があった。特に前者は試作を開始していて、今秋にテストする予定である。加速管単位長当りに必要なピーク電力は $\lambda^{-1/2}$ に比例するが $\lambda=3\text{cm}$ においても $G=170\text{MV/m}$ を作るには1m毎に460MWのマイクロ波源が必要である。通常のクライストロンから短波長側でこれだけの出力を取り出すにはどうしてもビーム電圧が500KV~1MVになるであろう。そこでビームをシート状にしてパービアンスを上げるsheet beam klystronの案(K.R.Eppléy)、加速管2~3セル分と直結した小さいクライストロンの案(G.Loew)なども検討されている。

TBA方式についてはA.SesslerのグループやW.Schnellの間で長い議論があった。マイクロ波発生機の流儀の違いはともかくとして、そのためのビームをマイクロ波発生で失ったエネルギーを補いながら長距離にわたり安定にトランスポートすることがどの程度可能か未だ疑問に思う。ビームエネルギーを相当高くしない限り、ビーム径は太く従って出力空洞は高調波モードで動作することになる。従って少しでもビームに擾乱があると出力が大きく乱れることが予想される。しかしこういう相対論的ビームでクライストロン動作をさせるいわゆるrelativistic klystron (RK)にもSLACは大いに興味を示しており、ローレンスリバモア研究所の、1.5KVのビームによる11.4GHzでのRKテストを近々開始するようである。

レーザートロンは殆どKEKの独壇場であり次節に紹介する。ただこのワークショップにおいて、ロスアラモス研究所のCs-Sb系光電子面からの極めて低エミッタンスの大電流バンチ取り出し成功のニュースがW.Panofskyによりもたらされ注目された。ジャイロトロンに関してはV.L.Granatsteinの報告があったが、Maryland大での10GHzで30MW以上の出力を狙うジャイロクライストロンの製作の進み具合はもうひとつ速くはない様である。しかしこの方式でphase-lockがちゃんとかかかってきれいなマイクロ波が出るようになれば有望なRF源のひとつになるであろう。

出力パルスの圧縮はZ.D.Farkasが研究を進めている。クライストロンのピーク出力をパルス幅を圧縮することにより高める面白い案であるが、伝送線中の損失が十分低くできるかどうか

に成否がかかっている。M.A.Allenは、磁気圧縮法によりPFNのパルス幅をリニアコライダー用RF源にとっては十分な長さである $0.1\mu\text{s}$ 位まで縮め、その後パルスでMV近くまで電圧を上げてクライストロンを働かせる方式を検討中である。

最後にT.Weilandによる3D電界計算コード(MAFIA)の開発や、W.Hermansfeldtによる2.5D荷電ビーム解析コード(MASK)についての紹介があった。横ウエイクを小さくする構造や大出力RF源の開発には今後必ずこれらのコードが不可欠の道具となるであろう。

#### 4. 日本に於ける研究の現状

リニアコライダーのうち特にリニアック関係の研究は主にKEKが中心となって行われてきた。実験方面では、SLAC型Sバンド加速管を使い実際のリニアコライダーで使われる進行波モードで100MV/mの加速電界を実現したこと、レーザートロンによるSバンドマイクロ波出力テストでは80kWのレベルに達したことなどが主な成果である。理論方面ではYokoyaによってBBUの精密な理論が完成された。

今年度からはKEK内で開発計画用の予算が増額されたことにより、上記の研究の拡大継続を行うのみならず、新たにSLACより5045クライストロンを2本購入し、またそのための変調器の製作も始めた。特に5045を100MWピーク出力までテスト出来る様に変調器を設計している。これによってSバンドではあるが、かなりのピーク電力が得られるので実用的な長さの加速管で高加速電界試験が行えることを期待している。

この5045クライストロンシステムを順次増強することによって、10 m長で1GeV級のテストリニアックをここ3年を目途に建設することを、リニアコライダー開発過程での一里塚と考えている。これと並行してXバンドの加速管やRF源の開発も漸次発展させていく予定である。

この開発過程で特に問題としたいのは加速管表面からの電界放出である。現在のところ $\sim 100\text{MV/m}$ の加速電界が達成されたのはわずか20cm長の加速管についてであって。実用的な加速管になった場合、各disk表面から放出された電子がどういう相乗効果をもたらすか不明であるからである。特にXバンドに移行すると情勢は更に厳しくなるであろう。

RF源の開発は特に力を入れなければならない課題であって、差し当りはクライストロンの電子銃部を様々な角度からテスト出来る様なデマウントブル2極管の製作を計画している。それに加えて、SLACにおける5045管、30MWXバンドクライストロンなどの開発製造過程を実習することも予定しており、その技術をKEKに移植したいと考えている。

最後に計算機による3D電磁界計算や大電流ビームの計算もリニアコライダー設計開発に不可欠の手段であって自家薬籠中のものとしなければならない。空洞計算については既にSUPER-FISHを越えた3Dコードでの計算を開始しており、side coupled structureの結合穴を含めた電磁界など円筒対称性をもたない場合の計算が可能となって来た。大電力クライストロンや、ジャイロトロン等で大電流ビームとマイクロ波の相互作用を正確に把握するために、MASKコードを使いこなすための準備も開始している。従来方式を発展させた形としてのリニアックに限ってもこの様に困難な問題が山積しており、前途遑遠の感があるが、この新しい分野にリニアック研究者の多数の方々が大いに感心を寄せられることを期待している。