

R & D ON THE e^+e^- LINEAR COLLIDER IN TeV REGION

H. Matsumoto, I. Sato, Y. Fukushima, M. Iwata, T. Kamei, H. Mizuno, T. Matsuda, S. Noguchi,
K. Oide, T. Shidara, T. Shintake, K. Takada, K. Yokoya, Y. Yamazaki, *M. Mutou, *M. Yoshioka,
H. Kuroda, **N. Nakano, **H. Nishimura, *M. Miyao, ****S. Takeda and *****Y. Kato

National Laboratory for High Energy Physics

*The Institute for Nuclear Study, University of Tokyo

**The Institute for Solid State Physics, University of Tokyo

***Research Institute of Electronics, Shizuoka University

****The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

*****Institute of Laser Engineering, Osaka University

ABSTRACT

A research and a development on an e^+e^- collider machine have been started for high energy physics in the multi-TeV energy region. One possibility to achieve the TeV energy is to construct a linear collider, whose accelerating gradient is greater than 100 MeV/m. In order to realise such a high gradient, the pulsed rf sources with peak power on the order of 1GW are required. The rf power is much beyond the level which can be obtained by the conventional technique. Then the development of the high power rf sources is required.

1. 概説

W⁻, Z⁰の発見から、にわかに次世代の加速器計画の議論が世界的に活発になって来た。アメリカに於いては、既に $\sim 20\text{TeV} \times 20\text{TeV}$ PP(PP)Collider(SSC)の計画が認められ、その建設の為のR & Dが始められている。ヨーロッパに於いてもLEP トンネルを前提とする $\sim 10\text{TeV} \times 10\text{TeV}$ PP(PP)Collider(LHC)の計画が議論されている。日本では、こうした諸外国の状況の下にトリスタンの次世代の将来計画の議論が始められ、「高エネルギー委員会」の下に「将来計画小委員会」が発足した。そこでは現在、次世代の高エネルギー物理学の計画が議論されている。Linear Collider Study Groupは、こうした事実の下にPP(PP)Colliderとは物理の上で相補的と考えられるTeV領域の e^+e^- linear colliderの計画を考え、design studyを進めると共にRF sourceとしてLasertronを検討し、具体的にR & Dを進めて来た。今後そのR & Dの幅を広げ、更にしっかりしたものにする為に現在持ちうる知識に基づいて $1\text{TeV} \times 1\text{TeV}$ e^+e^- linear colliderのoverall designを試みた。本レポートの意図する所はstudy groupのメンバー自身の理解を深めてR & Dの見通しを付け、計画を練る事を目的としたもので、高エネルギー研究者への具体的プロポーザルを目的としたものではない。従って、完全なものからはほど遠く、今後そのデザインをupdateしていかねばならぬと考えている。デザインにあたっては、表1.に示す様なboundary conditionを設定した。

-
1. 今世紀中に1TeV×1TeVを実現する。
 2. 300GeV×300GeV程度のエネルギーから出発し、次第に上げて行くとする。
 3. 使用可能な電力は300MVA以下とする。
 4. 2つのLINACを含めた全長は30Km以下とする。
 5. 建設費は数千億円以下とする。
 6. Luminosityは $10^{33}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ を目標とする。
-

表 1.Design に於けるboundary condition

これらの諸条件は、現在の日本の高エネルギー物理学の研究者が比較的容易に認めうるものとする。本レポートでは紙面の関係上Acceleratorに関係した技術的問題について報告する。

2. Linear Collider の基本パラメーター

加速方式としては高出力パルスマイクロ波を進行波型加速管に供給する“Conventional”な方式を採用する。但し、ビーム加速電界は100MV/m以上で有る必要があり、その時のマイクロ波出力は1GW以上が必要である。SLC(SLAC)のそれが17MV/m,50MWで有り、加速電界で6倍以上、マイクロ波出力で200倍が必要であり、この点に於いても相当の技術開発を要する。加速管構造は、一般的に使用されているDisk Loaded型を高加速電界、効率を考慮に入れて、最適化したものを採る。現時点でこの方式に到るまでに、超伝導加速管も含めて種々のタイプについて検討したが現在の技術および、近い将来の実現等を考慮して、ここではこの方式で検討する事にした。勿論、一方に於いては斬新なアイデアに基いた新加速方式を研究し続ける努力をすべきで有る事は言を待たない。表2.にリニヤコライダの基本パラメーターを示す。

Energy	1TeV+1TeV
Luminosity	$0.2 \text{ to } 1.0 \times 10^{33}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$
Energy Spread	$\sigma_w/W = 12\% [W; \text{C.M.energy}]$
Total Length	20 Km to 25 Km
Total AC Power	300 MVA [100 MVA each linac]
RF Frequency	2856 MHz
Accelerating Gradient	100 MV/m
Number of RF Source	2828
Peak RF Power	2.4 GW/KLY
Repetition Rate	18 Hz
Number of Bunch	Max 84 bunch/pulse
Number of Electron	2×10^{10} electrons/bunch

表 2. リニヤコライダの基本パラメーター

3. Luminosity ξ と Beam Power P_b

ルミノシティ (ξ) は

$$\xi = \frac{N_b \cdot f_{rep} \cdot N_e^2}{4\pi \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y} \cdot P(D) \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 N_b ; 1パルス当たりのバンチ数、 f_{rep} ; パルス繰返し周波数、 N_e ; 1バンチ内の粒子数、 $\sigma_x \sigma_y$; 衝突点でのビームの断面寸法、 $P(D)$; ピンチ効果によるルミノシティの増加率である。ビームパワー $P_b = N_b f_{rep} N_e E_f$ を用いてルミノシティを書きかえると

$$\xi = 3.45 \times 10^{31} \cdot \frac{P_b \text{ (MW)} \cdot DP(D)}{\sigma_z \text{ (mm)}} \quad [\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}] \quad (2)$$

が得られる。今、ルミノシティ $\xi = 1 \times 10^{33}$ 、 $\sigma_z = 1 \text{ mm}$ 、 $DP(D) = 5$ とすると、必要なビームパワーは、 $P_b = 5.8 \text{ MW}$ である。図1. にビームパワー P_b をパラメータにした時のルミノシティと $DP(D)$ の関係を示す。ビームパワーが 6 MW の時、 $DP(D) = 4.65$ で 1×10^{33} のルミノシティが得られる事が分る。 1×10^{33} のルミノシティの時、ビームローディング η_{bl} をパラメータにした AC 電力 P_{ac} とピンチファクタ $DP(D)$ の関係を示す。

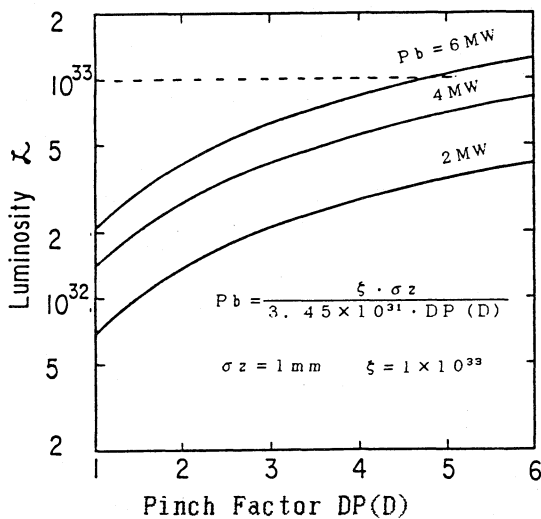


図 1. Pinch Effect と Luminosity

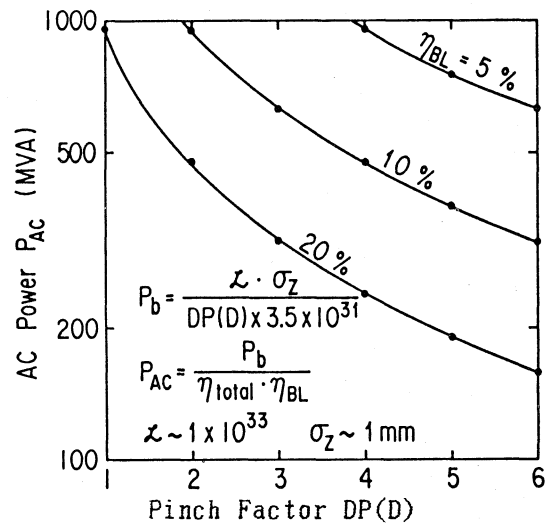


図 2. AC Power と Luminosity

図 2 の η_{total} は送電線から供給した AC 電力の何パーセントがビーム加速に利用出来たかを表す効率で表 3 に示すものである。ビームローディング $\eta_{bl} = 20\%$ の時、AC 電力 200 MVA

高電圧モジュレータ	(80 %)
クライストロン	(60 %)
Wave Guide	(90 %)
Structuer Efficiency	(70 %)
$\eta_{total} \sim$ Total Efficiency	(30 %)

表 3. 電力効率

VA でビームエネルギー $1 \text{ TeV} + 1 \text{ TeV}$ 、ルミノシティが 1×10^{33} が得られる事が分る。

これから η_{bl} は大きいほうが AC 電力が小さくて良い事が分るがライナック特有のビーム不安定性 (Transverse WakeField, BBU) があり、 η_{bl} の具体的な数値は Beam Simulation によって決定しなければならない。

3.2. ビーム電荷量 (q) と角周波数 (ω)

1パルスの電荷量 (q) は

$$q \text{ (nC)} = 1000 \cdot \frac{P_b \text{ (MW)}}{f_{\text{rep}} \text{ (Hz)} \cdot E \text{ (TeV)}} \quad (3)$$

で求められる。ここで f_{rep} ; パルスの繰返周波数、 E (TeV); ビーム最終エネルギーである。一方、 q (nC) とビームローディング (η_{bl}) の関係は (注1)

$$\eta_{\text{bl}} = \omega \cdot \left(\frac{r}{Q_0} \right) \cdot \frac{q}{E a} \quad (4)$$

[r ; Shunt Impedance (Mchm/m), Q_0 ; Quality Factor]

である。 r 、 Q_0 の周波数依存性は夫々 $\omega^{1/2}$ 、 $\omega^{-1/2}$ であるから η_{bl} は ω^2 に比例し

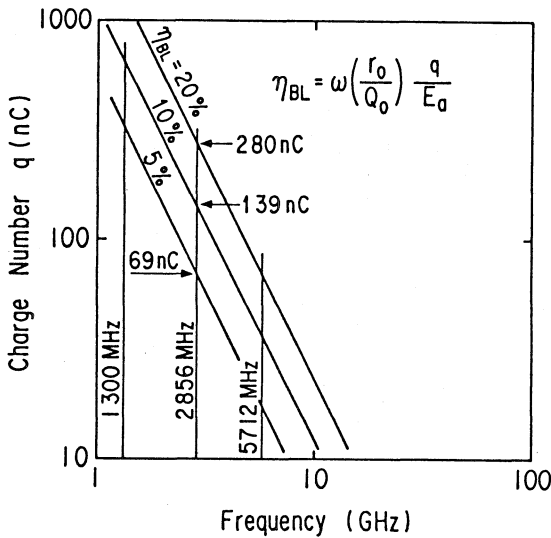


図 3. 電荷量 / 1パルス

ている。 η_{bl} をパラメータにした電荷量と周波数の関係を図3に示す。ここでは、加速電界 $E a$ は立地条件 (10Km+10Km) から $E a = 100$ (MV/m)、 $r / Q_0 = 4$ (KΩ / m) である。

周波数が2856 MHz、 $\eta_{\text{bl}} = 20\%$ の場合、 $\xi = 1 \times 10^{33}$ を得るには $q = 280$ nC が必要である。

衝突点でのエネルギーブレッド ($\Delta E / E$) の関係から1バンチの電荷量は ≤ 3.3 nC に限定される。従って、マルチバンチにし、衝突点のDetectorの大きさを3mとすると10nsecのバンチ間隔が必要である。1パルス84バンチの場合、パルス幅は840nsec である。

4. 加速管

4.1. Attenuation Constant τ の選択

τ は図4. に示すように加速管の利用効率等を特性づける最も重要なパラメータで次のように表される。

P_0 、 P_l は夫々加速管の入口のパワー、加速管の出口に残ったパワーで、 $(P_0 / P_l) = \exp(-2\tau)$ である。これから τ は

$$P_0 \quad \quad \quad P_l \\ \downarrow z=0 \quad \quad \quad z=l \uparrow$$

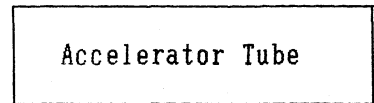


図4. Attenuation Constant τ

$$\tau = -\frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{P_l}{P_0} \right) = -\frac{1}{2} \cdot \ln \left(1 - \frac{\omega}{v g \cdot Q_0} \cdot l_{\text{acc}} \right) \quad (5)$$

と書き直せる。Constant Gradient ($E a = \text{constant}$) の加速管では、 τ が決まれば $E a = \text{constant}$ にする $v g$ が決まり、同時に加速管長 l_{acc} が決定される。最終エネルギーを1TeV + 1TeV、加速勾配 $E a = 100$ MV/m とした時、必要とされるクライストロン出力 P_0 と AC 電力を $v g$ をパラメータにして τ との関係を示す。図5、図6に示す。

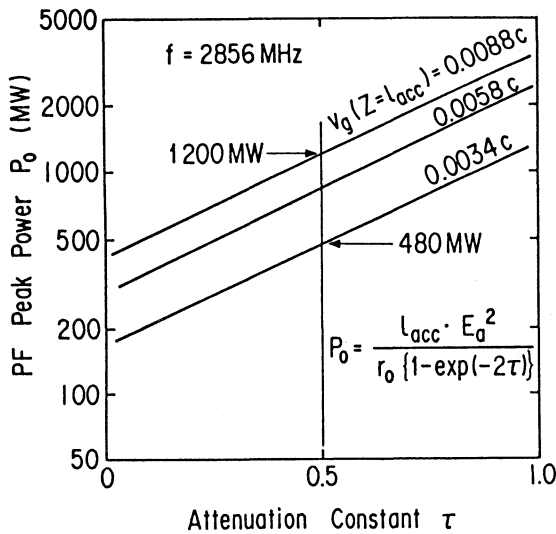


図 5. RFパワーと τ の関係

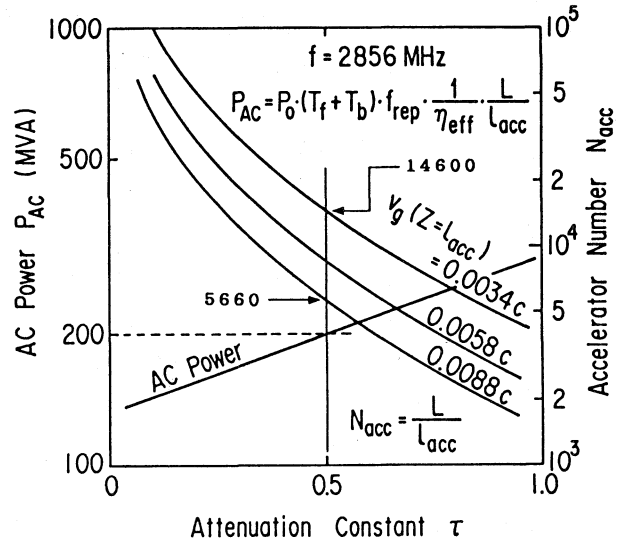


図 6. AC電力と τ の関係

図6 から AC 電力 200MW 以内にするには、 $\tau \leq 0.5$ であることが分る。又、 $\tau = 0.5$ の場合、 $v_g(z = \ell_{acc}) = 0.0034c \sim 0.0088c$ に於いて、クライストロンパワー $P_0 = 480\text{MW} \sim 1200\text{MW}$ 、加速管本数 = 5660 ~ 14600 本の選択が可能である。

4.2. Structure Parameter

1TeV+1TeV, $\xi = 1 \times 10^{33}$, $L = 20\text{Km}$, AC 電力 = 200MW を満足するパラメーターは表4に示すものが得られた。この事から、通常のディスクロード定電界型加速管でクライストロンの出力が得られれば、十分に可能性がある結論出来る。

< Accelerating Structure >

Frequency	f (MHz)	2856	2856	5712	5712
Group Velocity	v_g/c	0.0108	0.0153	0.0308	0.0436
Quality Factor	Q	14000	14000	9900	9900
Shunt Impedance	r (Mohm/m)	57	57	81	81
Unit Length	l (m)	2.3	3.5	2.3	3.5
Filling Time	Tf (usec)	780	780	280	280
Attenuation Constant	τ	0.5	0.5	0.5	0.5
Structure Efficiency	η	0.63	0.63	0.63	0.63
Beam-hole Diameter	z=0 (mm)	23.5	25.8	14.8	16.2
	z= ℓ_{acc} (mm)	18.0	20.0	9.0	10.0
Tube Number		8580	5656	8580	5656

< RF Source >

Klystron Peak Power	P_0 (MW)	800	1200	570	860
Pulse Length	Tf+Tb (usec)	1.6	1.6	0.49	0.49
Repetition Rate	frep (Hz)	18	18	72	72
Klystron Number		8580	5656	8580	5656
AC Power	P_{ac} (MVA)	200	200	200	200

表4 加速管パラメーター

参考文献 Linear Collider Study Group, 「 e^+e^- リニアコライダー調査報告書」, 1985/03/25