

欧米に於ける巨大電子線形加速器

高エネルギー物理学研究所 佐藤 勇

放射光施設の建設が始まる直前の今年1月末から約2ヶ月間、スタンフォード電子線形加速器を中心に欧米の大型電子線形加速器を調査する機会に恵まれたので、各々の研究所を訪問した際の加速器に共通した話題や、それぞれの研究所で受けた印象的な見聞や、大型電子線形加速器に特有な幾つかの問題点、等を取り上げて記述して見たいと思います。

電子線形加速器は、サイクロトロン等の他の加速器より遅れて開発されたが、現在では最も popular な加速器として、色々な分野で活やくしている。例えば、工業用電子線形加速器 ($< 10 \text{ MeV}$) では、主として X 線の発生装置として、数多く使用され、その数は数千台に達して居る。電子線形加速器が、この様に、他の加速器をその数で圧倒しているのは、(i) 加速器の構造が非常に簡単である、(ii) イオン源が手軽に制作出来る、(iii) 投入電力に対する束力ビーム電力が大きい、(iv) 加速電界が大きいので手軽に数 MeV のエネルギーが得られる、等の理由に依るものである。

在界中に散在する電子線形加速器を使用目的別に分類して見たい。最近では、放射化学、結晶分光学、原子炉パルス動作、中性子発生源等に、非常に短いピコ秒のパルス中のビームで、数ナアンペアのビーム電流が使用される様になった。この種類の加速器を Table 1、に表示してある。Table 2 には、原子核実験のために制作された Conventional な低エネルギー電子線形加速器を列記した。この表は、電子線形加速器の失敗例と成功例とが厂史的事実として列記してある。

Table 3 は、原子核実験と素粒子実験のために制作された、中エネルギーの電子線形加速器を表しているもので、このエネルギー領域になると、Multi-Section の Beam Blow up 対策を行った加速器と、そうでなかった加速器との間に、ビーム電流に大きな差が出て来ている。

中エネルギーの電子線形加速器でも、high duty cycle machine になると、加速器

の parameter も大きく変わってくる。例えば、現在建設中の I K O の machine は、 τ の pulse 幅が $45 \mu\text{sec}$ 、繰り返し周波数が 2000 pps で、duty cycle が 8% に設計され、平均電流は $500 \mu\text{A}$ にも達している。

Table 1 : Selected list of recent electron linacs used for specialized applications

Institution Manufacturer and Year of Installation	Application	Energy Length Number and Type of Sections Frequency Number and Type of Power Sources	Maximum Beam Duty Cycle Peak Current	Noteworthy features
Argonne National Laboratory Chicago, USA ARCO 1970	Radiation- chemistry Photoneutron physics	10-22 MeV 5.81 m 2 TW 2 klystrons 20 MW 1300.7 Mhz	1.5×10^{-3} 2.5 A for $10 \mu\text{sec}$	Very short high current pulses Very low attenuation length = 0.11 Subharmonic bunching
BAM-Berlin, Germany Radiation Dynamics 1973	γ -activation -analysis Neutron-radiography Radiation protection	4-36 MeV 5.00 m 2 TW 1 klystron 20 MW 2856 Mhz	1.2×10^{-3} 450mA for $3.2 \mu\text{sec}$	Flexible repetition rate between 12.5 and 300 pps
Euratom, Geel. Belgium CGR/under construction	Neutron production for reactor research	100-150 MeV 15.0 m 1 SW, 2 TW 3 klystrons 13-18 MW 2998 Mhz	2.0×10^{-3} 220mA for $2 \mu\text{sec}$ 9 A for 5 nsec	flexible repetition rate between 250 and 900 pps Very short high current pulses
National Physical Laboratory. Teddington. GB Radiation Dynamics 1975	Radiation metrology	10-22 MeV 2.00 m 2 TW 1 klystron 20 MW 2856 Mhz	0.7×10^{-3} 700mA for $3 \mu\text{sec}$ 5 A for 5nsec	Flexible repetition rate (1-480 pps) Very short high current pulses
RISO, Roskilde. Denmark Haimson Research Corp. 1976	Radiation research	4.5-15 MeV 1.60 m 1 TW 1 klystron 20 MW 2856 Mhz	0.8×10^{-3} 1.5 A for $4 \mu\text{sec}$ 1.5 A for 10nsec	Flexible repetition rate (1-200 pps) very short high current pulses Very low attenuation = 0.128 nepers Special H.v. tetrode with 250 KV between cathode and anode 5% spectrum for 1.1 A 80% conversion efficiency
Tokyo University Tokai Japan Mitsubishi Denki Corp. 1977	Radiation chemistry Neutron production for reactor research	25-38 MeV 4 m 2 TW 2 klystrons 10 MW 2856 Mhz	0.9×10^{-3} 230mA for $4.5 \mu\text{sec}$ 2 A for 10nsec 70 A for single bunching	Flexible repetition rate (1-200 pps) Very short high current pulses Subharmonic bunching

Table 2: Conventional low energy electron linacs for nuclear physics

Institution	Maximum Energy. Maximum Peak Current. Total Accelerating Length.	Beam pulse length. Peperition rate. Beam duty Cycle. Number and Peak Power of klystrons.	Special features
Cetro Atomico Bariloche, Argentina	25 MeV 300 mA 3 m	1.2 μ sec 200 pps ⁻⁴ 2.4×10^{-4} 1 / 15 MW	
U. of Glasgow, UK	30 MeV 500 mA 3.5 m	3.5 μ sec 240 pps ⁻⁴ 8.4×10^{-4} 1 / 25 MW	
RTI, Moscow, USSR	30 MeV 10 A 8 m	0.01 usec 2400 pps ⁻⁵ 2.5×10^{-5} 1 / 30 MW	Nanosecond high current pulses
CBPF, Rio de Janeiro, Brazil	30 MeV 100 mA 10 m	3.3 μ sec 360 pps ⁻³ 1.0×10^{-3} 2 / ?	1 Amplitron, 1 Klystron
NRC, Ottawa, Canada	35 MeV 250 mA 8 m	3.2 μ sec 180 pps ⁻⁴ 6×10^{-4} 1 / 20 MW	
IDF, Sao Paolo, Brazil	50 MeV 10 mA 6 m	1.0 μ sec 120 pps ⁻⁴ 1.0×10^{-4} 2 / 21 MW	
Harwell, UK	55 MeV 500 mA 20 m	2.0 μ sec 200 pps ⁻⁴ 4×10^{-4} 7 / 8 MW	
RTI, Moscow, USSR	60 MeV 1000 mA 20 m	5.5 μ sec 50 pps ⁻⁴ 2.7×10^{-4} 6 / 25 MW	Long high current pulses
IFK, Giessen, Germany	65 Mev 400 mA 8 m	2.0 μ sec 250 pps ⁻⁴ 5.0×10^{-4} 1 / 30 MW	e ⁺ source under constructi -on
IFK, Darmstadt, Germany	70 eV 60 mA 6.6 m	5.0 μ sec 150 pps ⁻⁴ 7.5×10^{-4} 1 / 22 MW	Energy loss spectrometer
Yale University USA	70 MeV 750 mA 15 m	4.5 μ sec 200 pps ⁻⁴ 9.0×10^{-4} 5 / 10 MW	L-band, can generate short 10 A pulses
LVK, Gent, Gelgium	90 MeV 400 mA 6 m	3 μ sec 300 pps ⁻⁴ 9×10^{-4} 2 / 22 MW	BBU at 400 mA, 3 usec e ⁺ source under construct -ion

Table 3: Conventional medium energy electron linacs for nuclear physics

Institution	Maximum Energy Maximum Peak Current Total Accelerating Length	Beam pulsed length Repetition rate Beam duty cycle Number and Peak Power of Klystrons	Special features
NPGS, Monterey USA	110 MeV 25 mA 9 m	1 μ sec 60 pps ⁻⁵ 6×10^{-5} 3 / 20 MW	
U. of Glasgow UK	130 MeV 300 mA 18 m	3.5 μ sec 240 pps ⁻⁴ 8.4×10^{-4} 3 / 25 MW	BBU at 300 mA 3.5 μ sec E.C.S. under Construction
Harwell UK	136 MeV 1000 mA 24 cm	5 μ sec 300 pps ⁻³ 1.5×10^{-3} 8 / 20 MW	L.-Bnad
NBS, Washington USA	150 MeV 350 mA 30 m	5 μ sec 360 pps ⁻³ 1.8×10^{-3} 12 / 5 MW	L-Band BBU at 200 mA; 5 μ sec can generate short 5 A pulses
Oak Ridge USA	178 MeV 20 A 16.5 m	0.024 μ sec 1000 pps ⁻⁵ 2.4×10^{-5} 4 / 30 MW	L-Bnad Nanosecond high current pulses
JAERI, Tokai Japan	190 MeV 350 mA 13 m	3 μ sec 300 pps ⁻⁴ 9×10^{-4} 5 / 20 MW	
KhFTI, Kharkov USSR	280 MeV 15 mA 48 m	1.5 μ sec 50 pps ⁻⁵ 7.5×10^{-5} 11. / 14 MW	
U. of Saskatchewan Canada	280 MeV 300 mA 20 m	1 μ sec 360 pps ⁻⁴ 3.6×10^{-4} 6 / 22 MW	Pulsed stretcher "EROS" proposed.
IKK, Mainz Germany	350 MeV 250 mA ~40 m	4 μ sec 150 pps ⁻⁴ 6×10^{-4} 8 / 23 MW	E.C.S.
U. of Tohoku Sendai, Japan	380 MeV 120 mA 54 m	3 μ sec 300 pps ⁻⁴ 9×10^{-4} 5 / 20 MW	BBU at 35 mA 3 μ sec, E.C.S.
HEPL, Stanford	1200 MeV 30 mA 93 m	1.3 μ sec 120 pps ⁻⁴ 1.6×10^{-4} 31 / 20 MW	No longer operable at maximum energy
KhFTI, Kharkov USSR	1500 MeV 25 mA 225 m	1.5 μ sec 50 pps ⁻⁵ 7.5×10^{-5} 51 / 14 MW	e ⁺ source in existence polarized electron source under construction. Overall improvement plan under consideration.

Table 4: Comparison of main parameters of medium energy high duty cycle machines

Institution	Maximum Energy Maximum Peak Current Energy Spectrum Accelerator length	Beam pulse length Repetition rate Beam duty Cycle Number and Peak Power of Klystrons	output emittance
SACLAY	600 MeV 42 mA 370 μ A (AV) $\frac{\Delta E}{E} = 0.1\%$ (5 mA) 170 m	20 μ sec 3000 pps 1% at 600 MeV 2% at 420 MeV 15 / 4 MW	90% of current within $0.01\pi \left(\frac{\text{MeV}}{C}\right)\text{cm}$
MIT BATES	430 MeV 25 mA 250 μ A (AV) $\frac{\Delta E}{E} = 0.3\%$ (80% of current) 153 m	13 μ sec 5000 pps 1.8% at 430 MeV 5.6% at 200 MeV 10 / 4 MW	90% of current within $0.0006\pi \left(\frac{\text{MeV}}{V}\right)\text{cm}$
IKO MEA (under construction)	500 MeV 20 mA 500 μ A (AV) $\frac{\Delta E}{E} = 0.3\%$ (50% of current) 180 m	45 μ sec 2000 pps 2% for 400~500 MeV 4% for 250~400 MeV 8% for 200~250 MeV 12 / 4 MW	90% of current within $0.006\pi \left(\frac{\text{MeV}}{C}\right)\text{cm}$

次に、電子シンクロトロンの入射器として制作された、電子線形加速器を、Table 5 に列記した。電子線形加速器は、陽電子の発生と、その加速に非常に都合がよいので、陽電子入射器として大型加速器が使用される様になって来た。その例として DESY の 500 MeV の入射器がある。又、Table 6 には、陽電子と電子との colliding beam 加速器の入射器を、列記した。Table 7 には、大型線形加速器の特性表を示めてある。

大型加速器に於ける共通話題は、(i) Beam blow up 対策、(ii) 熟練を必要としない運転方法の確立、(iii) Start up の迅速化 (iv) 故障時に於ける speedy な回復方法等であった。(ii)~(iv) は、計算機の駆使によって解決する方向であり、Beam blow up はビーム集束系の強化で解決する方向で進められていた。

SLAC に於けるエネルギー増強の方法については、大変興味深いものがあった。特に 40 MW の Klystron の開発から製作までと、SLED のための cavity の製作を、同研究所内の一貫した作業で行っていた。

最近では、cavity を使った TM₁₂₀ mode の position monitor が使用されて

Table 5: Conventional electron linacs for synchrotron injector

Machine and location	Energy Beam current Emittance.	Beam pulse length Repetition rate Number and Peak power of Klystrons	Construction Synchrotron energy (max.) pulse width Internal Beam Total Accelerator staff
U. of Tokyo INS Tanashi, Japan	15 MeV 200 mA 8 mm·mrad 2 m	1 μsec 21.5 pps 1 / 7 MW	1961 1.3 GeV 4 msec ¹¹ 4 × 10 ¹¹ part/sec 14 person
Bonn 2.5 GeV Synchrotron Bonn Germany	25 MeV 250 mA 3 mm·mrad	1 μsec 50 pps	1967 2.5 GeV (300 mA) 1 msec ¹² 5 × 10 ¹² part/sec 19 person
NINA Daresbury UK	43 MeV 500 mA 3.2 mm·mrad	0.73 sec 53 pps	1966 5.2 GeV 3 msec 1.2 × 10 ¹³ part/sec 110 (inc. exp area)
DESY Hamburg Germany	500 MeV 200 mA (125 mA at 500MHz modulation) 2 π mm·mrad 5.0 m	.3 μsec 50 pps constant G (2π/3) 12 / 24 MW	1964 7.5 GeV 3.1 msec 2.5 × 10 ¹³ part/sec 80
Cornell 12 GeV E.S. Ithaca, N.Y. USA	150 MeV 100 mA 0.16 mm·mrad	2.5 μsec 60 pps	1967 12.2 GeV 2 msec ¹² 6 × 10 ¹² 45

Table 6: Performance characteristics of the present e[±] linac injectors for colliding beam facilities

Machine and location	Energy of e ⁻ incident on e ⁺ target e ⁻ beam power incident on target while injecting	Target material Nanoamps of e ⁺ within ΔE/E ≈ 1 % per KW of incident e ⁻ beam	Energy of e ⁺ at output of linac
ADONE Frascati	80 MeV <1 kW	copper 9.4	380 MeV
DESY-DORIS Hamburg	320 MeV ~1 kW	tungsten 15	320 MeV
DCI Orsay	~1 GeV <1 kW	tungsten 7.1	1.2 GeV (max.)
SLAC-SPEAR Stanford	~6 GeV <1 kW	tungsten- phenium 11.1	2.5 GeV (max.)
ALS Saclay	85 MeV 3 kW	gold 13.4	~500 MeV

Table 7: Performance characteristics of the recent linacs for high energy physics

Name of Machine Institution Location	Maximum Energy Maximum Peak Current Type and Field mode Accelerating length	Beam pulse length Repetition rate Buty Factor Frequency Number and peak of Klystrons	Construction date Total Accelerator Staff
Mark III HEPL of Stanford Univ. Stanford USA	1.2 GeV 3.2 mA C.G. ($2/3\pi$) 31×3.0 m	1.3 sec 120 1.6×10^{-4} 2856 MHz 31 / 20 MW	1964 Mark III in process of phasing out; Staff and operating budget minimal
Orsay E.L.A. Accelérateur Linéaire Orsay France	2.3 GeV 100 mA Tapered ($\pi/2$) ($1+38$) \times 6 m	1.5 sec 50 8×10^{-5} 2999 MHz 39 / 20 \sim 25 MW	1959 energy increase (1969) 50 person
SLAC Stanford USA	29.5 GeV by SLED at March 1978 22.3 GeV 80 mA C.G. ($2/3\pi$) 960×3.05 m	1.6 μ sec 360 6×10^{-4} 2856 MHz 244 / 21 \sim 38.5 MW	1962 1093 person

位置の精度は $10 \mu\text{m}$ の分解能がある様になった。これによって、加速管の中心を、ビームが正確に通す事が可能になり、特に大型線形加速器のBBU対策に福音をもたらすであろうと思われる。又、CERNでは、このMonitorをAnti protonのBeam Coolingのための減速空洞(横方向の運動量)と検出器に用いようとしてゐる。