

KEK前段加速器のビーム負荷効果

福本真義, 高野 進, 高木 昭, 坂上敬明, 伊藤 清, 久保田親
高エネルギー物理学研究所 (KEK)

1970年代の線形陽子加速器の特徴は、ビーム強度の増加に伴って *loading* に対する対策がなされていることである。そしてこの *loading* 対策は、線形陽子加速器の電子銃に相当する前段加速器にもほぼこされている。KEKの前段加速器は大気型の Cockcroft-Walton 加速器である。前段加速器には、ソビエトでパルス変圧器が、フランスの Saturne で加圧型 Cockcroft 加速器が、Berkeleyの Super HILACに加圧型ダイナミトロンが使われているけれども、これらはむしろ例外で、一般には実用上の限界に近い750 kVの大気型 Cockcroft 加速器が、米国のBNL, ANL, FNAL, LAMPF, LBL, ヨーロッパのCERN, RHEIで使われている¹⁾。

陽子シンクロトロンへ入射されるビームは、パルス中が数 μ s ~ 100 μ s と短かく、ビーム電流は100 mA以上と大きく、*emittance* が小さくなければならぬ。*duty factor* は 10^{-3} 以下と小さいので、前段加速器として先ず考えられることは、適当なコンデンサーを高圧電源で充電して、これをパルスビームの電源とすることである。この場合コンデンサーの容量を大きくすれば、*beam loading* を減らすことができるはずである。しかしながらこの方法は、加速管内で放電が起きたとき、電極が損傷されるので採用できない。イオン源の進歩により、前段加速器のビーム強度は、現在では電子銃同様に空間電荷制限で決められている。しかしイオンに対しては、電子銃のように電子放出面を大きくして *high perveance* にするのは難かしいので、加速ギャップをできるだけ短かくしてあり、例えば現在KEKでは18cmのギャップに750 kVをかけている。その結果、電極面での放電は必ず起るので、電極の損傷をさけるためコンデンサーの容量をできるだけ小さくしなければならない。これは静電加速器一般にあてはまることで、例へばバンデグラーフ加速器でも浮遊容量をできるだけ減らす構造に設計される。

KEK Cockcroft 装置は約10年前の素研準備室時代に、東京大学原子核研究所に設置され、加速管の電圧試験に使われていたが、1971年、KEKの発足に伴って筑波へ移設された(図1)。図2に示すように Cockcroft 装置の押上げカラムと平滑カラムの他にもうひとつコンデンサー塔をもち、500 k Ω の抵抗により接続してリップル低減をはかるとともに、小さな容量のコンデンサー塔で *beam loading* が打消せるように、*bouncer* と稱する出力50 kVの *hard tube pulser* をこのコンデンサーの低圧側電極に接続して、イオン源からのビーム取り出しに同期して、*bouncer* を動作させた。このコンデンサーの高圧側電極を高圧ターミナル(HVT)経由で加速管に直結すれば、前述のように放電により電極が損傷されることは勿論、Cockcroft 装置のセレン整流器もこわれるので、Cockcroft 装置とHVT間に放電電流を制限するために高抵抗をいれた。加速管は組立て直後やイオン源陰極交換などで1気圧にさらしたあとでは、放電を繰返しながら徐々に

耐電圧を上げてゆく *conditioning* が必要なので、この時に電極と整流器を守るためには、Cockcroft 装置と HVT 間の抵抗は大きいことが望ましい。一方この抵抗が大きいと *bouncer* による *beam loading* の打消しが充分行われなくなる。この抵抗は長さ約 2.5 m で、床面から 6 m の所にあるため交換が容易でない。そこで外側をパイプ状の 400 M Ω 、内側を4分割の 400 k Ω の2重構造として毎週の運転開始時に 400 M Ω で *conditioning* をやり、次に HVT の中から 400 k Ω の抵抗を入れてビーム加速をした。

イオン源の改善によりビーム強度が増加したので、*beam loading* の打消しを大きくするため、400 k Ω を 200 k Ω まで減少させた。しかしビーム加速中でも時々放電が起り、その際平滑カラムとコンデンサ塔の間に入れた 500 k Ω の抵抗のスパークギャップも放電するので、整流器がこわれる恐れがでてきた。そこで図2のように 1000 pF のコンデンサ塔を新設して HVT と接続し、*bouncer* をこちらに移した。そして Cockcroft 装置と HVT 間の抵抗を 10 M Ω に固定して加速管放電時の整流器の電流を制限すると共に、毎週の運転毎に 400 M Ω と 200 k Ω の交換をしなくてもよいようにした。*bouncer* と新しいコンデンサ塔の間には、50 k Ω を入れた。これは以前の 200 k Ω に相当するもので、現在約 700 mA のビーム加速の際の電圧変動は ± 1 kV である(図3)。

線形陽子加速器への入射ビームのエネルギー安定度は、*buncher* の有無に大きく依存する。

buncher が無ければ、線形加速器の縦方向の *acceptance* が大きいので、 \pm 数 10 kV になる。しかし RF による *capture efficiency* はせいぜい 25% 程度であるから、*buncher* により安定位相の付近に陽子を集群させて *capture efficiency* を 50~60% に向上させる。この場合には次のようにきびしいエネルギー安定度が要求される。すなわち Cockcroft 装置の電圧が変動すると *buncher* から線形加速器の第1加速ギャップまでの陽子の飛行時間が変わってくる。電圧とその変動を u と Δu 、飛行時間とその変動を T と ΔT とすれば、

$$\frac{\Delta T}{T} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta u}{u}$$

ΔT による RF の位相変化 $\Delta\phi$ は、 s を *buncher* から第1加速ギャップまでの距離、 ν と λ を RF の周波数と自由空間波長、 β を光速で規格化した陽子の速度として²⁾

$$\Delta\phi = 2\pi\nu\Delta T = -\pi \frac{s}{\beta\lambda} \frac{\Delta u}{u}$$

$s = 0.8$ m であるから、 $\Delta\phi = \pm 12^\circ$ のときの電圧変動は $\Delta u/u = \pm 0.5\%$ となる。加速電圧の変化に対する線形加速器ビームの運動量スペクトルの測定によれば、電圧の $\pm 0.5\%$ 変化に対してはスペクトルはほとんど変化せず、 $\pm 1\%$ で明らかに変化が見られた³⁾。一般に前段加速器の安定度は、 $\pm 0.1\%$ 又はそれ以上で、CERN や BNL では *feedback loop* 付 *bouncer* が使われているが、KEK の集群条件では上記のように安定度ははるかにゆるやかで、従って *feedback loop* の必要はないと思はれる。

周期的な加速における *beam loading* はこれで解決したが、KEK 陽子シンクロトロンはカスケード方式であるため、2秒に1回の割合で 9パルス を 50 ms 毎に入射しなければならぬ。このよ

うな向欠運転では, Cockcroft装置の出力電圧が 9パルスの初めと終りとして 約 2kV 低下することが明らかになった。リップルや drift を考えると, この電圧変動を軽減しておくことが望ましい。コンデンサーの充放電による電圧降下は, 押し上げカラムの最下段のコンデンサーの容量が 2C 他のコンデンサーの容量がすべて C の場合は次式で与えられる。

$$\Delta V = \frac{I}{fC} \left(\frac{2}{3} N^3 + \frac{1}{3} N \right)$$

KEK の Cockcroft 装置では $f = 350 \text{ Hz}$, $C = 0.03 \text{ MF}$, $N = 4$ であるから イオンビーム加速による平均電流の増加が $I = 124 \text{ }\mu\text{A}$ のときは 上式から計算した電圧低下は $\Delta V = 0.52 \text{ kV}$ となる。一応電圧安定用 feedback loop をして ビーム加速による出力電圧低下を測定すると 15 kV になり, これは計算値よりはるかに大きい。従って負荷電流による電圧低下は主に 整流器や変圧器や発電機などの内部インピーダンスによって起っていることになる。

電圧安定用 feedback loop は応答が遅いので, 今回 Cockcroft 装置の制御盤を更新するにあたり, 向欠運転による電圧変動を打消すための forcing 回路を追加した。(図4)。9パルスのうち最初のパルスより 約 50 ms 前に forcing 回路を trigger して Cockcroft 装置の出力電圧を上昇させて, 図5のように電圧変動を 約 60% に減少することができた。forcing にはまだ充分余裕があるので, 電圧分割器の周波数測定をしたあと, 更に調整する予定である。

750 keV に加速されたビーム波形の例を図6(a)に, 前後を静電チョッパーで除いた線形加速器へ入射するビーム波形を(b)に, 線形加速器から出た 20 MeV ビーム波形を(c)に示す。

文献

- 1) 福本, 線形陽子加速器, 熊谷編 加速器 p. 253, 共立出版 1975.
- 2) L. Smith, Linear Accelerators, Handbuch der Physik XLIV p. 379, Springer, Berlin, 1959.
- 3) S. Fukumoto, H. Ishimaru, K. Ito, C. Kubota, T. Sakane, A. Takagi and S. Takano, Proc. 1976 Proton Linear Accelerator Conf., p. 193, 1976.

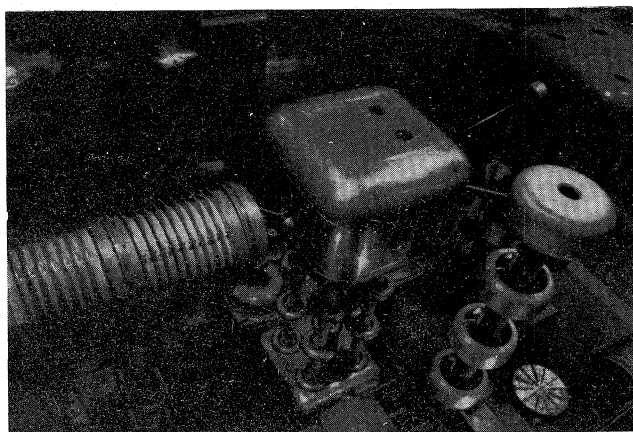


図1 KEK 前段加速器。
左より 高電場型加速管,
高電圧ターミナル(HVT),
bouncer に接続した
コンデンサー塔,
Cockcroft 装置(C.W.)

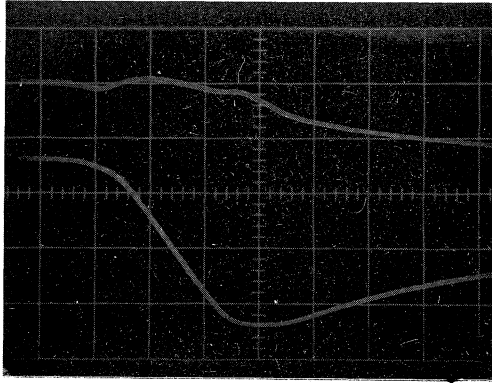
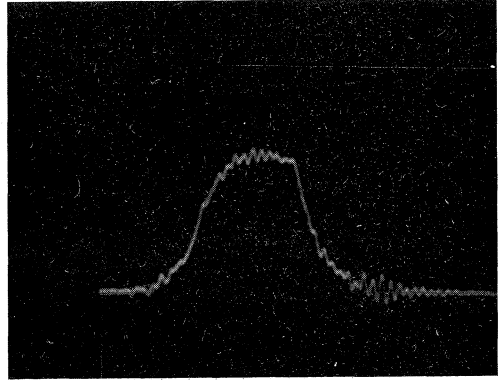
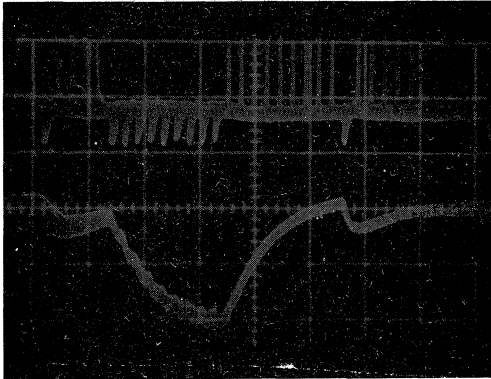


図3 beam loading (下) を bouncer で打消して ± 1 kV にした電圧波形 (上).
横軸: $5 \mu\text{s}/\text{div}$. 縦軸: $5 \text{kV}/\text{div}$.

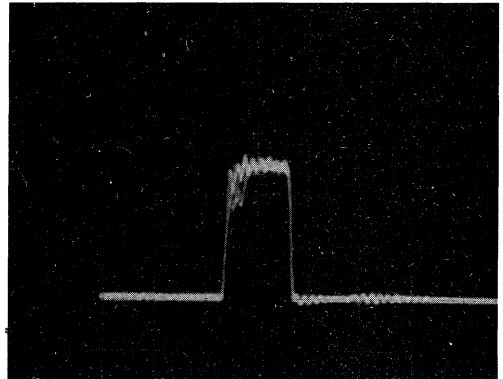
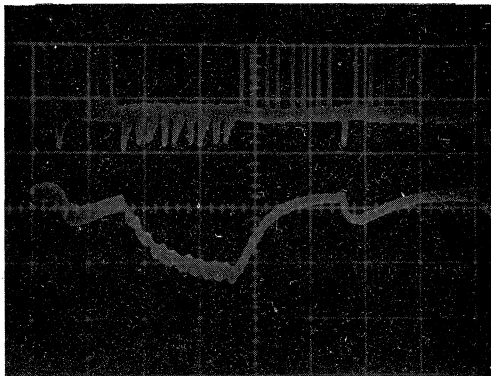


(a)

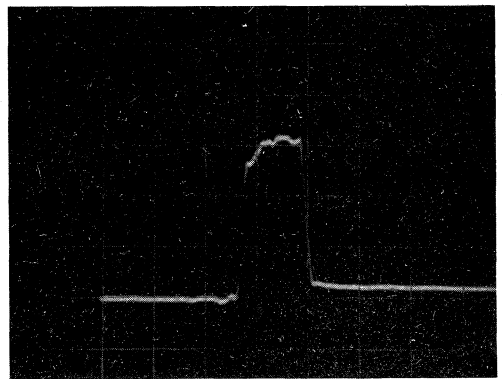


\uparrow (a)

\downarrow (b)



(b)



(c)

図5 尚欠運転時の電圧変動(a)と forcing による変動の軽減(b). 横軸: $0.2 \text{s}/\text{div}$.
(a)(b) 共下の波形が抵抗分割による遅い変動 ($1 \text{kV}/\text{div}$). 上は C-pick up の出力 ($10 \text{kV}/\text{div}$).

図6 e^- 4 波形, 横軸: $5 \mu\text{s}/\text{div}$.

(a) 750keV 加速直後, 650mA .

(b) Linac \rightarrow λ 射, 260mA .

(c) Linac 加速後, 150mA .