

阪大ピコ秒電子ライナックにおける 単一バンチ・ビーム・ローディング実験 (単一電子バンチのキャビティとの相互作用)

阪大産研 竹田誠之, 木村徳雄, 津守邦彦, 川西政治, 林晃一郎, 櫻井光

ビーム・ローディング

電子ビームがライナック加速管内で加速される時、ビーム電子は加速電場からエネルギーを取得し、その結果電子が通過してしまつた加速管内の電場は弱められる。ライナックによって加速される電子ビームは、加速管に入らせるマイクロ波周期の間隔を持つ連続した複数の電子バンチから構成されているので、後続のバンチは先行のバンチより少ないエネルギーを取得する。これはライナック特有の現象で「ビーム・ローディング」として良く知られている。第1図は定常モードにおけるエネルギースペクトルのビームパルス中に対する依存性を表わすもので、後続電子ビームのエネルギーが減少していくことが示されている。しかしながら、ビーム・ローディングの問題は、バンチ電子が加速電場からエネルギーを取得するだけでなく、同時にバンチ電子が加速管空洞にマイクロ波を励起しバンチ自身のエネルギーを損失あることを考慮しなければならぬ。

単一バンチ・ビーム・ローディング

加速管内の電場は、外部マイクロ波源(Klystron)によって作られた電場と、ビームが励起したマイクロ波による電場の重ね合わせであり、それぞれ電場と位相を独立に考えることができる。いま電荷 Q を持つ単一バンチが空洞内を通過するとき、通過後の単一バンチの全エネルギーは

$$U = E_0 Q - B Q^2 \quad (1)$$

で表わされる。ここで E は空洞内の平均電場、 l は空洞長、 $B Q^2$ は単一バンチが空洞を励起するために損失するエネルギーで、 B は一般に空洞とバンチの幾何学的パラメータに依存する。この励起によるエネルギー損失が Q の二乗に比例して大きくなるので、従来の電子ライナックで特に定常モードにおいては、バンチ当りの電荷が小さいため、マイクロ波励起によるエネルギー損失は小さい。しかしながら最近高電流単一電子バンチが加速できるライナックが建設されはじめ、nC以上の高電荷の単一バンチを加速することが可能になった。^{1,2)}そして単一バンチの電荷をより高めるための開発研究もおこなわれている。

単一バンチの電荷をどんどん増加させていくと、ついには加速電場によって得られるエネルギーより、マイクロ波励起によって失うエネルギーの方が大きくなり、単一バンチを高エネルギーまで加速することはもはや不可能になる。そのため単一バンチのマイクロ波励起によるエネルギー損失量を評価することが重要だと考えられる。

加速空洞内で加速された電子の平均エネルギーは(1)式を Q で割ることで求められ、

$$\Delta U = E_0 - BQ \quad (2)$$

となり、電荷に比例してエネルギーが減少する単一バンチ・ビーム・ローディングが存在することが予想される。

単一バンチ・ビーム・ローディング実験

阪大ピコ秒Lバンド電子ライナックは、サテライトなしで最高14nC、7.8%サテライト付で最高16.5nCの電荷を持つ単一バンチを30MeVまで加速できる。又、単一バンチだけでなく、サブハーモニック・トリバンチヤ（SHPB）の位相を制御して、770ピコ秒の間隔を持つ2つの単一バンチ（それぞれ6nC、全電荷12nC）を加速させることもできる。第2図の(3)は、6nCの単一バンチのエネルギースペクトルを表わし、バンチ内電子の平均エネルギーは28.6MeVである。第2図の(2)は2個のバンチ（それぞれ6nC）のエネルギースペクトルを表わしている。後続バンチ、おなわち2番目のバンチのエネルギースペクトルは(2)から(1)を差引いたものになり、明らかに先行バンチよりもエネルギーは低くなり、28.3MeVと評価された。この場合後続バンチのエネルギーは先行バンチより約1%低い。これは最初に述べた一般的なビーム・ローディングを示していると思われる。事実先行バンチの全エネルギーは0.17Jouleで、加速管内に蓄積されている約18Jのマイクロ波エネルギーの約1%を取得している。

また、電荷の異なる単一バンチのエネルギースペクトルが第2図に示されている。

(1)は12nC、(3)は6nCの単一バンチのエネルギースペクトルであるが、単一バンチの電荷が大きいとエネルギースペクトル全体が低エネルギー側にシフトしていることがわかる。

電荷を1nCから15.4nCまで変化させた時の単一バンチのエネルギースペクトルの変化が第3図並びに第4図に示される。電荷が増大するに従ってエネルギースペクトルが低エネルギーにシフトしていき、単一バンチ内電子の平均エネルギーは電荷に比例して減少していく。これは単一バンチの空洞へのマイクロ波励起によるエネルギー損失によ

るものと考えられる。

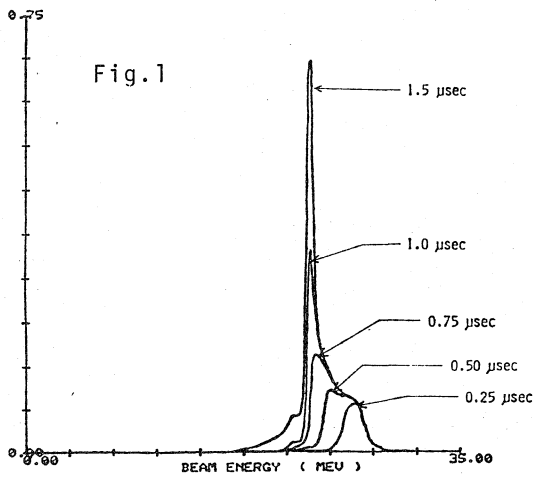
単一バンチのビーム・ローディングが空洞へのマイクロ波励起であるならば、エネルギー損失は電荷のみに依存し、外部マイクロ波源で作られた加速電場の影響を受けないであろう。5図は加速管へ入力するマイクロ波パワーを変えて加速電場強度を変えた場合、6図は加速管内での加速位相を変えた場合の、単一バンチ内電子の平均エネルギーを電荷に対してプロットしたものである。また、単一バンチが加速管後部で加速電界がゼロのところを通るように、インジェクション・タイミングを早めていた場合の単一バンチ内電子の平均エネルギーが第7図に電荷に対してプロットされている。図5, 6, 7から明らかになるように、単一バンチ電子の平均エネルギーは、マイクロ波パワーや位相、そして入射タイミングに関係しないで、電荷に比例したエネルギー損失を示しており、どの場合にも損失量は $0.98 \text{ MeV}/20 \text{ nC}$ と一定である。従って単一バンチのビーム・ローディングは、加速空洞へのマイクロ波励起によるものと思われる。

ここで、SHPB や プリバンチャー それにバンチャーでのエネルギー損失がないと仮定すると、阪大ライナックの加速管空洞数は40個であるので、Lバンド空洞1個当りのエネルギー損失 B は $0.0245 \text{ MeV}/20 \text{ nC}$ となる。SLAC において、81416個のSバンド空洞内で、 $0.9 \text{ GeV} \sim 19 \text{ GeV}$ の 0.16 nC の単一バンチが $33 \sim 45 \text{ MeV}$ のエネルギー損失を有することが報告³⁾ されており、この場合のSバンド空洞1個当りのエネルギー損失 B は $0.05 \sim 0.07 \text{ MeV}/20 \text{ nC}$ と評価される。ポイント電荷が空洞を励起するエネルギー B は、空洞サイズに逆比例⁴⁻⁷⁾ することが報告⁴⁻⁷⁾ されており、これに従えばLバンド空洞におけるエネルギー損失 B はSバンド空洞に比べて小さくなる。

以上の結果から、単一バンチ・ビーム・ローディングは加速空洞励起によるエネルギー損失であると思われる。

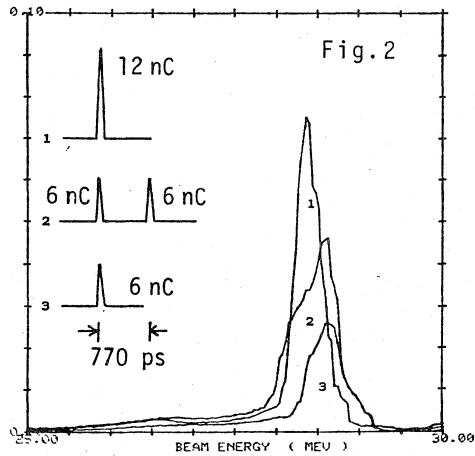
参考文献

- 1) Y. Tabata, J. Tanaka, S. Tagawa and K. Hasegawa, Proc. 2nd Symp. *Accelerator Science and Technology* (1978) 65.
- 2) 津守邦彦 他, 第4回ライナック研究会報文集 (1979) 8.
- 3) R. F. Koontz, G. A. Loew, R. H. Miller and P. B. Wilson, Proc. 1977 *Particle Accelerator Conf.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-24 no. 3 (1977) 1493.
- 4) J. D. Lawson, Rutherford High Energy Laboratory Report /M144 (1968) unpublished.
- 5) O. A. Kolpakov and V. I. Kotov, Soviet Phys. Tech. Phys. no. 9 (1965) 1072.
- 6) P. L. Morton and V. K. Neil, Proc. *Electron Ring Accelerators* (1968) 365.
- 7) A. Falten, Proc. *Electron Ring Accelerators* (1968) 363.



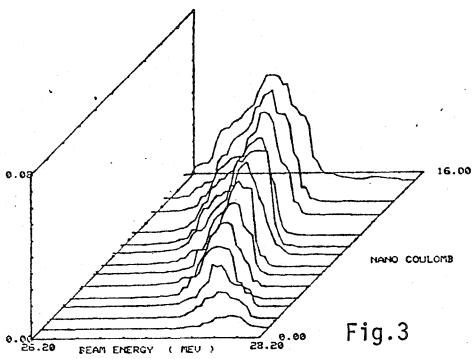
ENERGY SPECTRUM ## 80/ 6/16 14: 8: 7

第1図
定常モードの
エネルギー
スペクトル。

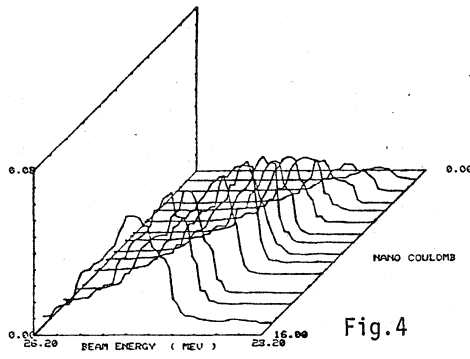


ENERGY SPECTRUM ## 80/ 6/16 14: 8: 7

第2図
単-バッチと
2個のバッチの
エネルギースペク
トル。
電荷の異なる
単-バッチの
エネルギースペクトル。

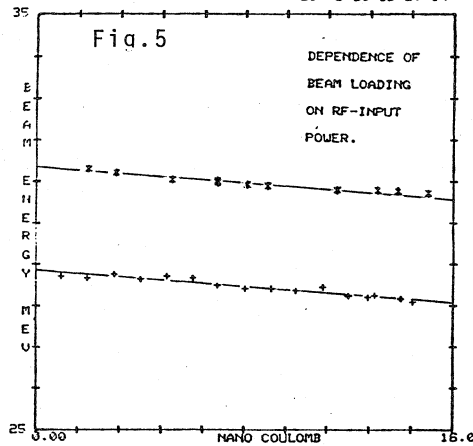


SINGLE BUNCH BEAM LOADING EXPERIMENT
80/ 6/30 15:37:14

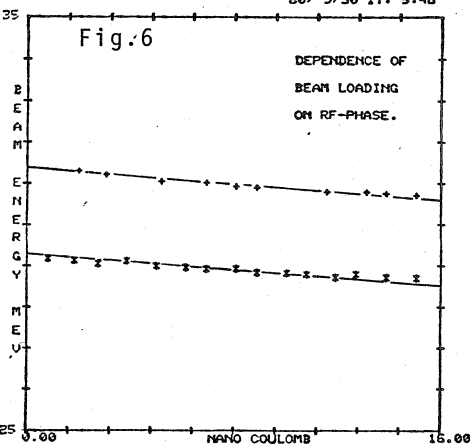


SINGLE BUNCH BEAM LOADING EXPERIMENT
80/ 5/30 17: 5:46

第3, 第4図,
単-バッチ・スペクトルの電荷
に対する依存性。

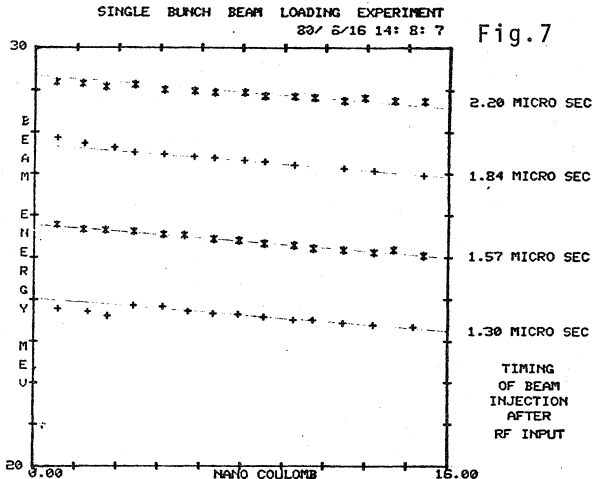


SINGLE BUNCH BEAM LOADING EXPERIMENT
80/ 6/16 14: 8: 7



第5図; 単-バッチ・ビーム・
ローディングのマイクロ波パワー
に対する依存性。

第6図, 単-バッチ・ビーム・
ローディングの加速位相に
対する依存性。



第7図, 単-バッチ・ビーム・ローディングのバッチ入射
タイミングに対する依存性。