

# PROGRESS OF THE SINGLE BUNCH LINAC

Knihiko TSUMORI

Electromagnetic Application Systems R&D Department,  
Sumitomo Electric Industries, LTD.

## ABSTRACT

During the past ten years, the domestic single bunch electron linear accelerators was progressed. A review of the technical performance of a high beam current and stability for the single bunch acceleration are given. The burst mode operation of the single bunch linac for the FEL is also presented. A new technic about photo-cathode RF gun use to the single bunch linac is introduced.

## シングルバンチライナックのあゆみ

### 1) はじめに

1969年に米国のEG&G/AECが、従来型のLバンドライナックの入射系にサブハーモニック・プリバンチャー(SHPB)を取付けて、約1.5nC (~ $10^{10}$ 個の電子)のシングルバンチビームの加速に初めて成功して以来、<sup>1)</sup> アルゴンヌ国立研究所(ANL)では7nCのビームを加速して、ストロボスコピック法による超高速過渡現象の研究に端緒を開いた。<sup>2)</sup> 我が国においては、1977年に東大工・原工施がバンチ幅に有利なSバンドシングルバンチライナックを建設して、1nCのビームを発生させ、<sup>3)</sup> その翌年には阪大産研にLバンドシングルバンチライナックが設置され、7nCのビームを加速して<sup>4)</sup> ともに放射線化学・物理・生物などの分野で先端的な研究に利用されてきた。他方SLACではSLCのためにSバンドではほぼ限界に近いと思われる約16nCの高輝度シングルバンチビームを発生させている。<sup>5)</sup> JLCでは複数個のシングルバンチを加速する計画、またコヒーレント放射光、FELの発振実験などにも同様な高輝度ビームの要求があり、これにはフォトカソードのRF電子銃は欠かすことのできない要素技術であり、その開発が進められている。

このように、シングルバンチライナックは、それぞれの目的に応じて性能の向上が図られ発展を遂げてきた。本報告ではそれらについて、主に我が国における研究成果をその周辺の分野も含めて、ライナック研究会の予稿集を読み返してまとめてみた。今後の進む方向などの参考になれば幸いである。

### 2) シングルバンチライナック

シングルバンチのビームを発生するには、パルス幅がRFの周期より狭い単発の電子ビームをプリバンチャー(PB)に入射しなければならない。ビームを十分にバンチングできるPBのアクセプタンス角度は約 $240^\circ$ であるから、Lバンドでは約510ps、Sバンドでは約230ps以下のパルス電子ビームが要求される。これを通常の熱陰極三極管型電子銃で、しかも1nC以上の電荷量で発生させることは極めて困難である。したがって、技術的に発生可能なナノ秒オーダーのパルス幅の電子ビームをSHPBで速度変調をあたえ、PBがアクセプトするまでバンチングさせる入射システムが用いられている。

### 3) シングルバンチライナックの性能向上

先に述べた5台のシングルバンチライナックに関してその変遷を図1に示した。このうちで東大と阪大のシングルバンチライナックでは、非常に異なった経過をたどっている。まず東大のライナックでは、加速周波数の1/6 SHPB 1段のスタイルは換ええないで、電子銃とグリッドパルサー、それに周辺のトリガ

ーシステムを徹底的に検討と改良を行ない、極めて安定なシングルバンチの発生に努力がなされた。例えば、同軸線路とカソードグリッドアセンブリで構成する当初の電子銃では、1/6 SHPBがアクセプトする半値幅0.8nsで2~3Aのパルス電子ビームを得ることは困難なため、グリッドパルサーと直結できる板極管用のカソードグリッドアセンブリ（東芝E-3078）に変更された。これはオキサイド型であるために、真空度の影響を受けやすく寿命の点で問題があった。次のステップとしてバリウム含浸型で定評のあるEIMAC Y-796,更には646Bが用いられた。これと並行して、アバラシェトランジスターを用いてニードルパルスを生じさせるグリッドパルサーの開発、電子銃の動的なインピーダンスの算定とパルサーとのマッチングについての考察、並びにトリガー系のジッターの改善などが行なわれた。しかし、電子銃からの出力には限界があるので、入射系における電子の損失を最小にする集束系の最適条件についても検討が行なわれた。いずれにしても、Sバンドで1/6 SHPBが1段では電荷量を増加させることはなかなか厳しいものがある。

安定性に重点をおいたこのライナックでは、メインバンチの電流変化を1%以下とするために不安定要素と思われる箇所について改善が行なわれた。3φのスリットを通過したビームを同軸キャッチャーで受けて、パルスごとのピーク電流を測定した結果、変動幅は±0.3%、ビームのジッターは7.8ps(RMS)、平均電流の長時間安定度は±0.6%であった。このライナックと、チェレンコフ光発生用ライナックをペアにしたツインライナックシステムは、パルスラジオリシスの分野で精密な測定装置としてそのユニークさが注目されている。

次にシングルバンチビームの電荷量を増大させたケースについて述べる。阪大のLバンドライナックは、当初は従来型の電子銃と1/6SHPB(216MHz)で構成されていて、シングルバンチの電荷量は最大7nCであった。もしSHPBのアクセプタンス時間(3ns)をオーバーして入射電流を増やすと、いくつかのサテライトは伴うが、メインバンチの電荷量も増加する。そこで、加速管の出口に加速周波数のサブハーモニックで励振される一組の偏向板と、その前方にコリメーターを取付けて、メインバンチをゼロクロッシングのタイミングで通過させると、そこに発生している電磁場によって有害なサテライトバンチだけは偏向を受け、電荷量の多いシングルバンチビームを得ることができる。阪大では、最大5番目までのサテライトを許容した場合には、35nCのメインバンチが得られた。電荷量を5倍程度増やすには簡単な方法である。

本格的な電荷量の増大法は、より低周波のSHPBを用いてアクセプタンス時間を拡大して、電子銃からの入射電流を増やすことである。この入射系の設計には、ディスクモデルをモディファイしたシミュレーションコードによって行なわれた。120KV, 4.5nsのビームが1台の1/12 SHPBに入射されると、5A以上で空間電荷効果によるデバンチングがはじまる。ビームがガウシアン形の場合はビームパルスの中央からはじまり、その集束点は、中央が最短で前後は長くなる。この集束点のずれは、一台の1/12 SHPBでは補正が不能なため、デバンチングははじめる位置に二台目の1/12 SHPBを置く。一台目で集束されたビームの長さは、二台目の加速ギャップよりも大きいために、キャビティー内に存在する電子ビームの一部が力を受

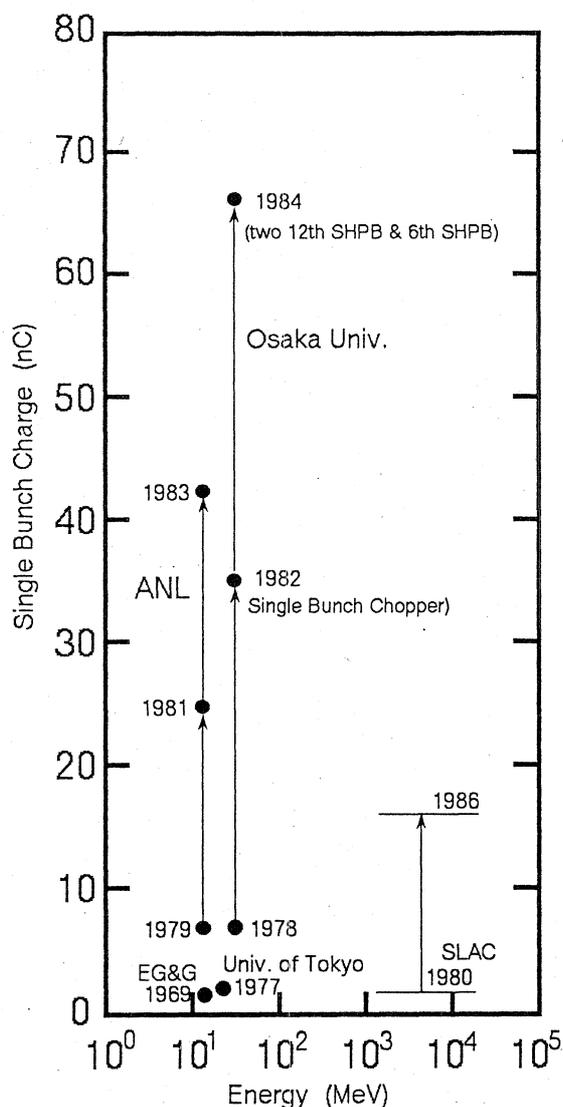


図1 シングルバンチライナック一覧

けて、スペースチャージ波を励起してビームを不安定にする。この不安定性は、二台目の位相を制御して減少させることは出来るが、同時にバンチング効果も減少するので、これを補うために1/6SHPBを更に一台追加する。図2はシミュレーションの結果、また、図3には多段形の入射系の構成を示す。

3台の空洞はそれぞれ独立した高周波増幅器(20KW, 20 $\mu$ s)によって励振され、自動位相調整装置を備え安定化している。この入射系の改造によってシングルバンチビームの電荷量は飛躍的に増大し、最大で67nCが得られた。エネルギースペクトルは、0~40nCでは約1%、67nCでは少し悪くなって2.5%、ウエークフィールドの影響が現われる33nC付近では最小となり0.7%であった。また、パルス幅は55.4nCのときに16~20pSの半値幅が得られた。

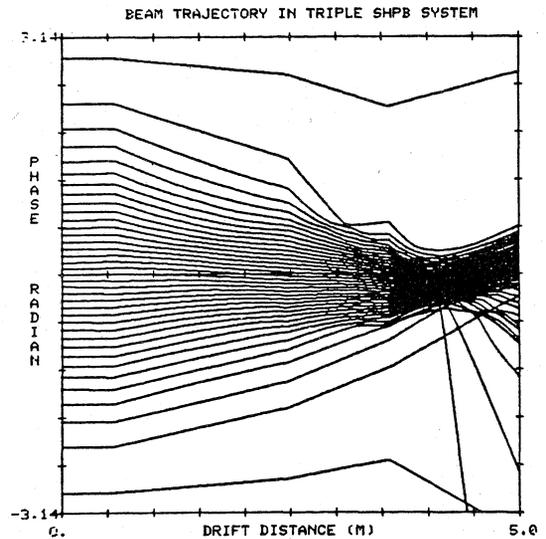


図2 バンチングシミュレーション

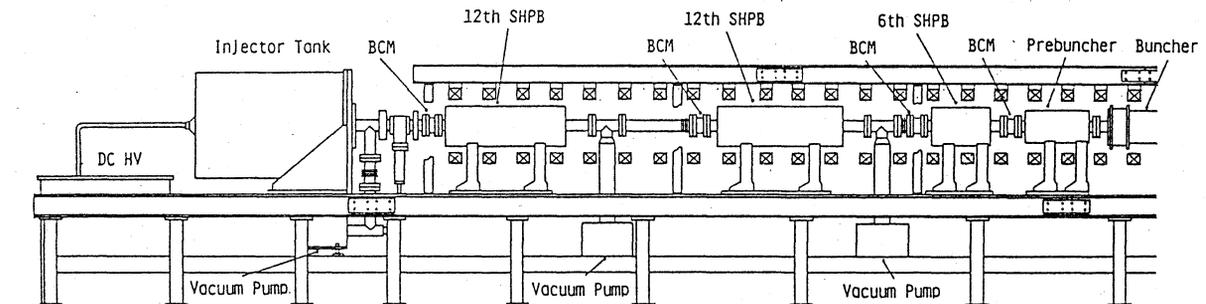


図3 多段形入射系の構成

阪大のシングルバンチライナックの原形であるアルゴンヌ国立研究所のマシンは、従来の1/6SHPBを1/12サブハーモニック(108MHz)で励振されるダブルギャップ空洞に置き換えて、電荷量を7nCから42nCまで増大させた。<sup>6)</sup>一つの空洞の両端に加速ギャップを設けたこのシステムでは、ドリフトスペースは短縮できるが、位相や電力を最適の条件にそれぞれ独立して調整できない不便さがある。SLACではSLCの入射器として1/16サブハーモニックの空洞を二段にして12~16nCの加速を行なっている。

#### 4) 周辺技術

**電子銃** :すでに述べたように加速周波数とSHPBのシステムによって、電子銃の選択は大きく異なる。同軸の伝送線路で構成された従来形の電子銃は、阪大のようにレバンドで強力なSHPBシステムが構築されているところは別として、その特性に満足できないライナックでは、板極管形のカソードアセンブリと交換されている。このタイプの電子銃は、gmが大きいのでグリッドの振込電圧も少なく済み、東大のようにサブナノ秒のパルスビームの発生には有利である。またシングルバンチの発生用のみならず、短パルスビームが必要とするPFの陽電子ライナックでも使用され、その実績が報告されている。FEL用に要求される高輝度ビームの発生には、カソードの直径が小さいタイプが選択されている。カソードには酸化陰極とバリウム含浸形があり、AET社より後者の特性について報告されている。北大では電子銃のグリッド・カソード間の動的なインピーダンスについて数値評価と実測が行なわれ、パルサーの設計に反映させている。

**グリッドパルサー** :東大ではシングルバンチライナック用に半値幅<1ns、数百Voltのアバランシェパルサーを開発するために、特性の優れたトランジスターの選択と回路構成の検討、ならびに寿命テストを行ない、多くの示唆を与えた。短パルスの発生には回路素子のストレーキャパシタンスとインダクタンス

が無視できなくなるので、KEKと東大ではパルサーの小型化・ハイブリッドIC化が提案された。北大では信号を重ね合わせる方式のトランスミッション形アバランシェパルサーを試作して動作の実証テストを行なった。阪大では回路の一部にチャージングコンデンサーを付けて、立ち上がり時間を改善し、その時間がパルサーの段数に影響されない回路を開発した。

#### 5) バーストモードのシングルバンチビームの発生

阪大におけるFELの研究では、38MeV-Lバンドライナックで36.8ns(27MHz)間隔のシングルバンチビームを発生して光共振器に入射させる必要があり、そのためのバーストモードのグリッドパルサーを開発した。三菱電機ではSOR入射用に幅3ns,間隔8nsのバーストモードグリッドパルサーを500Mbpsの光トランシーバー、超高速のコンパレータ、それにRF Ampを用いて製作している。原研ではFELライナック用に幅4ns,間隔94ns,マクロパルス幅1msのパルスをスナップオフダイオードと板極管を組み合わせで試作したが、ダイオードの出力が乏しくこれがネックになっている。

阪大のバーストモードグリッドパルサーを図4に示した。ライナックのRF発振器から送られてきた54MHzの信号は、27MHzと81MHzの2系統に分けてそれぞれRF SWでパルス化した後、結合コイルで高電位側へ伝送する。300Wに増幅した後、3dBの結合器で合成して電子銃のカソードをコントロールする。電子銃から射出されたビームのピーク電流は440mA,半値幅は4nsであった。

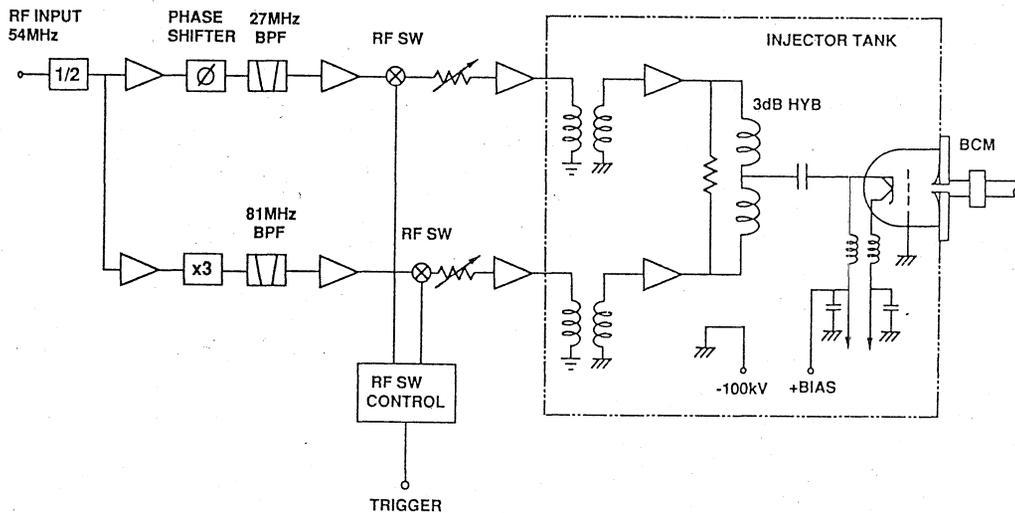


図4 バーストモードグリッドパルサー

バーストモードの加速では、バンチ当りの電荷量が少ないので初段の1/12 SHPBは不要で、2段と3段目のSHPBでバンチングを行なった。この時通過するビームで励起される電場と、励振電力による電場が合成され、加速管出口でのビームのマクロパルス波形に歪が認められた。その対策として励振電力の位相のほかにタイミングも調整して、マクロパルスの波形がフラットになるSHPBの加速電場の最適条件を求めた。シングルバンチビームの波形(マイクロパルス)は、立ち上がり60psのバイブラナー光電管、あるいはストリークカメラを用いて空気のチェレンコフ光を測定して評価を行なった。図5にはマクロパルス波形、図6にはストリークカメラで測定したマイクロパルスを示した。電荷量が1nCのメインバンチに続いて、小さなサテライトが1個認められた。現用のARCO Model-12電子銃は高い振込電圧を必要とするので、このパルサーとの組み合わせでは入

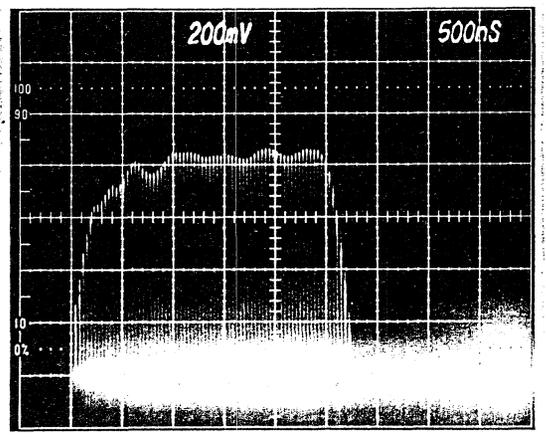


図5 マクロパルス波形

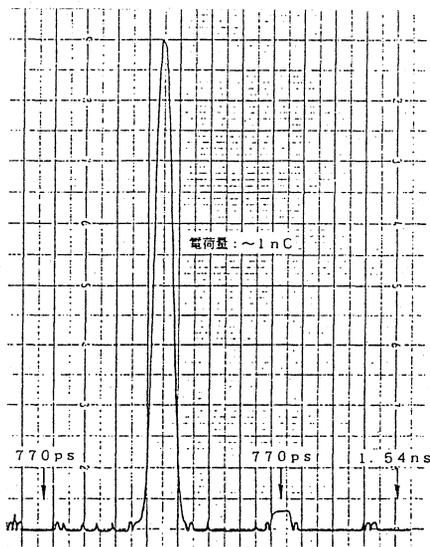


図6 ストリークイメージ

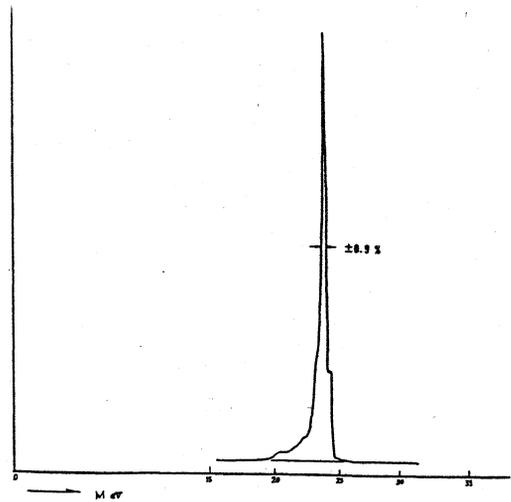


図7 エネルギースペクトル

射電流は最大500mAである。EIMACのY-796に取り替えれば電荷量と波形はともに改善されると思われる。マクロパルスの幅が $3.5 \mu\text{s}$ 、入射電流400mA、入射のタイミングはフィリングタイムよりも少し遅らせた加速条件でのエネルギースペクトルを図7に示した。 $\pm 0.9\%$ の半値幅は、純粋なシングルバンチビームの値と変わらないが、裾が少し広がっている。これはバーストモードの加速に起因しているのか確認したい。

#### 5) フォトカソードRF電子銃

1980年後半からFELに関連して急成長をとげているフォトカソードRF電子銃の出現は、シングルバンチライナックにおいてもSHPBとバンチャー系の省略を可能にする大きな変化をもたらすものである。アルゴン国立研究所ではウエークフィールド加速の研究に、<sup>7)</sup>幅1ps、単発、波長248-266nmのレーザー光をイットリウムに照射して、1300MHzの単空洞で2MeVまで加速している。ビームは幅8psで電荷量は100nC (ピーク電流  $10^4 \text{A}$ ) が得られ、もしこれをレバンドライナックの加速管に入射すれば、画期的なシングルバンチビームが発生するであろう。このようにかつては夢であった高電荷量のシングルバンチの加速システムも現実となりつつある。

#### 6) むすび

シングルバンチライナックとその周辺分野についてどのような研究が行なわれたかまとめてみた。超高速過渡現象の研究用として利用されはじめたこの種のライナックも最近FELの研究に利用の範囲が拡がりつつあり、とくにフォトカソード電子銃が活用されるようになれば性能は飛躍的に向上すると思われる。

おわりに、この報告をまとめるにあたり、阪大産研のライナックグループ諸氏、高工研・竹田誠之助教授、原研大型放射光施設・堀利彦氏、ならびにライナック研究会の予稿集から引用させて頂いた各研究機関の方々に厚くお礼を申し上げます。

#### 文献

- 1) N.J.Norris and R.K.Hanst: 1969 Particle Accelerator Conf. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-16, (1969) 323.
- 2) W.Gallagher et al.: 1971 Particle Accelerator Conf., IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-18 (1971) 584.
- 3) Y.Tabata, S.Tagawa, H.Kobayashi, T.Ueda, and J.Tanaka: Proc. 3rd Meeting of Linear Accelerator.
- 4) K.Tsumori, N.Kimura, T.Yamamoto, T.Hori, S.Takeda, J.Ohkuma, M.Kawanishi, H.Sakurai and K.Hayashi: Proc. 3rd Symposium on Accelerator Science and Technology: (1980) 49.
- 5) G.A.Loew: Catalogue of High Energy Accelerators. 14th Inter. Confer.on High Energy Accelerators, 1989.
- 6) G.Mavrogenes et al.: 1983 Particle Accelerator Conf. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-30 (1983) 2989.
- 7) C.Travier: Nucl. Instr. and Meth. A304 (1991) 285.