

**A PROPOSED HIGH-CURRENT INJECTOR
FOR THE OSAKA UNIVERSITY SINGLE BUNCH ELECTRON LINEAR ACCELERATOR**

Seishi TAKEDA, Kunihiko TSUMORI, Norio KIMURA, Tamotsu YAMAMOTO
Tomikazu SAWAI, Juzo OHKUMA, Toshihiko HORI & Masaharu KAWANISHI

Radiation Laboratory,

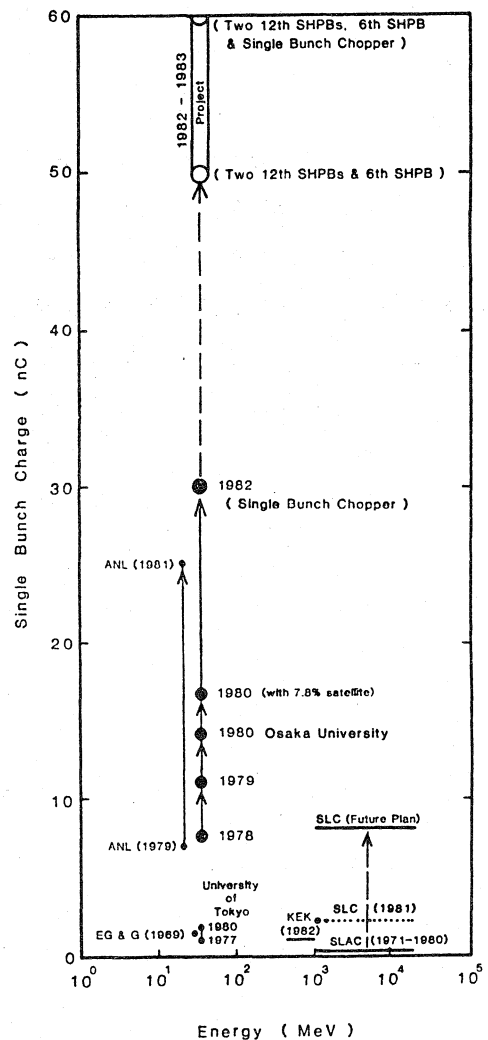
The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, Osaka 567, Japan

Abstract

A single bunch charge has been increased from 14nC to 30.6nC by deflecting satellite bunches with a 12th subharmonic single bunch chopper. A new high-current injector has been proposed in order to increase the single bunch charge up to 50-60 nC. The injector consists of two 12th subharmonic prebunchers and a 6th subharmonic prebuncher. The electron beam is confined by helmholtz coils so that the beam may travel through the drift tube at constant radius. A modified disk model has been used to calculate the bunching of the beam and to decide the system arrangement.

はじめに

電子ライナックで単一バッチを加速するには、ライナックの基本周波数で決定されるRF周期以下のパルス電子ビームをライナックのプリバンチャー(PB)に入射しなければならぬ。RF周期はSバンドで350ps、Lバンドで770psであるが、ビームを充分バンチングするPBのアクセラネーション角度を240°と仮定すると、PBへ入射可能な電子ビームの最大パルス幅はSバンドでは約230ps、Lバンドでは約510psとなる。一般的に使用されている熱陰極三極管型電子銃では、以上の様なサブナノ秒の短パルスでピーク電流が100A以上の電子ビームを発生させることは困難である。従って技術的に発生可能なナノ秒オーダーのパルスビームにサブハーモニック・プリバンチャー(SHPB)で速度変調をあたえ、PB入口でサブナノ秒の電子ビームにまでバンチングする方法が採用されている。この方法はSHPBのバンチング効果によりPBのアクセラネーション角度内に入射される総電子数が増加する利点がある。EG&G, Argonne, 東大工, 阪大産研で建設された単一バッチ電子ライナックは、単一ギャップを持つ6th SHPBによって単一バッチを加速してきた。6th SHPBを用いるとき、そのアクセラネーション角度から、Lバンドでは2へ3ms中のパルス電子ビームを単一バッチとして加速でき、その電荷量は阪大ライナックでは



第1図. 単一バッチの大電流化計画

14nCであった。しかしながら最近単一バンチの大電流化の要望が高まり、多くの単一バンチ電荷量増大計画がスタートしている(第1図)。

単一バンチの電荷量を増大するには、基本的にはPBのアクセプタンス角度内に入射される電子数を増加させればよい。そのためには 1) ナノ秒パルス電子ビームの大電流化, 2) SHPBの低周波化, 3) サテライト・バンチを除去する単一バンチ・チョッパーの3つのアプローチが考えられる。1)に関しては, Komiy, 小林, 茂見, 益子らによってS波ドライナック用の大電流電子銃の開発が進められている。2)に関しては, Argonne において、約1mはなれたダブルギャップを持つ12th SHPBが1台設置され、7nCから25nCに増大された。またSLCにおいてはLinear Collider用のInjectorとして16th SHPBを2台用いて8nCの単一バンチを60ns間隔で2個加速する計画が進行中である。3)に関してはSLACで以前SHPBを用いなくて単一バンチを加速したことがある。

阪大ライナックの単一バンチ大電流化計画

阪大ライナックは6th SHPB1台を利用して最大14nCの単一バンチを加速してきた。より高線量率効果を高めるため、単一バンチの大電流化計画が昨年かからスタートしている。この計画は前述の3つのアプローチを並行しておこなうものであり、12th SHPBを用いることでビームの最大パルス巾を長くし、その結果ビームの大電流化が容易となる。3台のSHPBを用いてバンチング効率を増加させると共に、空間電荷効果でPBのアクセプタンス角度に入射されながら結果生じるサテライトバンチは、単一バンチ・チョッパーで除去するという、これらの手法の相乗的效果により50~60nCの大電流単一バンチを加速することを目標とする。

(1) Injector テストバンチの製作

ナノ秒パルス電子ビームの大電流化のためInjectorテストバンチが製作され、立上りの良いグリッドパルサーが試作された。その成果の一部は本体のInjectorで現在使用中である。又、L波ド管用大電流電子銃の開発に着手する予定である。

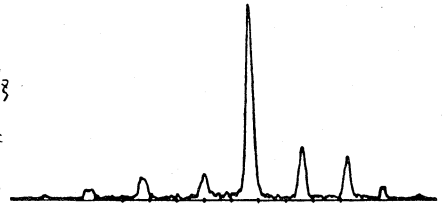
(2) 12th サブハーモニック・単一バンチ・チョッパーの開発

阪大ライナックで使用されているModel 12電子銃の最大電流は25Aであるが、電子銃の構造的周波数特性やグリッドパルサーのパルス特性によりビームパルスの立上りが制限され、6th SHPBでPBのアクセプタンス角度内に全電子をバンチングするには、3nsのグリッドパルスには約80%のグリッドバイパスを必要とする。その結果ビームのピーク電流は6Aに減少する。もしグリッドバイパスを0Vにするとピーク電流は12Aまで増大するが、ビームの全パルス巾も増大し30nCの単一バンチの前後にサテライトバンチを供する。12th サブハーモニック・単一バンチ・チョッパーはこれらのサテライトを偏向させcollimatorで除去するものである。

TEMモードの電磁波はバンチと同方向に伝播すると、バンチに対して作用しないが、逆方向に伝播する場合、バンチは光速で近づくWiggler磁石内と同様の軌道を描く。TEMモードの電磁波が入/4長の場所に存在すると、バンチは偏向され、その角度はバンチが入射される時の波の位相によって決定される。従って電磁波が12th サブハーモニックの場合、位相を調整することで単一バンチの

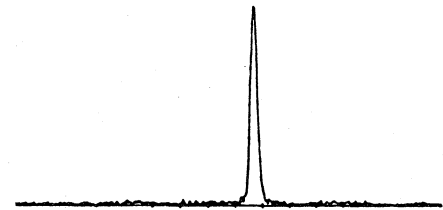
前後各5個のサテライトバンチを偏向させることができる。

バンチ・チヨウ・パ-は円筒内に存在するデトリクター、カッポラ-同調プレート、静電容量型電圧モニターから構成されている。108MHz、10μs、最大20keVのRFパルスは7651, 7214 Amp により発生され最大くりかえしは720ppsである。最大電圧はプレート端



第2図 0keV入力時のビーム波形

に発生し、20keV入力時の最大電場は48keV/cmである。第2図は0keV入力時のビーム波形で、単一バンチの前オに4バンチ、後オに4バンチのサテライトが存在する。第3図は最大電場22keV/cmでサテライトを偏向させた場合のビーム波形で、サテライトバンチは完全にcollimatorによって取除かれている。



第3図 バンチ・チヨウ・パ-で得られた単一バンチ波形

12keV/cm以下で偏向するとき、単一バンチの近接したサテライトバンチからcollimatorで除去できなくなる。

(3) Triple SHPB システムの開発

100~120 keVのエネルギーを持つ大電流ビームは γ が小さく、バンチングがある時、空間電荷効果の影響を受けやすい。従って多段型 SHPB システムを開発するにあたり、最も必要とされるものはビームのバンチングの計算機シミュレーションである。これによって決定されるものは、SHPBの位置、ギャップ電圧、ドリフト距離であるが、他に重要なものが1つある。最大のライナックはSHPBから加速管に至るまで Helmholtz Coils で完全に加速器が confine されており、ビーム口径を一定に保持させるため、ビームの空間電荷効果による1方向電場を利用しビームを Brillouin flow させている。非相対論におけるビームの Brillouin flow 電流 I は、

$$I = 2\pi\epsilon_0 B^2 a^2 \left\{ \frac{q}{2m_0} \right\}^{3/2} \left\{ \phi_a - \frac{q B^2 a^2}{8m_0} \right\}^{1/2}$$

で表わされる様はビームポテンシャル ϕ_a 、磁場 B の関数である。従って SHPB によるバンチングして行く過程でビーム電流が変化するため、Helmholtz Coilの磁場の3方向分布をビーム半径 a を一定にある様に変えなければならぬ。

ビームのバンチングの計算はディスク・モデルをモディファイし使用した。モディファイされた点は次の3点である。

(a) 相対論の補正

従来の Disk モデルは非相対論で求めた $d\gamma/dz$ に対して $1/\gamma^2$ 倍し補正している。従って j 番目のディスクに注目し、 j 番目のディスクの γ_j には依存しない。Modified Disk モデルは、ビーム系から見た、すなわち i th Disk から見た j th Disk までの距離を実験室系の dz に対して γ_j によって補正する。従って相対論の補正は \exp 項に入れる。従来の Disk モデルでは、 i th Disk と j th Disk の γ が異なることがある。それ以外の Disk の $d\gamma/dz$ が異なるため、Disk 間に力が作用した結果のエネルギー保存則が成立しなかったが、これが改善された。

(b) Programming Method の改善

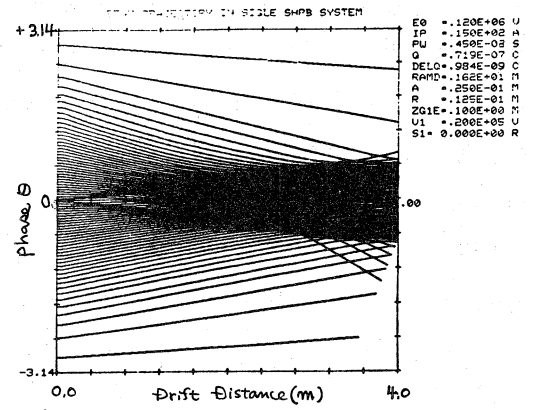
従来の Disk モデルを使った計算は、ビームが Travelling Wave によってギャップ間隔

とビームが通過する間、同時に速度変調され、このビームが Travelling Wave 上のどの位相 θ にくるかを Travelling Wave のドリフト距離に対して求めていく。従ってドリフト距離が波の波長入に比べて大きいときのみ有効であると考えられる。Modified Disk Model はビームの速度変調がかけられるのがギャップ内に存在する Disk のみであるとし、Disk が π に到達したときに、波のどの位相に存在するかを求める。

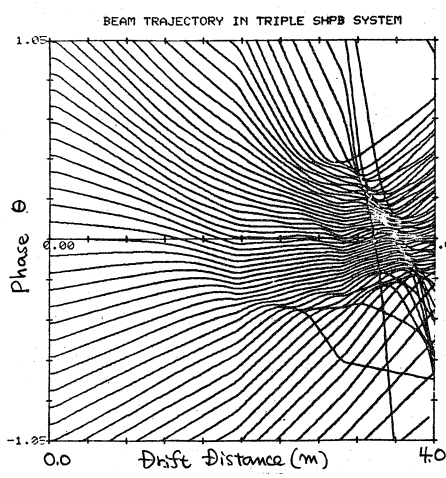
(c) パルス電圧ビーム (Gaussian) の導入

従来の Disk Model は Travelling Wave の入電を持つレクタングラーパルスビームを仮定していた。Modified Disk モデルは Gaussian のパルス電圧ビームを仮定する。等電荷を持つ Disk が Current density の逆数で分布していると仮定する。等距離で電荷にウェイトをかけた Disk でも計算できるが、等電荷の Disk の場合、PB のアクセラネーション角度内に入射されるビーム波形を計算しにくい利点がある。

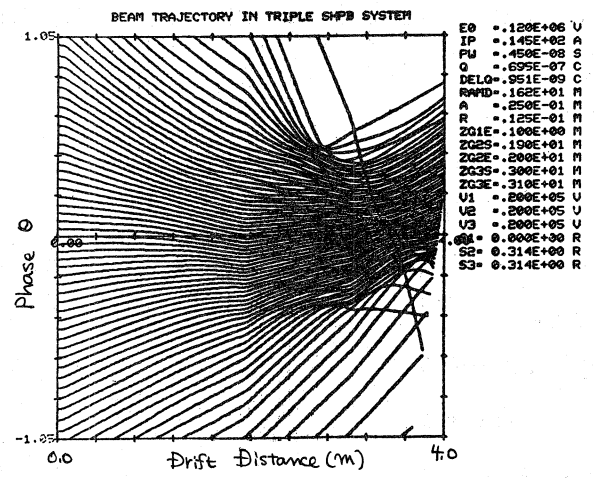
以上3点の改善と共に結果は厳しくなることが予想されるが、3)に關しては外側に存在する Disk が、バンチングしている Disk に PB 入口付近で接近し、それがもっと大きなエネルギー差がバンチド・ビームにどのような影響をあたえるかである。第4図は 12th SHPB で 4.5 nS, 15A, 120 keV の Gaussian beam をバンチングした場合を示す。1台の 12th SHPB ではバンチングが有効におこなわれなことがわかる。2台の 12th SHPB を利用したシステムでは、2台目の SHPB でビームを再・バンチングするのを防止できるが、ギャップ電圧を増加させてバンチングさせ様とすると、ビームの前部にあるディスクがバンチド・ビームに衝突してディスクに振動をあたえる傾向がある。すなわち、ディスクは他のディスクと elastic collision し、ディスク



第4図 12th SHPBによる Gaussian beam のバンチング。Modified Disk モデルを使用。Disk 数 13。



第5図 12th SHPB x 2, + 6th SHPB なる Triple SHPB システムでの レクタングラービームのバンチング。但し計算は Modified Disk モデルに入電のレクタングラービームを仮定した。



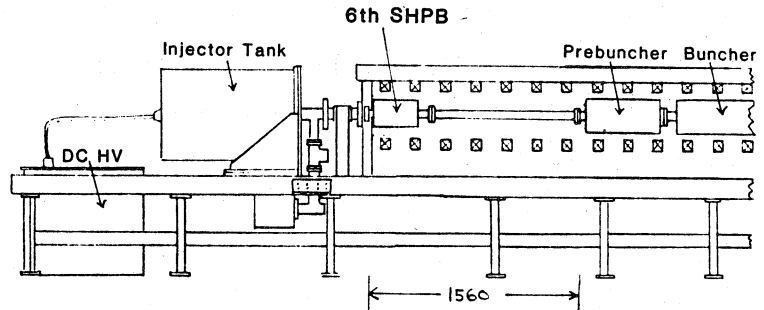
第6図 12th SHPB x 2, + 6th SHPB なる Triple SHPB システムでの Gaussian beam のバンチング。第5図と比較してバンチドビームは安定である。

間のエネルギー交換がおこなわれる傾向がある。このエネルギー交換はディスクに次々と伝えられ、その位相速度はビームの密度に依存し、ビームの space charge wave が励起される。

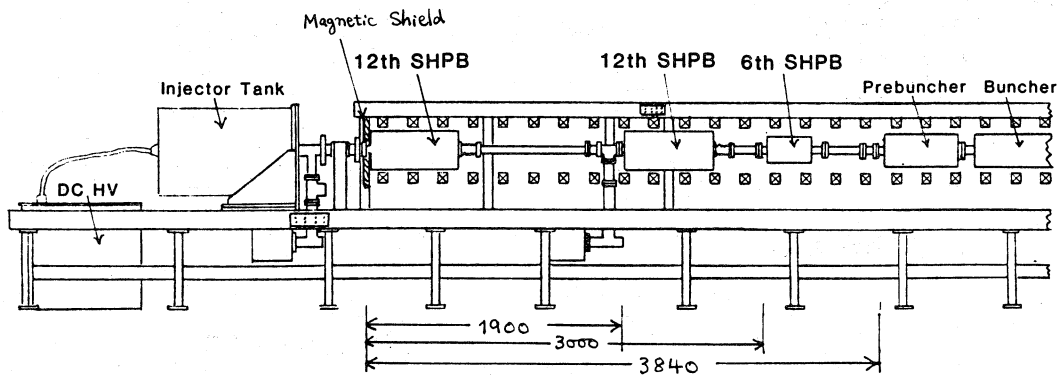
第5図は 12th SHPB 2台と 6th SHPB からなる Triple SHPB についての計算結果である。第5図は入長を矩形パルスビーム、第6図は FWHM 4.5ms の Gaussian パルスビームについての結果である。これらの図から明らかな様に先頭のディスクは既にバンチされたビームに共振をもたらし不安定にさせる。入長が 9.2ms に相当するため、Gaussian パルスビームの場合でも先頭の 4 ディスクは既にバンチされたビームに悪影響を及ぼす、しかし幸なことに電子銃から出されるビームの立上りは Gaussian 分布より良く、先頭のディスクが存在しない。計算結果から得られた結論として、SHPB (最初の) のアーク角度は $\pm 90^\circ$ で、このときビームは安定にバンチされる。

バンチングを Modified ディスクモデルによって計算した結果 3 台の SHPBs の設置場所が決定された。Helmholtz Coil を 10 台増設するため、Injector タンクを 2280mm 後ろへ移す。そのためには架台は延長され、又、Coil サポート用レールも延長される。2 台目の 12th SHPB は 1900mm 前側に設置され、6th SHPB は 3000mm の位置に置き換える。但し、現在の 6th SHPB は高パワーを入れた時フレキ・グランドがあるので、Vacuum 室のものを要する。Brillouin flow を完璧にするため従来なかった Magnetic Mirror を形成させるための磁気シールド板を 1/2 SHPB の後ろに設置する。

SHPB によってバンチングされたビーム波形を測定するため Brillouin 磁場を乱さない、空心型ビーム・カレントモニターを開発して、ドリフト端に設置する。ドリフト・チューブは 1/2 シールドを考慮して、銅パイプを用いる計画である。



第7図 現在の 6th SHPB システム



第8図 計画中の Triple SHPB システム

ディスクモデルに関して 東大工の小林仁氏から御助言をいただきました。相対論的電磁気の取扱いについては 阪大工の塩沢俊之氏から御助言をいただきました。両氏に厚く感謝いたします。