

KEKB ライナックにおける陽電子倍増のための大強度 2 バンチ加速

小川 雄二郎、榎本収志、船越義裕、古川和朗、本田 融、飯田直子、上窪田紀彦、紙谷琢哉、菊谷英司、
菊池光男、小林 仁、小磯晴代、松本利広、大西幸喜、大沢 哲、生出勝宣、諏訪田 剛
高エネルギー加速器研究機構
〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

KEKB(KEK B Factory)では、現在、1日あたりおよそ 20 回の入射を行なっているが、1 回の電子、陽電子の入射に要する時間は数分なので、物理実験にとって、1日に2時間以上は入射に費やされ、データを取れないことになる。現在の入射時間は、電荷量の少ない陽電子ビームの入射によって決まっているので、入射時間をできるだけ短くするためには、陽電子ビームを増やさなければならない。そこで、我々は陽電子ビームを倍増するために、これまでのシングルバンチビームを 2 バンチ化する計画を進めてきた。最近の進展について報告する。

1. はじめに

KEKB(KEK B Factory)は、1999 年 5 月の Belle 検出器のロールイン以来、驚異的な加速度で積分ルミノシティを蓄積している。2001 年 6 月中旬には実験開始以来の全積分ルミノシティが 30 fb^{-1} に達し、同様な実験を進行中の SLAC PEP-II とほぼ並ぶ実験データの収集に成功している。加速器の性能^[1]としては、KEKB はすでに PEP-II を凌駕しており、今後は、積分ルミノシティを効率的に蓄積し、物理実験に貢献していかなければならない。そのためには、KEKB リング加速器において、蓄積電流をさらに増やしビーム調整を進めてピークルミノシティを上げると同時に、入射時間の短縮も行なう必要がある。図 1 に示すように、現在、1日あたりおよそ 20 回の入射を行なっているが、1 回の電子、陽電子の入射時間は数分なので、1日に2時間以上は入射に費やされてしまう。現在の入射時間は、電荷量の少ない陽電子ビームの入

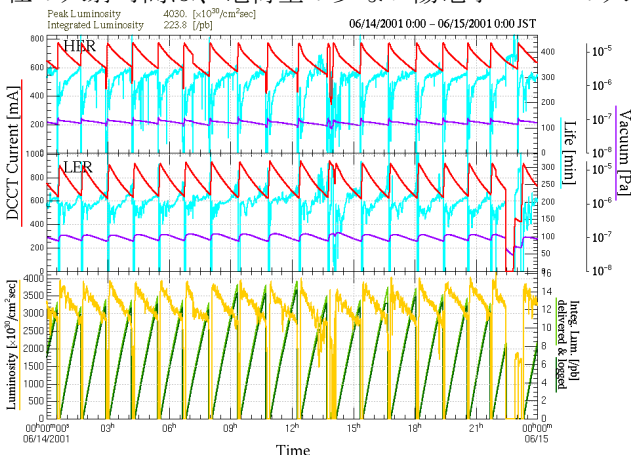


図 1 : KEBK リングの 1 日の様子。

射によって決まっているので、入射時間を短くするためには、陽電子ビームを増やすことが KEBK ライナックにとっての至上命令となる。しかし、現在の陽電子発生用 1 次電子ビームにおけるシングルバンチ電荷量は、KEKB ライナックにおけるシングルバンチウェーク場効果によって決まる閾値限界に近い。そこで、我々は陽電子ビームを倍増するために、これまでのシングルバンチビームを 2 バンチ化する計画を進めてきた。2 バンチビーム加速の現状および大電流ビームの 2 バンチ化に伴う各種の問題について報告する。

2. 2 バンチ加速のスキーム

KEKB ライナックでは、図 2 に示すように 2 段のサブハーモニックバンチャ(SHB1, 2, 周波数 114, 571 MHz)および S バンド(2856 MHz)の集群系によって、バンチ幅 10 ps (FWHM)電荷量 10 nC のシングルバンチ電子ビームを作り、3.7 GeV まで加速し陽電子発生標的に導いている。陽電子ビームは 3.5 GeV まで加速され、KEKB リングに直接入射される。陽電子倍増のために 2 バンチ化する際に満たさなければならない条件は、以下の通りである。

- (1) バンチ間隔はライナックの集群・加速周波数とリングの加速周波数(表 1 参照)との共通周波数で決まる周期 (96.29 ns)の整数倍でなければならない。
- (2) 一つのマイクロ波パルス内で加速するためには、SLED 利得曲線の幅(エネルギー利得が残り大きく変化しない範囲)程度のバンチ間隔でなければならない。また、この利得曲線を利用して、2 バンチのエネルギーを揃える(ビーム負荷補償)必要がある。(図 3)

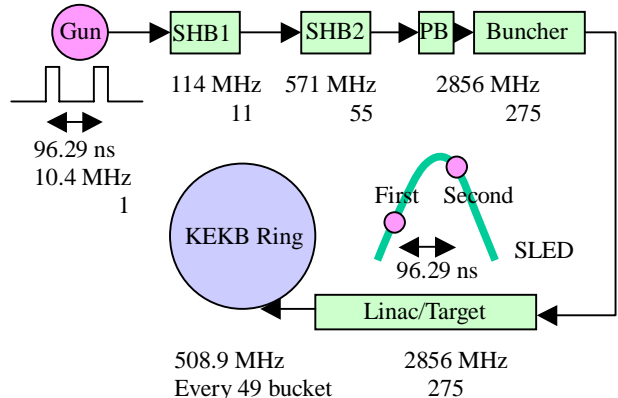


図 2 : 2 バンチ生成と加速

このうち(1)の制限は、ライナックとリングの周波数が簡単な整数関係にない（歴史的な経緯による）ためであり、大きな制約となっている。結局、(2)も考慮すると、KEKB ライナックではバンチ間隔 96.29 ns の 2 バンチ加速が唯一可能な解となる。

表 1 : ライナックとリングの周波数関係

	Multiple	Frequency [MHz]	Period [ns]
Common Frequency	1	10.385454	96.289
SHB1	11	114.240	8.754
SHB2	5*11	571.200	1.751
Linac	5*5*11	2856.000	0.350
Ring	7*7	508.887	1.965

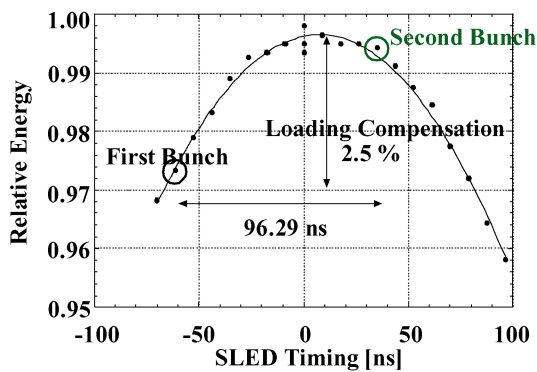


図 3 : SLED 利得曲線とビーム負荷補償

一方、リング側では、陽電子リングにおける光電子雲に由来するビームブローアップの影響を逃れるために、これまで 4 バケツ間隔のフィルパターンでビームを蓄積してきた。2 バンチ加速の場合、ライナックの 2 バンチ間隔はリングの 49 バケツ間隔に対応（表 1 参照）するため、4 バケツ間隔のフィルパターンは実現できない。そこで 4 バケツ間隔に近い変則フィルパターンをいくつか検討し、実際にシングルバンチを用いて入射を行ない、フィルパターンの妥当性を調べた。これまでの調整では、ルミノシティに関してとくに遜色のない結果が得られている。

3. 大電流 2 バンチ電子ビームの加速

3.1 2 バンチの生成

間隔 96.29 ns の 2 パルスをもつ 2 つのグリッドパルサの出力を結合して作り^[2]、それを電子銃に印加し、2 段の SHB と S バンドの集群系によって、それぞれバンチ幅 10 ps (FWHM) 電荷量 10 nC の 2 バンチ電子ビームを生成する。ここで重要な点は、2 つのパルスを同じように集群させ、同じビーム特性を持たせることである。これを実現するために、以下の点に注意してビーム調整を行なった。

- (1) 電子銃のタイミングを変えて、バンチャ出口のエネルギーをバンチ毎に測定し、2 バンチのエネルギーが等しくなるようなタイミングを見つける。

Energy @ Buncher Exit [MeV]

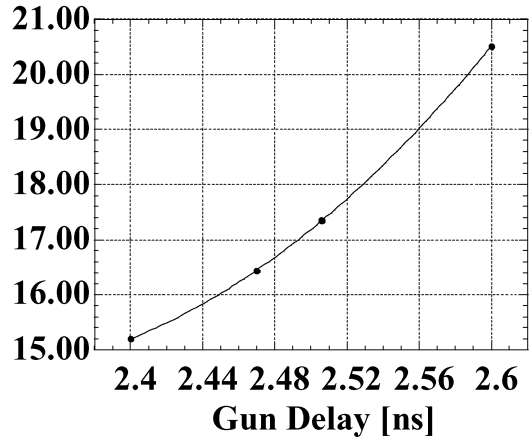


図 4 : バンチャ出口におけるビームエネルギー vs 電子銃のタイミング

エネルギーが等しくなるようなタイミングを見つける。エネルギーはステアリング電磁石とビーム位置モニタによって測定する。（図 4）

- (2) S バンドのプレバンチャ、バンチャは、進行波型加速管で、RF 充填時間が、それぞれ 8 ns、48 ns である。これらはバンチ間隔 96.29 ns に比べて十分短いので、大電流ビームによるマルチバンチビーム負荷の影響はない。したがって、集群系の条件は電荷量を等しくすれば、2 バンチ間で異なる。実際、ストリークカメラによる観測の結果、2 バンチの時系列形状は、ほぼ同等であった。（FWHM 10 ps）

3.2 2 バンチの加速

バンチャ出口の後、2 バンチはレギュラー加速管で加速されるが、ここでも、2 バンチのエネルギーを揃える必要がある。そのためには、以下の手続きを踏む。（ビーム負荷補償）

- (1) SLED を使用していないところでは、RF のタイミングをずらして 1 バンチ目を RF 充填中のタイミングにおくことによって、2 バンチのエネルギーを等しくする。
- (2) SLED を用いるところでは、既述の通り SLED タイミングを調整して、2 バンチ間のエネルギーを合わせる。

さらに、できるだけ各要所で 2 バンチのエネルギーを測定し確認する。

3.3 2 バンチのオプティクス・軌道補正

ライナックの各所でのエネルギーが 2 バンチについて確定すると、オプティクスマッチングと軌道補正を行なってビームを損失なく輸送することができるようになる。入射部を出た 2 バンチは、既述の通りほぼ同等なビーム特性を有するので、オプティクス補正に関しては、基本的には 1 バンチ目についてのみ行なえば良い。軌道補正については、単純に 1 バンチ目について実施するだけでは、2 バンチ目は補正

されないことがある。これは、加速管や四重極電磁石のミスアライメントなどにより、1バンチ目の作る横方向ウェーク場が2バンチ目に影響を与える可能性があるためである。そこで、2つのバンチを区別できるように位置モニタの読み出しソフトを改良し、それを用いて新しいアルゴリズムの軌道補正プログラムを開発した。それは、2つのバンチの軌道の重み付き平均や差を最小化できるもので、現在、状況に応じて軌道補正の方法を変えてビームの様子を調べているところである。

3.4 2バンチのビーム特性と制御

大電流2バンチ電子ビームについて、各バンチ毎のツイスパラメータを、ライナックの各要素所に適当なベータatron位相間隔で設置されている各4組のワイヤスキャナを用いて測定する。これまでのところ、2バンチ同時測定は未だ実現していないが、個々のバンチについて測定を行なっている。現在ワイヤスキャナソフトの改修をすすめており、近い将来、同時測定が可能となる予定である。

ビームエネルギーと位置については、現在、フィードバックをライナック各所で行なっているが、これも2バンチ化対応を進めている。

4. 2バンチ陽電子ビームの特性

大電流2バンチ電子ビームはタングステン標的に当てられ、大量の陽電子を発生する。陽電子ビームはパルスコイル・ソレノイド部および高電界加速部からなる捕獲部へて3.5 GeVまで加速され、KEKB入射路を経てKEKBリングに直接入射される。陽電子ビームはKEKB入射路に入る前に、ECS(Energy Compression System)を通るが、2バンチのエネルギーおよびエネルギー幅はほぼ同等であった。また、ライナック終端での陽電子2バンチビームのツイスパラメータをワイヤスキャナで、別々に(同時ではなく)測定した結果、バンチ間にほとんど差はなかった。ただし、電荷量は一次電子ビーム同様、未調整な点があり、図5に示されているように1バンチ目のほうが多い。今後、さらにビーム調整を進める予定である。

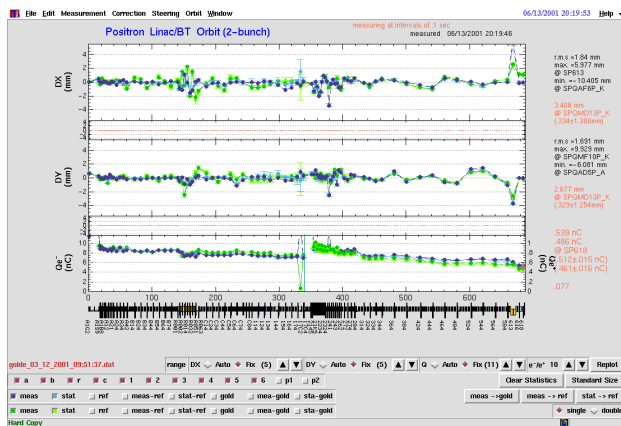


図5：2バンチビームの軌道と電荷。中央は陽電子発生用標的。濃い線が1バンチ目を表す。

5. 入射試験

このように、ライナックで用意された2バンチ陽電子ビームは、ほぼ同じビーム性能をもっていることが明らかとなったので、簡単なフィルパターンでの入射試験を行なった。図6に結果を示すように、1バンチと2バンチは、確かにリングの49バケット毎に入射されているのが確認された。また、既述のように、通常のシングルバンチ入射で2バンチ入射の場合の考えうるフィルパターン(基本を4バケット間隔にして、最小限の変更を導入)を実際に作り、ルミノシティ調整を行なったが、スペシフィックルミノシティに大きな違いは見られず、2バンチ入射の実用化に目処がついてきた。

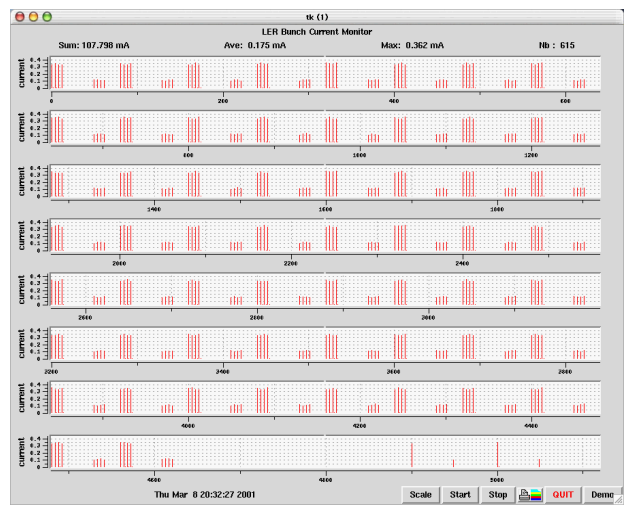


図6：2バンチ入射試験。4バケット間隔64トレンで、各トレンに4バンチ入射した。全バンチ数は234×2、全電流は100 mAである。49バケット離れた2つのグループに入射されているのが分かる。

6. 結論

KEKBライナックにおける陽電子倍増のための大電流2バンチ加速においては、ライナックの各部での2バンチのビーム特性を確認し、バンチが同等になるように調整を進めてきた。また、簡単なフィルパターンでの入射にも成功している。今後、とくに解決すべき問題としては、2バンチ入射のスキームの確立と、そのためのバンチ選択システムの開発が重要となってくる。今秋からの運転での2バンチ入射の実用化を目指して準備が進んでいる。

参考文献

- [1] 船越義裕. “KEKBルミノシティの最近の進展”, 高エネルギーニュース第20巻 第1号 2001年4/5月, p. 21.
- [2] S. Ohsawa et al., “Increase of Positrons by High-Intensity Two-Bunch Acceleration Scheme at the KEKB linac”, To be published in Proceedings of 2001 Particle Accelerator Conference, June 18–22, 2001, Chicago, IL, USA.