

SuperKEKBにおける位相変調を用いたバケットセレクション BUCKET SELECTION WITH RF PHASE MODULATION AT SUPERKEKB

杉村仁志^{*A)}、梶裕志^{A)}、小林鉄也^{A)}、佐藤政則^{A)}、松本利広^{A)}、三浦孝子^{A)}、
宮原房史^{A)}、飯塚祐一^{B)}、王迪^{C)}、草野史郎^{D)}、工藤拓弥^{D)}
Hitoshi Sugimura^{*A)}, Hiroshi Kaji^{A)}, Tetsuya Kobayashi^{A)}, Masanori Satoh^{A)}, Toshihiro Matsumoto^{A)},
Takako Miura^{A)}, Fusashi Miyahara^{A)}, Yuuichi Iitsuka^{B)}, Di Wang^{C)},
Shiro Kusano^{D)}, Takuya Kudou^{D)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)}East Japan Institute of Technology Co., Ltd

^{C)}SOKENDAI, the Graduate University for Advanced Studies

^{D)}Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd

Abstract

The SuperKEKB bucket selection system enables to inject bunches according to the appropriate bunch fill-patterns in the collider two rings, LER and HER. When an arbitrary bucket is selected, optimal timing is calculated in bucket selection IOC under the constraint of 2 ms of delay range. However, in the case of more than 25 Hz operation in LER injection, the optimal timing exceeds the criteria of 2 ms due to constraint of positron damping ring complex. To cope with this situation, we designed to change timing by modulating pulse to pulse RF phase in the 2nd half of LINAC. We evaluated the effect of the RF modulation by measuring energy fluctuation at LINAC and BT line, and also we tried LER injection with this method.

1. はじめに

SuperKEKB 加速器は電子陽電子衝突型非対称エネルギー加速器で、陽電子用蓄積リングと電子用蓄積リングは、それぞれ LER、HER と呼んでいる。また、陽電子ビームは LER 入射前にダンピングリング (DR) で最低 40 ms の蓄積を行い、エミッタンスを小さくする。入射器クライストロンは 50 Hz で運転しており、入射パルス頻度は最大 50 Hz まで可能である。この時、50 Hz で陽電子ビームを入射する状況では最低蓄積時間 40 ms の制約により 2 パルスのビームが DR に蓄積する状況が発生する。これまで DR 2 パルス運転のバケットセレクションは DR 単独運転 (LER に入射を行わない) では行われていたものの、LER に入射を行う際にはバケットセレクションの計算アルゴリズムを大きく変える必要があったため、実現できていなかった。LER 入射を 50 Hz でできるようになるとビームアポート後に設定電流まで蓄積をするための時間を短縮できたり、蓄積電流を増加する効果も期待できるため、ルミノシティ増加が期待される。今回、DR 出射後のビームが通る入射器後半の RF 位相をパルス毎に変える方法を採用し、このための移相器の導入や新しく計算アルゴリズムを構築した。これにより、DR 2 パルス運転と LER への 50 Hz 入射が可能になる。新しいアルゴリズムでは RF 位相も制御対象になりビームエネルギーへの影響も考慮に入れる必要がある。特にビームエネルギーの変動が LER の入射にどれだけの影響を及ぼすかは SuperKEKB の運転にとって非常に繊細な要素であるため、LER 入射時におけるビームエネルギー変動の測定と入射効率の評価を行った。

2. バケットセレクション

2.1 概要

バケットセレクションは LER、HER、DR でビームを入射するバケットが選択された場合に、そのバケットに入射するためのタイミングを計算し、キッカー電磁石やセプト電磁石、クライストロンなどのようなパルス機器を制御するシステムである。LER、HER、DR では 508.88 MHz の RF を利用してビームを蓄積しており、1.96 ns ごとに LER、HER では 5120 個、DR では 230 個の RF バケットが存在する。一方で入射器では 2856 MHz の RF を利用して電子や陽電子をそれぞれ 7 GeV、4 GeV に加速している。入射器と LER、HER、DR の RF 位相が同期するタイミングは両者の共通周波数である 10.385 MHz であり、96.3 ns ごとに入射機会が訪れる。これは LER、HER、DR に 49 バケット毎に入射可能になるタイミングが存在することになり、5120 と 49 が互いに素の関係性から 5120 バケット全てに独立な入射タイミングが存在する。つまり、これらの入射機会は $5120 \times 96.3 = 493 \mu\text{s}$ 待てば必ず入射できるタイミングが見つかるということの意味している。

リング内のどのバケットに入射するかのリストは「フィルパターン」として様々なパターンが用意されており、このパターンの中からパルスごとに入射するバケットを選択する。入射バケットの選択方法は大きく分けて「STAR」と「BCE」の 2 種類がある。STAR 型は入射バケットを直前の入射バケットの場所から一定の間隔を空けて入射する方法で、キッカー電流のパルス幅が $2 \mu\text{s}$ であるため、 $2 \mu\text{s}$ 以上は入射を避けるようにすると結果的に星型のような入射パターンになることからこの名称が付けられている。BCE 型 (Bunch Current Equalizer) は蓄積しているバンチの中から蓄積電流の低いバンチを選

* hitoshi.sugimura@kek.jp

ぶことでそれぞれのバンチ電流の均衡がとれるように入射する方法である。また、これらの両方を織り交ぜて入射を行う「Combined」モードや、各入射バケットに一度だけ入射を行う「OneCycle」モードなども用意しており、様々なビームスタディや営業運転を円滑に行えるようにしている。

また、入射パルスの中に一度に2つのバンチを加速し、入射するという「2バンチ運転」も SuperKEKB 加速器では可能であり、この場合、同期タイミングが96 ns後に訪れることからバンチ間隔も96 nsで生成できるような仕組みとなっている。

これらの方法によって選択された入射バケットや入射タイミングなどの情報は、その計算を行っている IOC から共有メモリ (reflective memory) を介して入射器のタイミングステーションでイベントジェネレータ (EVG) により配信される [1]。

2.2 LER 入射用バケットセレクション (位相変調なし)

LER、HER ともに $493 \mu\text{s}$ 待つことで全ての入射タイミングが見つかるが、DR の入射バケットも考慮に入れる場合、5120 と 230 の最小公倍数である 117760 とおりのタイミング列が必要になるため、必ず入射できるタイミングが見つかるまでに最大で $117760 \times 96.3 = 11.3 \text{ ms}$ 待たなければならない。しかしながら、クライストロン電源の仕様で 50 Hz 運転でパルス間隔が 18 ~ 22 ms が動作保証範囲となっているため、実際には LER の入射バケットからタイミングを探し、その中で商用 AC 50 Hz を基準として $\pm 1 \text{ ms}$ 以内に入るような DR の入射バケットを見つけないという手法をとる。

この手法を用いれば、LER バケットに入射できる DR バケットは LER バケット毎に 23 バケットあるため、どの DR バケットにも入射可能であれば、 $493 \mu\text{s}$ の待ち時間で 23 個のうち 1 つの DR バケットを使った運転タイミングを見つけることができる¹。この手法を利用するためには DR に入射する前に DR からの出射タイミングをあらかじめ計算する必要がある。この計算のためには DR 内でのビームの蓄積時間を知っておく必要があり、これを変数 “ T_{store} ” で定義し、インプットパラメータとしてタイミングを計算する。

基本的な方針としては同一パルス内で DR から蓄積ビームの出射と DR への入射が同時に行われることが効率のよい運転となるが、ビーム入射頻度が低いときには T_{store} もそれに応じて長くなり、あらかじめ計算した出射タイミングと商用 50 Hz にずれが生じてくる。というのも商用 50 Hz は「正確な」50 Hz ではなく、周波数偏差が 0.2 Hz 程度であるため、最大蓄積時間 “ T_{max} ” を定義して、一定時間経過したビームは出射するようにしている。 T_{max} は商用 50 Hz のゆらぎの測定結果に基づいて 200 ms と設定した [2]。このため、ビーム入射頻度が 5 Hz より低い場合、DR への次の入射が行われる前に蓄積ビームは 200 ms 後に発射するようなシステムとなっている。これによって「DR に入射のみ」、「DR からの出射のみ」、「出射と入射を同時に行う」という 3 通りのパルス制御が必要となり、新たにパルス毎に 3 種類を判別するためのビームゲート機能を設けた [3,4]。

¹ 実際には商用 AC 50Hz に対して $\pm 246.5 \mu\text{s}$ となる

2.3 LER 入射用バケットセレクション (位相変調あり)

2.2 節のように、ビーム入射頻度に応じて T_{store} は変化するものの、上限値 T_{max} が設けられている。一方で下限値として 40 ms も設けられており、これは光学計算によって出射ビームのエミッタンスが十分に小さくなるための最低時間として得られている。そのため、ビーム入射頻度が 25 Hz より高くなる場合、DR 内で蓄積されるビームは 2 パルスとなり、タイミングの計算には蓄積されている RF バケットを避けて入射するという制限を加える必要がある。避ける範囲は入出射キッカー電磁石の出力電流波形で決まっており、波形の立ち上がり立ち下がり時間にそれぞれ 100 ns を要し、さらにキッカー電流は常に 2 バンチ運転用の波形となっているため、96 ns の波形の重なりがある。そのため、蓄積パルスを蹴り出さないように次のパルスの入射をするためには 151 バケット ($100 + 96 + 100/1.96$) は入射できない領域となり、これを避けて入射する必要がある (Fig. 1)。

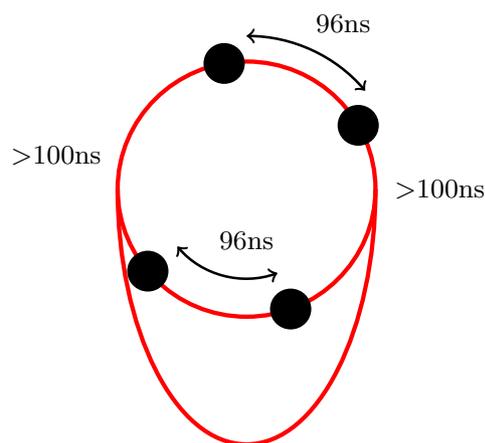


Figure 1: The storage configuration of 2-bunch, 2-pulse at Damping Ring.

つまり、バケット番号 ($n, n+49$) に蓄積されている場合 (1 バンチ目のバケット番号, 2 バンチ目のバケット番号)、入射できるバケットは ($n+100, n+149$) から ($n+130, n+179$) までの 31 バケット分に制限がかかる。LER の入射バケットを一つ決定したときに DR の入射バケットの選択自由度は 23 あり、その中で遅延時間 2 ms の中に含まれるタイミングは 4 通りである。4 通りのタイミングが 31 バケットの領域に必ず含まれるとは限らないため、2.2 節の方法では入射できないパルスが生じてしまい、ビーム入射頻度を 25 Hz より増やしても結果的に非効率な状況が生じる。そこで 2 パルス運転では DR 出射後のビームが通る入射器後半の RF 位相をパルス毎に変えることでリングと入射器の RF 位相を同期させるシステムを開発した [5,6]。入射器後半の位相を変えるための S バンド移相器を新たに設け、バケットセレクションのタイミング計算によって得られた位相設定値をイベントタイミングシステムのデータバッファ機能を利用して移相器内に搭載した光トランシーバー (GTX) で受信することでパルス毎に位相変調を行うという高速応答が可能になった。

位相変調機構を用いるとビームと位相は同期するものの、ビームとタイミング信号との間には時間差が生じる。この影響により SLED 反転タイミングのずれに伴うビームエネルギーの変動が起こる。

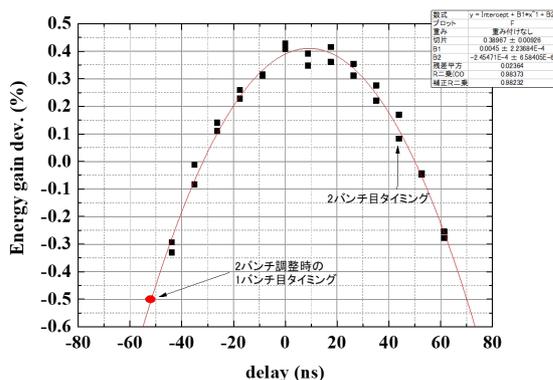


Figure 2: The energy gain deviation as a function of time difference between beam and RF SLED timing.

Figure 2 はタイミング信号とビームとの時間差によるエネルギーゲインの変化量を示している。2019 年前期の実績では、エネルギーの変動が 0.025 % 以下で入射ができており、位相変調によってエネルギー変動を 0.025 % 以下に抑える必要がある。例えば、Fig. 2 のように 1 バッチ目のタイミングが SLED に対して 53 ns 早い場合、エネルギーゲインは -0.5 % であり、ここで位相変調によるタイミングのずれが生じると 0.023 %/ns のエネルギー変動が生じる。その後、エネルギー圧縮によって変動は 1/3 に抑制され、0.008 %/ns となる。つまり、この例ではビームとタイミングの時間差が 3 ns 以内であれば LER の入射はできるということになる。

Table 1 はビームとタイミングの時間差が 1.6 ns 以下になる時の位相設定値である。1.6 ns 以下にした場合、位相変調なしの設定に加えて 18 種類の位相設定値を利用することが可能であり、これによってタイミングの遅延時間は 2 ms 以下に抑えることができる。Table 1 の Event Clock Offset は 10.385 MHz の共通周波数になる時のタイミングから 114 MHz のクロックで追加クロック分をオフセットとして設定している。例えば ID= 1 の場合、位相変調なしのタイミングから 1 クロック追加して同期するような RF 位相を決定している。この時、対応するバケットは 4.46 バケット分シフトする (8.75/1.96) ため、タイミングの計算はシフトする前のバケットのタイミングに対してクロックのオフセットを加えるという計算を行う。これを Table 1 の Bucket Timing で表している。RF 位相の変化量は、ID = 1 では 4 バケットシフトの時の小数点以下 0.46 バケット分のずれに相当する時間を位相に換算すると 161.633 deg となる。

3. 位相変調を利用したビームのエネルギー変動の測定

2020 年 2 月に位相変調によるバケットセレクションを用いた場合に生じるエネルギー変動の大きさを入

射器第 3 スイッチャードのシケイン部と BT ライン第 0 アーク部で測定した [7]。それぞれの場所でのディスプレイは 1678 mm と 2832 mm となっている。

Figure 3 はシケイン部でのビームとトリガーの時間差に対する水平方向の変位である。これを 1 次でフィットし、変位量は $dx/dt = 0.4224 \text{ mm/ns}$ となり、エネルギーに換算すると、 $dE/dt = (dx/dt)/\eta_x = 0.025 \text{ %/ns}$ となった。この値は 2.3 節の Fig. 2 の例と一致している。

Figure 4 は第 0 アーク部でのビームとトリガーの時間差に対する水平方向の変位である。同様にフィットすると、変位量は $dx/dt = 0.1242 \text{ mm/ns}$ となり、エネルギーに換算すると、 $dE/dt = (dx/dt)/\eta_x = 0.0044 \text{ %/ns}$ となった。つまり、最大 1.6 ns の時間差があったとしてもエネルギー変動は 0.007 % であり、LER 入射へのエネルギー変動の要求値 0.025 % 以下を満たしている。

2020 年 6 月に LER への入射を試みた。営業運転中は 700 mA での運転だったが、初めての測定のため測定時の蓄積電流量は LER、HER とも 500 mA に抑えて測定を行った。Figure 5 はビームとトリガーの時間差に対する入射効率である。エネルギーの変動により、入射効率に対して相関が得られた。入射効率の変動幅は 0.5 % 以内であり、影響は無視できる量といってよい。また同時に Belle2 の物理データの取得も行われ、大きな支障は見受けられなかった。

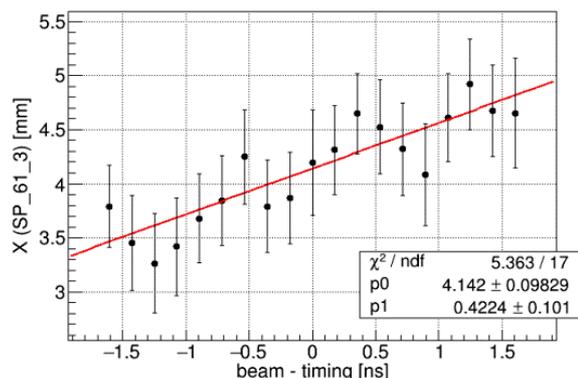


Figure 3: Position shift at chicane at the end of the Linac as function of time difference.

4. まとめ

SuperKEKB における入射器の RF 位相変調を用いたバケットセレクションのシステムを構築した。位相変調に伴うビームとトリガーの時間差の影響を評価するため、エネルギーの変動の測定を入射器第 3 スイッチャードのシケイン部と BT ライン第 0 アーク部で測定し、エネルギー変動が入射には影響のない程度であることを評価した。これにより LER の入射試験を行い、入射効率の評価を行った。入射効率の変動幅は 0.5 % 以内であり、影響は無視できる量であることが分かった。試験中には同時に Belle2 の物理データの取得もすることができた。50 Hz での運転制御が可能になったことで、今後 SuperKEKB 加速器の蓄積電流の増加も期待でき、性能向上のための一つの壁を超えることができるような機能

Table 1: List of RF Phase at 2nd LINAC

ID	RF Phase (deg)	Timing Difference (ns)	Event Clock Offset	Bucket Timing
0	0	0	0	0
1	161.633	-0.893	+1	1-9196
2	22.0408	+1.07	+1	1-11495
3	183.673	+0.179	+2	2-20691
4	345.306	-0.715	+3	3-29887
5	205.714	+1.25	+3	3-32186
6	146.939	-1.61	+4	4-39083
7	7.34694	+0.357	+4	4-41382
8	168.98	-0.536	+5	5-50578
9	29.3878	+1.43	+5	5-52877
10	330.612	-1.43	+6	6-3454
11	191.02	+0.536	+6	6-5753
12	352.653	-0.357	+7	7-14949
13	213.061	+1.61	+7	7-17248
14	154.286	-1.25	+8	8-24145
15	14.6939	+0.715	+8	8-26444
16	176.327	-0.179	+9	9-35640
17	337.959	-1.07	+10	10-48836
18	198.367	+0.893	+10	10-47135

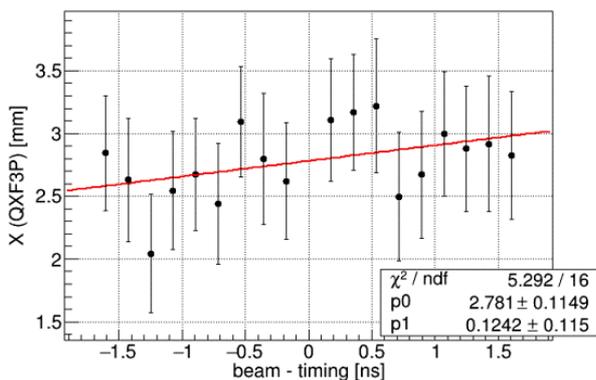


Figure 4: Position shift at the 0th arc of beam transport line as function of time difference.

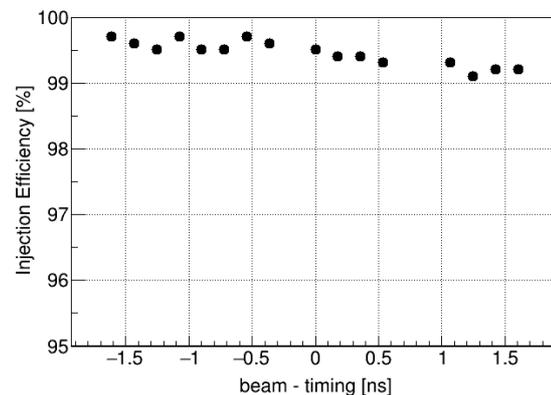


Figure 5: Injection efficiency as function of time difference.

を構築した。

参考文献

- [1] H. Kaji *et al.*, “Bucket Selection System for SuperKEKB”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, Aug. 5-7, 2015, pp. 1278-1281.
- [2] H. Kaji *et al.*, “Injection Control System for the SuperKEKB Phase-2 Operation”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 124-128.
- [3] H. Kaji *et al.*, “Beam Gate Control System for SuperKEKB”, Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference (IPAC2018), Vancouver, BC, Canada, Apr. 29-May. 4, 2018, pp. 2124-2127.
- [4] H. Sugimura *et al.*, “Trigger Control System with Beam Gate at SuperKEKB Injector Linac and Damping Ring”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 1078-1081.
- [5] H. Kaji, “Bucket Selection for the SuperKEKB Phase-3 Operation”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 1114-1116.
- [6] T. Miura *et al.*, “Reference RF Phase Control System for SuperKEKB Injector LINAC”, Proceedings of the 17th Annual

PASJ2020 WEOT10

Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sep. 2-4,
2020.

[7] [https://www-linac.kek.jp/cont/linacement/
mainLERBT1.html](https://www-linac.kek.jp/cont/linacement/mainLERBT1.html)