

Event Timing System による SuperKEKB 入射制御

INJECTION CONTROL AT SUPERKEKB WITH EVENT TIMING SYSTEM

梶裕志^{*A)}, 岩崎昌子^{A)}, 岡崎知博^{B)}, 菊谷英司^{A)}, 草野史郎^{C)}, 工藤拓弥^{C)},
小林鉄也^{A)}, 末武聖明^{A)}, 飛山真理^{A)}, 中村達郎^{A)}, 古川和朗^{A)}, 宮原房史^{A)}
Hiroshi Kaji^{*A)}, Masako Iwasaki^{A)}, Tomohiro Okazaki^{B)}, Eiji Kikutani^{A)}, Shiro Kusano^{C)},
Takuya Kudo^{C)}, Tetsuya Kobayashi^{A)}, Masaaki Suetake^{A)}, Makoto Tobiyama^{A)},
Tatsuro Nakamura^{A)}, Kazuro Furukawa^{A)}, Fusashi Miyahara^{A)}

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

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

^{C)}Mitsubishi Electric System & Service Co.

Abstract

SuperKEKB is the next generation project of KEKB and is started its operation in early 2015. Linac plays important roles in this luminosity upgrade project. The stored beam current in the main ring is doubled from that of KEKB. The top-up injection is performed to keep the maximum beam current during the operation. The injection control becomes complicated because of newly constructed Damping Ring. We designed the new Main Trigger Station. The performance tests of Event Timing System are implemented since it becomes more essential in this new design. The accuracy of delivering timing is determined to be 10ps. The long term stability of operation is confirmed. We conclude the new Main Trigger Station is satisfactory for SuperKEKB.

1. SUPERKEKB プロジェクト

SuperKEKB^[1] は、2010年に運転を終了した KEKB^[2] の後継プロジェクトであり、2015年初頭の運転開始に向け建設が進められている。そのビームエネルギーは電子 7GeV, 陽電子 4GeV, 衝突エネルギーは KEKB と同じく 10.58GeV である。一方で、デザイン・ルミノシティは KEKB 到達値^[3] に対し 40 倍の $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に設定されている。

このルミノシティ増強計画において入射器 Linac^[4] には、メインリング (MR) のビーム蓄積電流を 2 倍にし、トップアップ運転によりそれを維持することが求められている。

2. LINAC の入射制御

Linac はその入射パルス毎に、「入射リング選択制御」「入射バケット選択制御^[5]」の 2 種類を行う。この節ではそれぞれの制御の役割と SuperKEKB プロジェクトにおける改良点について説明する。

2.1 入射リング選択制御 (Ring Selection)

Figure 1 は Linac とビームが入射されるリングの場所を KEK の航空写真上に表したものである。Linac は電子・陽電子 MR の他に PF^[6], PF-AR^[7] の全 4 リングにビームを供給している。複数の蓄積リング同時にトップアップ運転するためには、Linac のパラメータを入射パルス毎に (典型的には 50Hz, 20ms 毎で) 変更しなければならないが、変更を要するパラメータの数は 150 以上に及ぶ。

Linac の入射スケジュールを管理し、トップアップ運転のため入射リングをそのパルス毎に選択制御するのは、Main Trigger Station (もしくは Main Timing Station と呼ぶ) である。Linac 各所に配置された機器は、こ

れを焦点としたスター型の光ケーブル・ネットワークを構築している。Main Trigger Station はこのネットワークを用いて「次の入射パルスに関するパラメータを指示」し、「動作タイミングとなるトリガーを供給」している。

SuperKEKB 陽電子パルスはダンピングリング (DR) を経由し MR へ入射されるため、入射過程は 20ms で完了せず、入射リング選択制御と入射スケジュール管理は複雑になる^[8]。陽電子パルスは DR に少なくとも 40ms 蓄積され、しかもこのダンピング時間は陽電子入射頻度により変化する。この条件でも 20ms 毎の入射は維持されるため、「陽電子ダンピング中に電子パルス入射」など複数の入射過程が並行して行われる場合がある。

また Linac 前後半部分は、陽電子入射の際は別々の入射器として動作し、「DR への入射 (前半)」「DR から MR への入射 (後半)」を実行することになる。これらは電子入射の際は同期し、今まで通り、1 つの入射器として動作する。

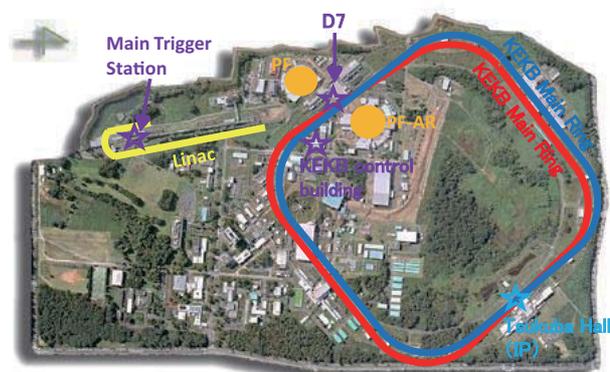


Figure 1: Accelerators layout at KEK. The e^+e^- beams for KEKB main rings, PF, and PF-AR are injected from Linac.

*hiroshi.kaji@kek.jp

2.2 入射バケット選択制御 (Bucket Selection)

電子・陽電子MRはそれぞれ5120個のRFバケットを持っており、そのうち1つを選び入射するのが入射バケット選択制御である。Linac・MR両方のRF周波数を考慮すると、MRへの入射機会は96nsに1度である。この5120倍の493 μ sの間にMRの全バケットに1度ずつ入射のタイミングが訪れる。

50Hz入射パルスは「MR revolutionから作った周期493 μ sの基準信号」とも同期される。そして基準信号と入射パルスタイミングの間に任意の遅延時間を加えることで、入射バケットを選択している。

SuperKEKB陽電子パルス入射ではDRバケットの選択も必要になる。上述の遅延時間で出射できるDRバケットへ、予め陽電子を入射しておかなければならないためである。この「DR-MRバケット」の組み合わせは493 μ s毎に変化し全部で23種類が順番に作られる。そのため同じ入射条件が訪れる周期は11.34msと長くなってしまふ。

Main Trigger Stationは以下の複雑な問題を解決するものに改良される。入射MRだけでなくDR-MR組み合わせも選択できる様に、遅延時間の基準信号周期を11.34msに延ばすと、50Hz入射ごとにこれと同期することが難しい。またDRバケット選択はMR入射の40ms以前に行っておかなければならず、このダンピング時間は陽電子の入射頻度に依存するため、Linacの入射スケジュールを理解していないと遅延時間の計算ができない。

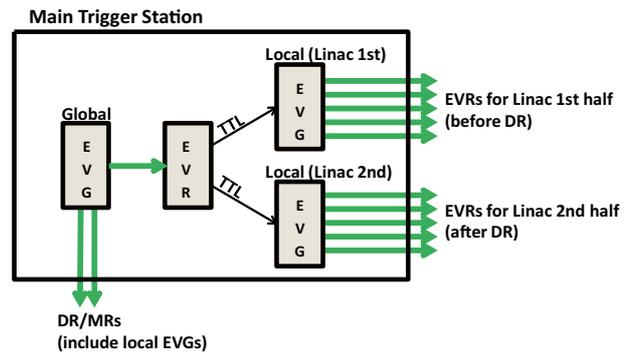
この制御には前述のスター型ネットワークとは独立なループ型の光ケーブル・ネットワークが用いられる。このネットワークはMain Trigger Station, KEKB制御棟, D7電源棟側室の3点(場所はFigure 1参照)をノードとしており、それぞれの持つ共有メモリが光ネットワークで接続されている。MR側からLinacへの「入射バケットに関するリクエスト」は、KEKB制御棟ノードから共有メモリへ書き込まれ、Main Trigger Stationに伝達される。また入射バケット選択制御には、MRバンチ中で電荷の低いバンチを自動的に選ぶ機能が備わっている。カレントモニターで測定したMR各バンチの電荷量を、D7電源棟側室ノードから共有メモリに書き込むことで、これを可能にしている。

共有メモリによるデータ転送はすでに確立しているが、SuperKEKBでは共有メモリ・モジュールとしてVMIVME-5565^[9]を用いる。「Main Trigger Station-KEKB制御棟」のノード間でデータ転送試験を行ったところ、その速度は45.5MB/sであり、このモジュールは50Hz入射運転での実用に十分耐えられる。

3. MAIN TRIGGER STATION

Linac各所の機器に動作とそのタイミングを指示し、入射制御を担うのが、Main Trigger Stationである。我々はEvent Timing Systemによりこれを構築している。この節ではまずEvent Timing Systemについて説明し、その後、SuperKEKB用に改良されるMain Trigger Stationデザインについて述べる。

(a) Design of Main Trigger Station



(b) Test setup

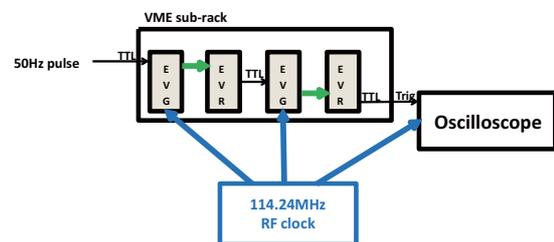


Figure 2: (a) Design of Main Trigger Station and (b) Test setup for Event Timing System. Green arrows indicates transmission of Event Code.

3.1 Event Timing System

Event Timing SystemはEvent Generator (EVG)とEvent Receiver (EVR)の2種類のモジュールを光ケーブルで接続して構築され、EVRの動作とそのタイミングはEVGにより制御される。

EVGは「RFクロック(KEKBでは114.24MHz)」「トリガーとなるTTL信号」を入力として受け取り動作する。トリガーを受けるとEvent Codeと呼ばれる1バイトのデータを入力クロックに同期させてEVRへ送信する。

EVRは受信したEvent Codeをトリガーとして動作し、Event Codeの種類により事前に設定された動作のうち1つを実行する。EVGが送信するEvent Codeは8B10Bエンコーディングされているため、EVRの内部クロックの位相はこのEvent Codeによりロックされ、EVRの動作は上流のEVGのクロックと同期している。

我々はMain Trigger Station用のEVG, EVRとして、MRF社製のVME規格モジュールVME-EVG-230, VME-EVR-230RF^[10]を採用している。このEVGモジュールはトリガーから8.8ns刻みで最長37秒(共にRF114.24MHz時)の遅延時間でEvent Codeを発信できる。また248種類のEvent Codeを最大2048個スケジュールし、1回のトリガーで発信可能である。EVRはEvent Codeごとに「NIM, TTL信号の発信」「バス接続されているCPUモジュールへの割り込み」などの動作を設定でき、Event Code受信からこれら動作までの遅延時間も独自に設定することができる。

3.2 Main Trigger Station デザイン

Main Trigger Station は SuperKEKB 運転のために改良される。DR 使用に伴い制御が複雑になる陽電子入射のためである。Figure 2 (a) に新しい Main Trigger Station のデザインを示す。1 つの VME バス上に CPU , EVG(3 台) , EVR のモジュールが設置され、Event Timing System は 1 台の EVG の下位に残り 2 台が接続される 2 段構造になっている。図にはないが共有メモリ・モジュール VMIVME-5565 もこの VME バスに設置される。全ての EVG は 114.24MHz の RF クロックと同期して動作するため、Main Trigger Station は 8.8ns 刻みのタイミングでトリガーを生成することができる。

上位 EVG が 2 秒程度の入射スケジュール管理し、1 回の入力トリガーで入射タイミングの Event Code を 100 個程度を 50Hz 相当 (20ms 毎) で生成する。この方法で、入力トリガーを 11.34ms 周期の基準信号と同期させることで、生成される Event Code すべてをこの基準信号と同期することができる。また 2 秒程度の入射リングが事前にスケジュールされているため、DR へ陽電子入射時、その「MR への出射が何パルス後か?」知ることができる。以上により SuperKEKB 陽電子パルスの入射バケット選択用の遅延時間を計算することができる。

ただし実際にこの遅延時間を生成するのは下位 2 台の EVG である。これらは上位 EVG とは独立に 20ms 毎に動作する。上位 EVG からタイミング信号を受信し、そこにバケット選択用の遅延時間を足して、Linac 各所に送信する。2 台の下位 EVG は並列であり、Linac 前後半それぞれの動作を制御し、陽電子入射時には別々に、電子入射時は同時に動作する。

4. EVENT TIMING SYSTEM 性能試験

Event Timing System の性能試験を基に、Main Trigger Station が生成するトリガーの時間精度や長期安定性について議論する。前述の通り SuperKEKB では「入射スケジュールの管理」「バケット選択制御用の遅延時間の生成」も Event Timing System 内で行われる。これにより、Event Timing System のセットアップは変更され、EVG の「今まで使用していなかった機能」が用いられるため、それを踏まえた以下の試験を行った。

4.1 タイミング精度試験

Main Trigger Station が配るタイミング信号に要求される時間精度は $O(100)$ ps である。より高い時間精度を求められる機器 (電子銃など) も、受信トリガーにこれだけの精度があれば、RF クロックと再同期し < 10 ps の精度で動作させることが可能である。

前節の Main Trigger Station デザインにある通り、2 つの EVG を直列に接続した Figure 2 (b) のセットアップで時間精度を測定した。Event Timing System の出力をトリガーとして 114.24MHz の RF クロックの位相が 0 度となる時間を測定した。オシロスコープの等価時間サンプリング機能を用いることで、1ps 未満の測定精度を実現している。最下流の EVR は制御対象機器のそばに設置されるべきものだが、この試験では同一の VME サブラックに設置し制御している。Figure 3 は測定結果の 1 例である。1000 個程度の測定結果を集め、その平均値、標準偏差をタイミングとその不定性 (jitter) とした。

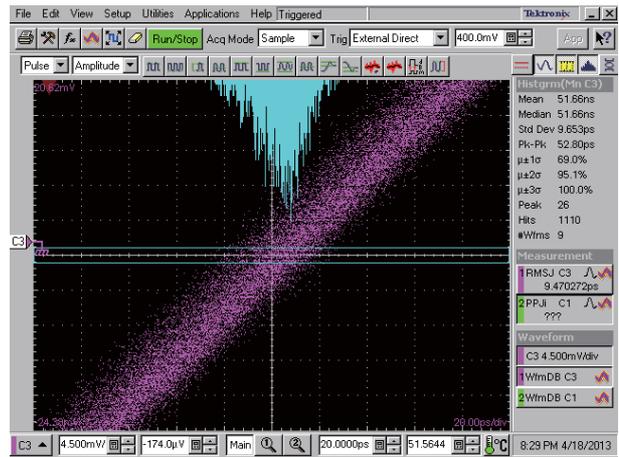


Figure 3: An example picture of the timing measurement by oscilloscope. The mean and standard deviation of light blue histogram are defined as timing and its jitter.

Figure 2 (a) の 1 段目の EVG は入力トリガーから Event Code の送信までに 0-2 秒程度の遅延時間を与える必要がある。これは 2 秒程度の入射スケジュールを管理し、1 回の入力トリガーでそのタイミング信号を送信するためである。KEKB ではここまで長い遅延時間で動作させた実績がないため、そのときの時間精度を試験した。1 段目の EVG に最大 2 秒程度までの遅延時間を与えた時の出力タイミングの不定性を見たものが Figure 4 である。横軸の遅延時間は RF クロック単位になっており、1 クロック = 8.8ns である。このとき 2 段目 EVG の遅延時間は常に 1 クロックに設定した。タイミング不定性は遅延時間によらず一定で 10ps であった。これにより新しい Main Trigger Station が生成するタイミング信号の精度も 10ps と考えられる。

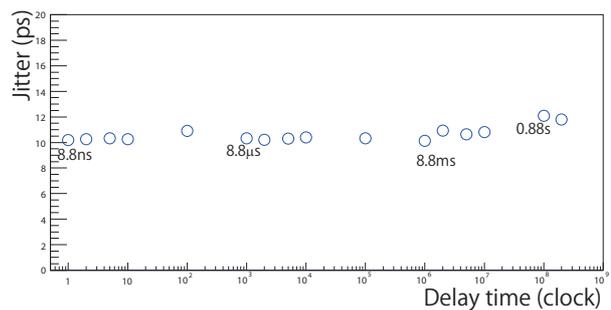


Figure 4: Timing jitter vs delay time of upstream EVG. The delay time of EVG from input trigger is explained in RF clocks with 114.24 MHz. One clock corresponds 8.8ns of delay.

4.2 タイミング長期変動試験

Main Trigger Station の長期安定性を調べるため、VME サブラック付近の温度をモニターしながら、前述のタイミング測定を繰り返し行った。Figure 5 は 2013 年 6 月 13 日から 5 日間行った測定の結果である。温度測定の結果には空調器の温度管理による小さな温度変化が見

て取れる。タイミング(測定の平均値)の測定結果も温度変化に合わせ明らかに変化している。これらを2次元分布で見たのが Figure 6 である。両者にはきれいな相関があり、傾きから、タイミングは温度変化により 18ps/°C のドリフトを起こすことがわかった。温度とタイミングの不定性の間には、有意な相関は見られなかった。

長期運転の動作安定性を考えるとこの効果は無視できない。しかし Main Trigger Station 付近の温度を 1 以内で空調管理することは可能であり、温度変化による不定性は 100ps 未満に抑えることができる。

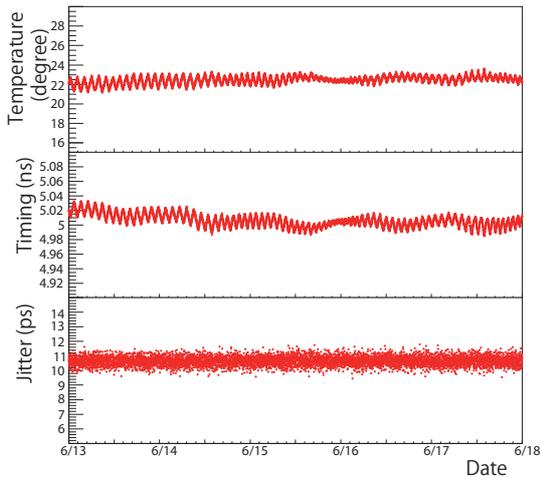


Figure 5: Timing and temperature measurements for five days. The timing of EVR output, its jitter, and temperature around VME sub-lack are measured in every minutes and plotted. The periodic deviation of temperature is caused by air conditioning and results of timing are correlated.

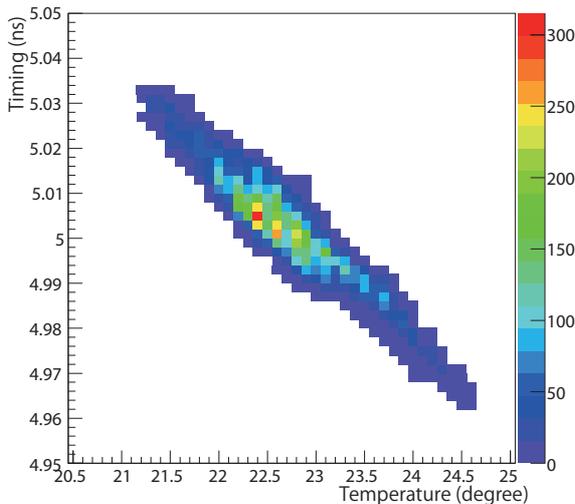


Figure 6: Timing of EVR vs temperature. The 2D plot made with results in Figure 5. The slope is evaluated by fitting with 1D polynomial function to be -18.00 ± 0.16 ps/°C.

5. 光ケーブル転送試験

この節では光ケーブルに起因する転送時間の不定性を議論する。Main Trigger Station からの Event Code は KEKB 制御棟へも転送される。この時の転送距離は 1km 以上に及び、光ケーブル転送に起因する不定性も無視できなくなる。このため、KEKB 制御棟で生成した光信号を Main Trigger Station との間で往復させ、その転送時間を測定した。

Main Trigger Station-KEKB 制御棟間を 1-4 往復にさせた時の転送時間を Table 1 にまとめた。測定は Event Timing System の試験と同様にオシロスコープで行い、測定分布から転送時間とその不定性を決定した。転送時間もさることながら、不定性も往復回数の増加と共に大きくなっており、この測定は光ケーブルでの信号転送による時間精度の悪化を見ることができている。結果より Main Trigger Station-KEKB 制御棟の片道分の信号転送には 30ps 程度の時間不定性があると考えられる。

Event Code 転送用光ケーブルが敷設された共同溝内は、外気温の影響を受ける。そのため転送時間の外気温依存性も測定した。Figure 7 は外気温をモニターしながら、1 往復の転送時間を測定し作った 2 次元分布である。縦軸の転送時間は Main Trigger Station-KEKB 制御棟間の片道分に補正してある。転送時間と外気温の間には相関があり、転送時間に 3ps/°C 程度のドリフトが確認できた。この効果もまた転送時間の不定性を作る。

Main Trigger Station から KEKB 制御棟への Event Code 転送の際、これらの「光ケーブルに起因する効果」が転送時間の支配的な不定性になる。それでも不定性は 100ps 未満と考えられ、前述した時間精度要求は満たされている。

Table 1: Results of transmission time between Main Trigger Station and KEKB control building. Both transmission time and its jitter become large with the transmission distance and effects of optical transmission are observed. The distance is expressed in the unit of round-trip.

Distance	Transmission time (μ s)	Jitter (ps)
1	8.9	62
2	17.7	96
3	26.5	106
4	35.3	233

6. まとめと今後

SuperKEKB プロジェクトにおいて入射器 Linac に必要とされる入射制御を議論した。陽電子パルス入射は、DR を使用するため、「入射リング選択制御」「入射バケット選択制御」共に KEKB 時より複雑になる。

この陽電子入射を実現するために Main Trigger Station に改良を加える。新しいデザインでは Event Timing System の EVG が直列に接続され 2 段階になる。今まで CPU や別の機器で行われていた「長期間の入射スケジュール管理」「入射バケット選択用の遅延時間生成」も今後はこの Event Timing System 中で行われる。

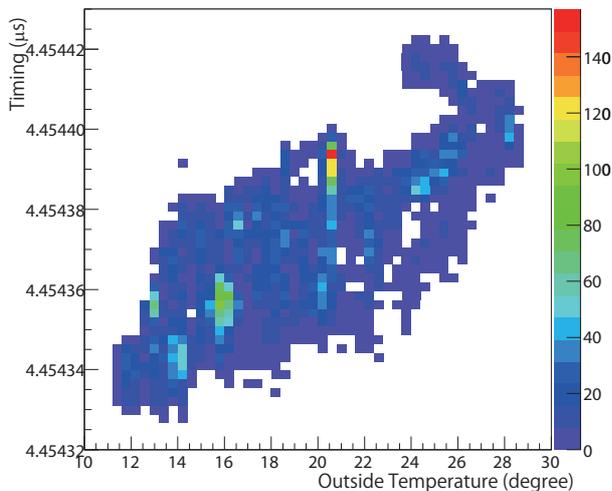


Figure 7: Transmission time vs outside temperature. The slope is evaluated by fitting with 1D polynomial function to be $3.42 \pm 0.06\text{ps}$.

Main Trigger Station には $O(100)\text{ps}$ 精度のタイミング信号を供給することが要求されている。Event Timing System モジュールは KEKB 時代と同じものを使用するが、今までと違うセットアップであり、以前は使用しなかった機能が用いられるため、それらの性能試験を行った。

入力トリガーからの遅延時間として、2 秒程度までの長い遅延を生成して時間精度を調べた。この試験は、Main Trigger Station のデザインと同じく、EVG を直列に接続し 2 段階にしたセットアップで行い、その精度が 10ps であることを確認した。

長期間の動作安定性を試験したところ、上述の遅延時間は温度変化により 18ps/ 程度ドリフトすることがわかった。しかし、Event Timing System をしっかりとした空調管理の基に運用する限り、この効果は問題にならない。

光ケーブル部分に起因する転送時間の不定性も考察した。最も転送距離が長い Main Trigger Station-KEKB 制御棟間で転送試験を行い、不定性が 100ps 未満であることが見積もられた。

今後は、2015 年初頭の運転開始に向けて、Main Trigger Station の実機製作を行っていく。2014 年中旬に完成させ、同年後半にコミショニングを行うことを目標にしている。

また今回の Main Trigger Station デザインは近い将来のアップグレード計画にも対応できる。SuperKEKB 運転開始後、陽電子入射をより円滑に行うため、陽電子ダンピング中に「DR の RF 周波数の変更」、陽電子を DR から MR へ入射時に「Linac 後半の RF 位相の変調」できる様にアップグレードする。これらは Main Trigger Station からの指示で 50Hz 入射パルス毎に行われるが、指示の信号に専用の機器やネットワークは用いず、Event Timing System のデータバッファ転送機能を用いる予定である。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi et al., "Accelerator design at SuperKEKB", Prog. Theor. Exp. Phys., 2013, 03A011.
K. Abe et al., "Letter of Intent for KEK Super B Factory", KEK Report 2004-4.
- [2] T. Abe et al., "Achievements of KEKB", Prog. Theor. Exp. Phys., 2013, 03A001.
K. Oide, "KEKB B-Facility", Prog. Theor. Phys. 122, 2009, pp.69-80.
S. Kurokawa et al., "Overview of the KEKB accelerators", Nucl. Instrum. Meth. A 499, 2003, pp.1-7.
- [3] T. Abe et al., "Achievements of KEKB", Prog. Theor. Exp. Phys., 2013, 03A001.
- [4] M. Akemoto et al., "The KEKB injector linac", Prog. Theor. Exp. Phys., 2013, 03A002.
- [5] E. Kikutani et al., "KEKB Bucket Selection System, Present and Future", Proceedings of the 7th Annual Meeting of PASJ, August 4-6 2010, Himeji, Japan.
- [6] <http://www.kek.jp/ja/Facility/IMSS/PF/PFRing/>
- [7] <http://www.kek.jp/ja/Facility/IMSS/PF/PFAR/>
- [8] K. Furukawa et al., "Injection Beam Scheduling at SuperKEKB Complex through Damping Ring", Proceedings of the 7th Annual Meeting of PASJ, August 4-6 2010, Himeji, Japan.
- [9] <http://defense.ge-ip.com/products/vme-5565/p1288>.
- [10] <http://www.mrf.fi/index.php/vme-products>.