

J-PARC メインリング 入射補正キッカー電磁石のアップグレード UPGRADE OF THE COMPENSATION KICKER MAGNET FOR J-PARC MAIN RING

杉本拓也^{*A)}、石井恒次^{A)}、松本浩^{A)}、芝田達伸^{A)}、Kuanjun Fan^{B)}、外山毅^{A)}
Takuya Sugimoto^{*A)}, Koji Ishii^{A)}, Hiroshi Matsumoto^{A)}, Tatsunobu Shibata^{A)}, Kuanjun Fan^{B)}, Takeshi Toyama^{A)},
^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
^{B)}Huazhong University of Science and Technology (HUST)

Abstract

A compensation kicker magnet (CKM) for the main ring (MR) of J-PARC has been developed to correct the large betatron oscillation of the circulating bunches which were deflected by the reflection pulses of an injection kicker magnet (IKM) for the MR. Two lumped-constant type kicker magnets which are designed as a window-frame with a ferrite yoke are employed. The magnetic field was measured by using a small pickup coil and a long coil to evaluate the kick strength. The CKM have been installed at 80m downstream from the IKM on January 2016. Since February 2016, the CKM has been operated for the user operation. In this paper, the basic design, the result of the standalone test and the beam test are discussed.

1. はじめに

J-PARC 加速器は、400MeV の線形加速器 (Linac)、3GeV の Rapid Cycling Synchrotron (RCS)、30GeV の Main Ring (MR) の 3 つの加速器から構成される。MR は、T2K 実験とハドロン実験に向けて陽子ビームを供給しており、2016 年には最大 415kW の出力で T2K 実験にビームを供給する事に成功した [1]。MR へは、RCS から 40msec 毎に 2 バンチずつ 4 回の入射タイミング (K1 から K4) に分けて入射され、計 8 個の陽子バンチが 2 つのセプトム電磁石と、4 台のキッカー電磁石を用いて周回軌道に導かれる。Figure 1 に入射キッカー電磁石 (IKM) の励磁電流波形と、それぞれの入射タイミングにおける陽子バンチの位置を示す。フラットトップにおける電流は約 2700A で、4 台合わせた蹴り角は 7.26mrad (積分磁場 $BL=92.78 \times 10^{-3}$) である。リング内には、計 8 個の陽子バンチが蓄積され、1.4 秒かけて 30GeV まで加速される。リングの周長が 1567.8m であるので、陽子バンチは約 5.38 μ s でリングを 1 周する。MR の加速高周波ハーモニック数は 9 であるが、早い取り出し用キッカー電磁石の立ち上がり時間 (約 1 μ s) を確保するために、1 つのバケツが空になっている。そのため、バンチの間隔は $5.38\mu\text{s}/9 = 597.7\text{ns}$ となる。2013 年に行った IKM の回路の改良 (スピードアップ回路の導入) により、励磁電流波形の立ち上がり時間を、400ns から 200ns (1-99%) にまで改善した [2]。これにより、高周波加速電圧に 2 倍高調波を重畳させ、バンチ幅を最大で 400ns まで伸ばす事が可能となり、バンチングファクターを改善することが可能となった。しかしながら、回路のインピーダンス不整合により、励磁電流波形に 2 つの反射波が生じてしまった。これらにより、複数の周回バンチ (K3 タイミングの #1 バンチ、ならびに K4 タイミングの #2 と #3 バンチ) が反射波の作る残留磁場 ($4.2 \times 10^{-3}\text{Tm}$ 、蹴り角にして 0.33mrad) によって蹴られてしまい、コヒーレント振動が誘起される事により、ビームロスの主な原因となっている事が

分かっていた [3]。これを補正するために、2014 年に 1 台のキッカー電磁石 (CKM2014、磁極長 1000mm) を IKM の下流に導入し、1 つのマグネットに 2 つの反射波の影響を補正する事にした。2 山の反射波と同じ波形を再現するために、2 つの PFL の下流に独立にダイオードを接続し、それぞれの電荷を時間差で放電するという方式を試みた。しかしながら、ダイオードのもつ順方向電圧降下によりパルスが反射してしまい、波形が崩れてしまった [4]。よって、キッカー電磁石を 2 台に分割し、1 つの反射波を 1 つの電磁石で補正するシステムに改良する事にした。本論文では、2015 年に行ったキッカー電磁石の改造の詳細と、磁場測定、インピーダンス測定、ならびに陽子ビームを用いた試験結果について報告する。

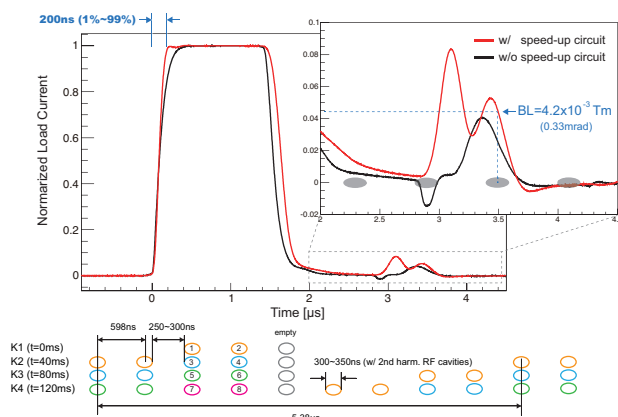


Figure 1: Pulse waveform of the injection kicker magnet. Reflection pulses are expanded. Injected and circulating bunches are represented by ellipses.

2. 入射補正キッカー電磁石

2.1 マグネット構造

改造後の補正キッカー電磁石 (CKM2015) の主なパラメータを Table 1 に示す。CKM2014 の磁極を 2 分

* takuya.sugimoto@j-parc.jp

割し、さらにコイル間の絶縁距離を取るために、新たな磁極長を470mmとした。Figure 2にCKM2015の断面図と全体図を示す。上流側をCKM1、下流側をCKM2と呼ぶ事とする。内面がTiNでコーティング(厚さ100nm)された、長さ1560mmのセラミックダクトと、フェライト(CMD10)は再利用した。セラミックダクトの両端にはスリーブ(Ti製)がロウ付けされていて、上下流のビームダクト(SUS316製)と接続される。マグネットの外側は、アルミ製シールドで覆われており、TiスリーブとRFコンタクトを通じて接触している。ビームが通過する際に流れるイメージ電流の多くは、このアルミシールドを通る事となる。

Table 1: Kicker System Parameters

Item	Design Value
Max. kick strength [Tm]	6.1×10^{-3}
Magnet length [mm]	470
Physical Aperture [mm]	$\phi 130$
Magnet inductance [nH]	450
Number of magnets	2
Termination resistance [Ω]	5
Max. charging voltage [kV]	40
Max. peak current [kA]	1.4
Pulse width [μ s]	0.4

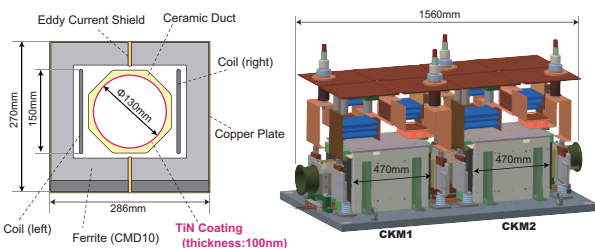


Figure 2: Cross section and schematic drawing of CKM2015.

Figure 3にMRの入射直線部の写真、ならびに入射機器の位置関係を示した概念図を示す。CKM2014と同様に、IKMからの位相進行を考慮し、他の機器との干渉が無いIKMの下流約80mの場所にCKM2015を設置した。

最近の研究結果より、これまでの運転チューン $(\nu_x, \nu_y) = (22.4, 22.0)$ と、新しい運転チューン $(21.35, 21.43)$ ¹では、新しいチューンの方がより大強度の運転に適している事が示された[1]。これら2つのチューンにおいて、CKMの設置場所におけるIKMからの位相進行(Δ phase)と、CKMの磁場の方向(polarity)、および励磁タイミング(timing)を、SADを用いたシミュレーションで評価し、結果をTable 2にまとめた。タイミングは、IKMが励磁した直後を0 turnとする。磁場の向きは、陽子ビームが蹴られる方向がリング外側(OUT)または内側(IN)を示している。IKMの場合、鉛直上向きの磁場を発生させる事により、RCSから

¹CKM 設計時は (21.41, 21.43) が検討されていた。

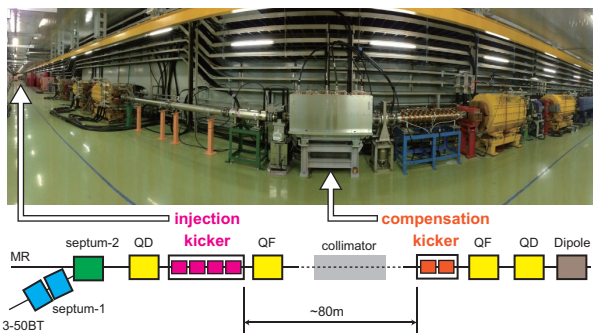


Figure 3: Picture and schematic drawing of the injection straight section of J-PARC MR.

のビームをリング外側(OUT)に向かって蹴っている。このシミュレーション結果より、No.2またはNo.4がCKMの最適な動作条件(つまり Δ phaseが180の整数倍)であることがわかり、CKM2015はINまたはOUTのどちらにも蹴られることが要求された。そのため、高圧コネクタと回路系の間を繋ぐ導電板ならびに回路系を、ビーム軸に対して左右対称に製作した。これにより、部品を左右で入れ替えることで、磁場の極性を変えることが可能となった。しかしながら、極性を変更するためには、トンネル内アクセスが必要となるため、両極性のパルス電源の開発を検討している。

Table 2: Results of SAD Simulation

No.	tune	timing	polarity	Δ phase
1	(22.40, 20.75)	0 turn	IN	325
2	(22.40, 20.75)	-1 turn	OUT	-178
3	(21.41, 21.43)	0 turn	IN	236
4	(21.41, 21.43)	0 turn	OUT	56
5	(21.41, 21.43)	+1 turn	IN	-178

2.2 パルス電源と回路構成

CKM2015とパルス電源の等価回路を図4に示す。PFLへの高圧充電器とサイラトロン、そしてそれらの制御回路を含むパルス電源は、IKM用として製作された電源(ニチコン社製)の予備機を利用した。1つのシステムには、サイラトロン(e2V社CX1193)とPFL($Z_0 = 20\Omega$ の同軸ケーブルが2並列)が1組と、2つの向き合ったコイル(Figure 2中のrightとleft)が接続されている。1台の電源に2つのシステム(つまり、2つのサイラトロンと、2つのPFL)が搭載されている。2014年に敷設された4本の送電用高圧同軸ケーブルを再利用するために、1枚のコイル板に対し、1本の同軸ケーブルを接続する方式を採用した。1つのPFLで左右の向かい合ったコイルを励磁するために、サイラトロン下流で2つに分流している。サイラトロンのグリッドトリガー信号のタイミングを変える事で、上下流のキッカー電磁石を独立に励磁する事が出来る。それぞれのコイルには、反射波を抑えつつピーク電流が大きくなるよう、5 Ω の終端抵抗が接続されている。インピーダンス整合、ならびにビームが

CKM2015 を通過する事により誘起される電流が流れる経路として働く RC 回路が、コイルと並列に接続されている。終端抵抗値ならびに RC 回路の時定数は、共に LTSpice を用いて決定した。PFL のケーブル長もまた、LTSpice を用いて評価し、IKM 励磁電流の反射波形とほぼ一致する 5m を採用した。

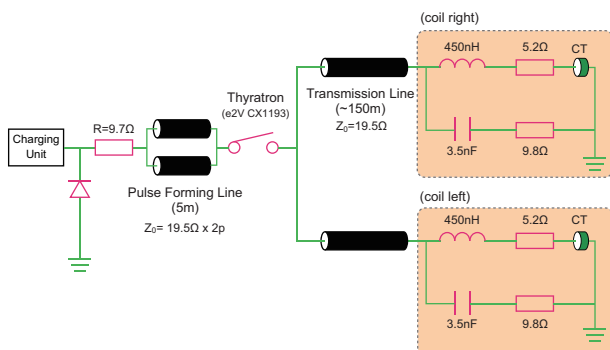


Figure 4: Circuit diagram of the CKM2015 system.

3. 動作試験

トンネル内でマグネットを組み立てたのち、動作試験として励磁電流波形、磁場分布、ならびにインピーダンスを測定した。

3.1 パルス電流波形

Figure 5 に、IKM 励磁電流の反射波と、今回測定された CKM2015 の励磁電流パルスの波形を示す。回路定数の調整をする事なく、反射波にきれいに一致させる事が出来た。コイルの形状から計算されるインダクタンスが 330nH であるのに対し、LTSpice を用いて波形から見積もったインダクタンスは 450nH であった。これより、120nH 程度の浮遊インダクタンスが回路系に存在する事がわかった。

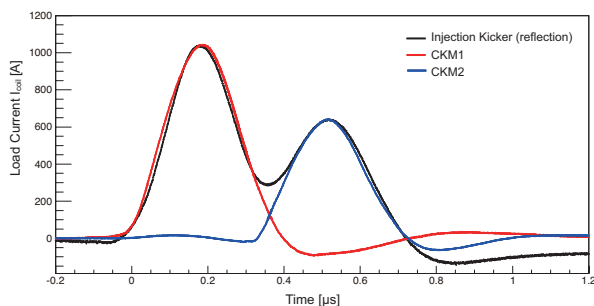


Figure 5: Pulse waveform for kickers.

3.2 磁場分布

磁場の測定には、それぞれ 1 ターンのショートコイル (30mm × 20mm) とロングコイル (2500mm × 5mm) の 2 種類のサーチコイルを用いた。ショートコイルの製作には、センサー部以外で誘導される電圧がキャンセルされるよう、より線 (直径 100μm) を用いた。ビーム軸に沿った磁場強度の分布を測定するために、シ

ョートコイルを長さ 2m のパイプ (FRP 製) の先端に固定し、更にそのパイプを電動アクチュエーターに固定して水平面上での位置を制御した。スキャンを開始する前のショートコイルの初期位置は、セオドライトを用いて確認した。ロングコイルは、ダクト内に専用の器具を置き、その上に乗せて測定した。コイルに誘起された電圧データは、オシロスコープ (LeCroy Waverunner 66Zi) を用いて取得した。同時に、CT で測定された励磁電流も、オシロスコープ (Tektronix DSO4054) を用いて取得した。測定中は、オシロスコープの積分機能を用いて磁場の値を確認した。オフセットを差し引いた正確な磁場は、誘導電圧データをオフライン解析で時間積分する事により求めた。Figure 6 に、ショートコイルを用いて測定した、マグネット中心における垂直磁場 (By) の分布を示す。上下流それぞれのキッカー電磁石の磁場分布を個別に評価するために、一方のコイルを励磁している際は、他方のコイルはオフにした。磁場分布のシミュレーションには、Cobham 社の Opera3D を用いた。シミュレーションと実測がよく一致している事が確認でき、設計通りに動作している事が確認できた。

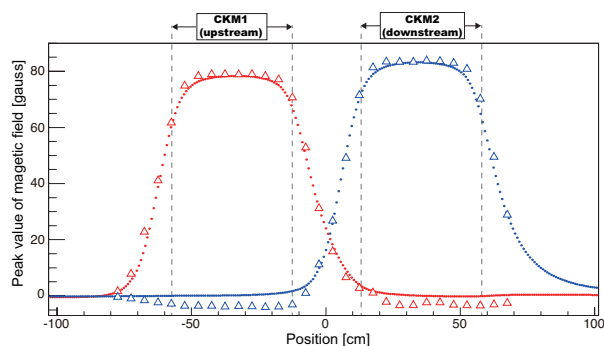


Figure 6: Magnetic field distribution [G] at the center of the CKM (open triangle: measured data, closed circle: simulated data).

次に、ロングコイルを用いて測定した、マグネット中心における垂直磁場 (By) の積分磁場波形を Figure 7 に示す。CKM1 ならびに CKM2 の励磁電流のタイミング差 Δt を変化させると、それに伴って磁場波形も変化している事がわかった。

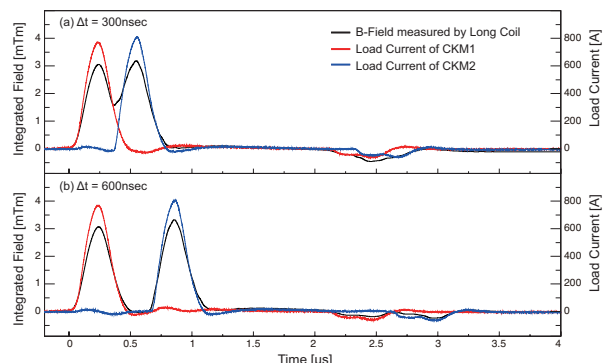


Figure 7: Waveform of long pickup coil and load current.

次に、ロングコイルを用いて測定した、積分磁場と励磁電流の関係を Figure 8 に示す。CKM1 と CKM2 の励磁タイミング差 $\Delta t=300\text{ns}$ で測定した。CKM1 に比べ、CKM2 の方が、同じ電流値に対して積分磁場が少し小さい事が分かった。これについては、Figure 7 (a) において、CKM1 の電流波形のテールが作る磁場が、CKM2 にも影響しているからではないかと考えている。

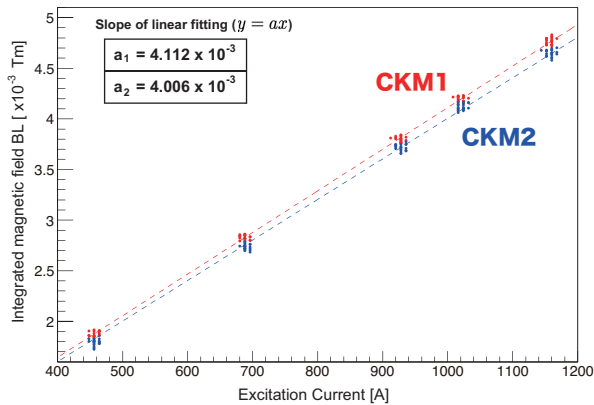


Figure 8: Integrated field vs excitation current ($\Delta t=300\text{ns}$).

3.3 インピーダンス測定

セラミックダクトの中心に銅線 (直径 $160\mu\text{m}$) を張り、ネットワークアナライザ (Agilent E5071) を用いて透過率 S_{12} を測定する事で、ビームが補正キッカー電磁石内を通過する際に感じるインピーダンスを測定する事が出来る [5, 6]。Figure 9 に、縦方向のインピーダンス (Z_L) の測定結果を示す。高周波側 (70MHz 付近) でインピーダンスが大きくなったのは、マグネットを 2 分割した事によるものであると考えている。また、低周波側 (20MHz 以下) でインピーダンスが小さくなったのは、CKM2014 のコイル中点に取り付けていたインピーダンス低減回路を取り外し、代わりに IKM と同じ方式の RC 回路を取り付けた事で、ビーム電流が流れる経路が出来たからだと考えている。IKM と比べて、CKM2015 の高周波側のピーク位置が低周波側に移動しているのは、CKM2015 の方が磁極長が短い事が影響しているのではないかと考えている。低周波側で見られる振動を含め、これら違いをより定量的に理解するため、シミュレーションを用いた評価を進めている。

4. ビーム試験

2016 年 1 月末にビームラインに設置し、ビームを用いた性能試験を行った。

4.1 励磁タイミングと蹴り角の評価

まず最初に、入射した直後のバンチ (バンチ幅を 50ns に調整) を用いて、励磁タイミングの調整を行った。評価の指標として、IKM の直後に設置された 2 台の BPM (Beam Position Monitor) で求めた、IKM の位置における位相空間の広がり (水平方向の入射エラー Δx 、詳細は [7] を参照) を用いた。補正キッカー

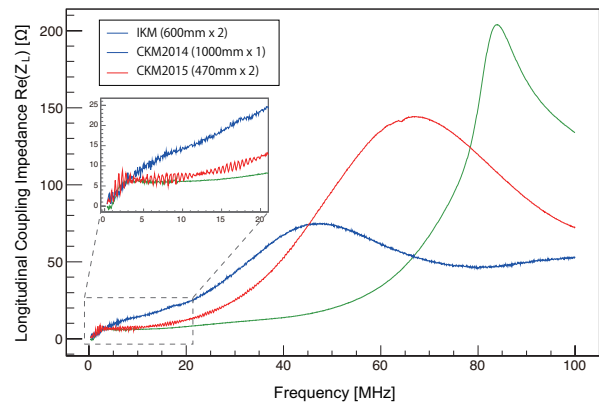


Figure 9: Comparison of frequency dependence of longitudinal coupling impedance (real part).

での最大蹴り角も同時に評価するため、ピーク電流を 1.4kA (PFL 充電電圧 40kV) とし、CKM1 と CKM2 のタイミング差 $\Delta t=0\text{ns}$ とした。Figure 10 に測定結果を示す。比較のため、測定データに励磁電流波形を重ね書きした。励磁トリガー信号のタイミングを変化させて Δx を測定すると、補正キッカーの励磁電流波形と相似形で、 Δx が変化していることを確認した。2 台の BPM のデータから、ピークにおける蹴り角は 0.96 mrad と評価された。これは、積分磁場に於いて $12.3 \times 10^{-3} [\text{Tm}]$ に相当し、励磁電流が 1.4kA の時の 1 台あたりの積分磁場が $6.12 \times 10^{-3} [\text{Tm}]$ という、ロングコイルを用いた測定結果とほぼ一致した。

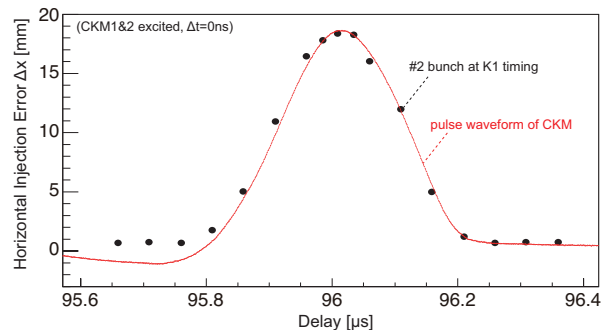


Figure 10: Beam based timing measurement.

4.2 周回バンチの補正

次に、K3 タイミングにおける #1 バンチを蹴るタイミングに合わせて、励磁電流の調整を行った。Figure 11 に結果を示す。横軸は、Figure 8 を用いて、励磁電流を蹴り角に変換した。左図は Table 2 の No.2 の場合を、右図は Table 2 の No.4 の場合を示す。 Δx_{init} は、CKM で補正する前 (すなわち、CKM が OFF) の入射エラーを示す。条件 No.2 では、位相差がほぼ -180 度であるので、大きな補正の効果が得られた。これに対し、条件 No.4 では、位相差が 56 度しか回っていないため、極小値は存在するものの、ほとんど補正されていない事を確認した。

入射エラーが最小になる励磁電流で運転した際の、K1 タイミングと K3 タイミングにおける #1 バンチの

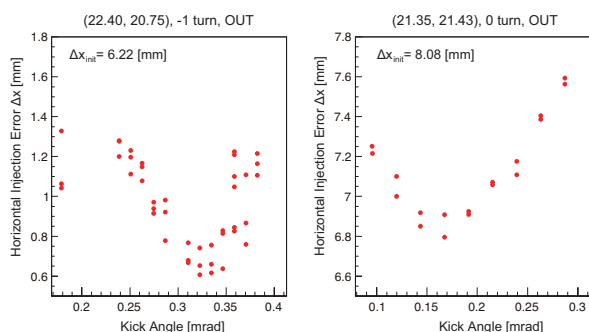


Figure 11: Kick angle dependency of injection error Δx for #1 circulating bunch at K3 timing. Δx_{init} is the error without CKM.

位相空間の比較を Figure 12 に示す。この時の運転条件は、Table 2 の No.2 を用いた。CKM2 の励磁タイミングを -1 turn に、充電電圧を 27kV (蹴り角 0.33mrad に相当) に設定した。IKM の反射波で蹴られる事により広がっていた位相空間が、CKM を用いる事より、入射直後と同程度にまで補正できている事を確認した。

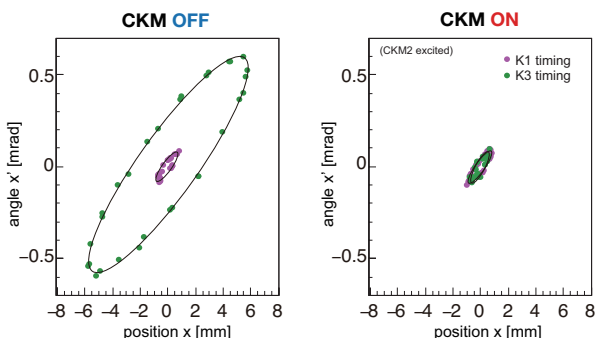


Figure 12: Comparison of the phase space ellipses of #1 bunch between K1 and K3 timing.

4.3 ビームロスの評価

最後に、大強度ビーム (バンチ幅 150ns) を用い、ビームロスの評価を行った。リング内に設置された DCCT を用いて測定した、リング内の粒子数分布を Figure 13 に示す。K3 タイミングでの入射直後から下がっていた粒子数が、CKM を用いることで改善していることがわかる。現行の運転チューン (22.40, 20.75) における 160kW 相当ビームを用いたテスト運転で、ビームロスが 170W から 51W にまで減少している事を確認したが、新しい運転チューン (21.35, 21.43) では、位相進行が良くないため、ほとんどロスが変わらなかった。

5. まとめと今後

J-PARC MR において、入射キッカー電磁石 (IKM) の反射波により蹴られた周回ビームを補正するために、2014 年に補正キッカー電磁石 (CKM2014) を導入した。1 台の電磁石で 2 つのパルス磁場を生成しようとしたが、整流用ダイオードによる反射波の影響で、パルス磁場波形に大きなテールが観測された。その

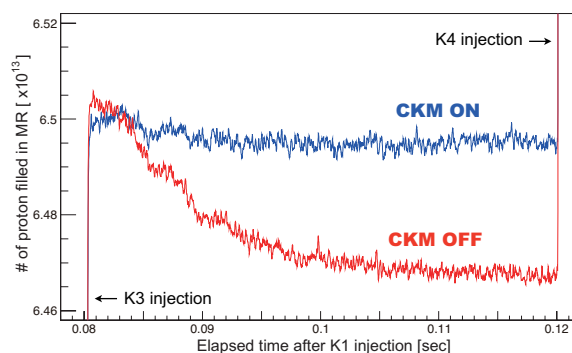


Figure 13: Beam Intensity measured by DCCT during K3 injection period.

ため、磁極を 2 分割し、2 台の電磁石で 2 つのパルス磁場を生成する方式に変更した (CKM2015)。2016 年 1 月にビームラインにインストールし、従来の運転チューンでのビームを用いた試験では、反射波により蹴られた周回ビーム (K3 タイミングにおける #1 バンチ) の位相空間が改善し、ビームロスが約 3 分の 1 にまで減少した事を確認した。2016 年 2 月からは、T2K 実験への運転で利用されるようになった。2016 年 10 月以降の運転からは、CKM2015 の磁場の方向を (IN) に変更し、新しい運転チューンで効果的な補正ができることを目指す (Table 2 の No.5)。さらに、IKM のテール部で蹴られている周回ビーム (K4 タイミングにおける #1 バンチ) の補正も行い、さらなるビームロス低減を目指す予定である。

参考文献

- [1] S. Igarashi, "Recent progress of J-PARC MR beam commissioning and operation" in *Proc. HB2016*, Malmo, Sweden, 2016.
- [2] T. Sugimoto *et al.*, "Upgrade of the Injection Kicker System for J-PARC Main Ring", in *Proc. IPAC2014*, Dresden, Germany, Jun. 2014, paper MOPME069, pp. 526-528.
- [3] Y. Kurimoto *et al.*, "The Bunch by Bunch Feedback System in the J-PARC Main Ring", in *Proc. DIPAC2011*, Hamburg, Germany, May 2011, paper TUPD74, pp. 482-484.
- [4] T. Sugimoto *et al.*, "Performance of the compensation kicker magnet for J-PARC main ring injection", in *Proc. PASJ10*, Tsuruga, Japan, Aug. 2014, THOM01.
- [5] T. Toyama *et al.*, "Coupling Impedance of the J-PARC Kicker Magnets," in *Proc. HB2006*, Tsukuba, Japan, May 2006, paper TUBX03, pp. 140-142.
- [6] K. Fan *et al.*, "Coupling Impedance Study of the Injection Kicker Magnets of the J-PARC Main Ring" in *Proc. IPAC12*, New Orleans, USA, 2012, paper THPPP003, pp. 140-142.
- [7] S. Hatakeyama *et al.*, "A Phase Space Monitoring of Injected Beam of J-PARC MR," in *Proc. 2nd International Symposium on Science at J-PARC*, Tsukuba, Japan, vol. 012001, pp. 2-7.