

KICKER SYSTEM FOR THE DECAY MUON BEAMLINE AT J-PARC

Hiroshi Fujimori #, Patrick Strasser, Kunio Koseki, Yoichiro Hori, Hiroshi Matsumoto,
 Yoshiro Irie, Kusuo Nishiyama and Yasuhiro Miyake
 High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

The double pulse proton beam from the J-PARC 3GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) hits the muon production target in the Material Life Science Facility (MLF), and produces muon pulses. The muon pulses are then transported through the decay muon line to the experimental areas (D1 and D2). The kicker system is used to separate the muon pulses and feed them to each experimental area simultaneously. Fine tuning of pulse shape to meet the requirements on the rise time and uniformity at the flat top is in progress.

J-PARC におけるミュオンキッカーシステムの現状

1. はじめに

J-PARC 物質生命科学実験施設 (MLF) ミュオンセクションでは加速器 (RCS) からのパルス陽子ビーム (3GeV, 25Hz) をグラフィイト標的に当て、発生した 2 バンチのミュオン粒子を二次ライン (崩壊ミュオンライン: 図 1) から下流の二つの実験エリア (D1 または D2) に導く [1]。分岐部には現在、直流偏向電磁石 (DB3) が置かれており、今はどちらか一方の実験エリアにしかビームを供給できない。他方のエリアに供給する際は、その都度電源側で極性を切り替えて対応している。DB3 をキッカーシステムに置き換えることにより、二つの実験エリアに同時にビームを供給できるようになり、ユーザー利用の観点から極めて有益かつ効率的である。

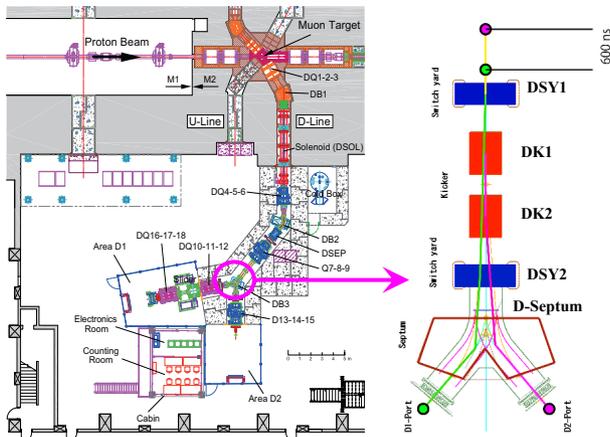


図 1: 崩壊ミュオンライン及びキッカーシステム

2. キッカーシステムの原理

図 1 に示すようにミュオンキッカーシステムは、三種類の電磁石: スwitchヤード (DSY1, DSY2)、キッカー (DK1, DK2)、セプタム (D-Septum) より構成される。崩壊ミュオンラインに導かれたダブ

ルバンチ (繰り返し: 25Hz、バンチ幅: 150nsec、バンチ間隔: 600nsec) のビームを先ずスウィッチヤード 2 台で 4.5 度偏向させ、キッカー電磁石 2 台で第 2 バンチ目だけを逆方向に 4.5 度 (実質 9 度) 偏向させる。その結果、下流のセプタムへは 1 バンチずつ左右の磁極に振り分け入射される。すなわち、ミュオンビームは各々 40 度ずつ (± 40 度) 偏向されて、二箇所の実験エリア (D1 及び D2 実験エリア) へ同時に供給される。そのためには、立ち上がり時間: 400nsec 以下、フラットトップ: $\pm 3\%$ 以内 300nsec 以上の励磁性能がキッカーに求められる [2]。

3. 励磁波形の調整

3.1 フラットトップの改善

ミュオンキッカー回路の概要は図 2 の通りである。負荷にかかる電圧及び励磁電流は、定格ピークで 45kV 及び 6300A となる。

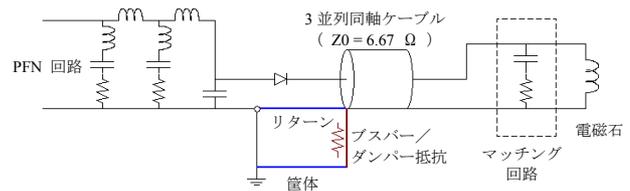


図 2: キッカー回路概要

本来、ケーブルリターンと筐体は DC 的には GND に落ちているが、高周波的にはインダクタンスを持つと考えられ、両者をブスパーで短絡したときと絶縁したときとで励磁波形に相違 (図 3a 及び図 3b) が見られる。絶縁時の波形については、立ち上がり時間は短いが平坦度が悪い。一方、短絡時の波形については、立ち上がりはゆっくりだが、平坦度は良くなっている。この中間辺りで最適値が得られるだろうと考え、ブスパーに代えてダンパー抵抗の挿入を試みた。現在、ダンパー抵抗値は 5Ω で最適化し、図 3c のような波形が得られている。さらに立ち上

fujimori@post.kek.jp

がり時間および平坦度の微調整として、図 4 に示す PFN 回路の可変インダクターの調整があるが、フラットトップにおいて 3%程度の改善が得られた。5 Ω のダンパー抵抗を挿入した時の立ち上がり時間は励磁波形の 5-95%において約 500nsec、フラットトップは±4%程度で約 300nsec となる。



図 3a : リターン管体間→絶縁

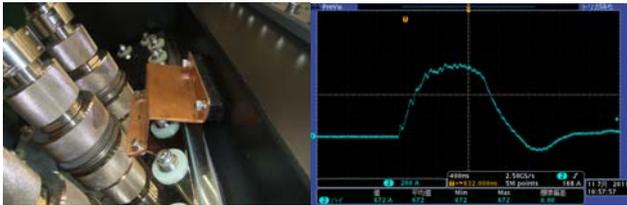


図 3b : リターン管体間→短絡

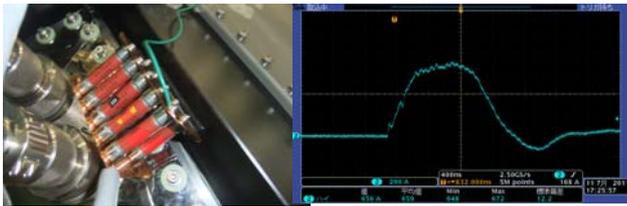


図 3c : リターン管体間→ダンパー抵抗 (5 Ω)



図 4 : 可変インダクターによる平坦度の調整
調整前 (白) 及び調整後 (青)

フラットトップの改善には、今のところ上述の二つの手段 (ダンパー抵抗および可変インダクターの調整) のみである。この他にリングングを抑えるために、ネットワークアナライザーを用いて回路を調査しているが、発生原因の特定には至っていない。フラットトップの平坦度としては±3%以内、300nsec 以上を目指している。一方、立ち上がり時間を短くするために電磁石の磁極長を短くする (フェライトコアを間引く) ことを試みる。

3.2 立ち上がり時間の改善

立ち上がり時間を短くするには、負荷のインダクタンスを小さくすることが効果的である。図 5 に示

すようにキッカー電磁石の磁極は厚さ 50mm のコの字型フェライトを向かい合わせて長さ方向に 8 組 (400mm) 並べた構造である。これらの内の何個かを試験的にテフロンコアと入れ換え、立ち上がり時間の改善を 1 台のキッカーについて実施する。テフロンコアを用いて最適化できれば、テフロンコアをセラミックコアに代えて恒久化を図る予定である。今回は 4 組のフェライトコアをテフロンコアと入れ換えて R&D を行う。



図 5 : フェライトコア (左)、4 組をテフロン製コアに入れ換えた磁極 (右)

フェライトの間引き数は計算コード : OPERA-3d (ELEKTRA) で算出し、運動量 60MeV/c のミュオン粒子を 4.5 度偏向する磁場 (BL 積 1.57E-2 T*m) が得られることを確認した。図 6 にフェライトの間引き数に対する BL 積の計算結果を示す。

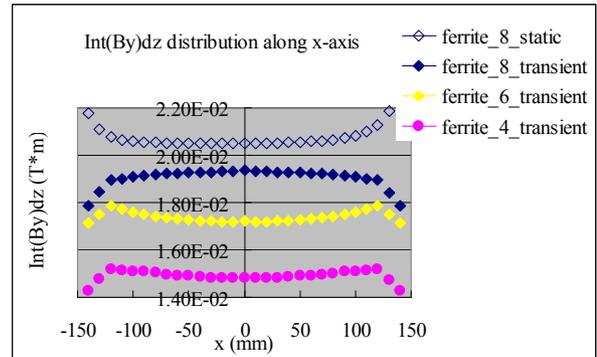


図 6 : オリジナル (フェライトコア 8 組) の静磁場および動磁場、フェライトコアを 2 組および 4 組間引きしたときの BL 積の比較

フェライトコアの残数に対するインダクタンスの比較を表 1 に示す。実測値と計算値の比較は 3 並列のフィードスルーおよび 1 (m) × 3 並列同軸ケーブル (FT+3Cables) を除いた電磁石 (M) のみの値である。

表 1 : インダクタンス比較 (LCR メータ 500kHz)

Ferrite 組	FT+3Cables+M μ H	実測値 μ H	計算値 μ H
8	1.47	1.16	1.12
6	1.22	0.95	1.07
4	1.14	0.91	0.87

実際の負荷のインダクタンスは、これらを加えた値 (実測値については表記通りの結果) となる。

3.3 磁場測定

サーチコイルを用いて実際のパルス励磁における磁場を確認するために図 7 のような回路を作り、コイルの部分に電磁石の中心部に置く。コイルは直径 20mm のガラスエポキシ製の円柱に 0.1mm のエナメル線を 10 ターン巻いたものを用いた。コイルからツイスト状に撚ってフィードスルーを介して RC の積分回路を通し、信号をオシロスコープで観察する。図 8 にコイルから直接見られた波形（微分波形）および積分回路を通した波形（積分波形）を示す。

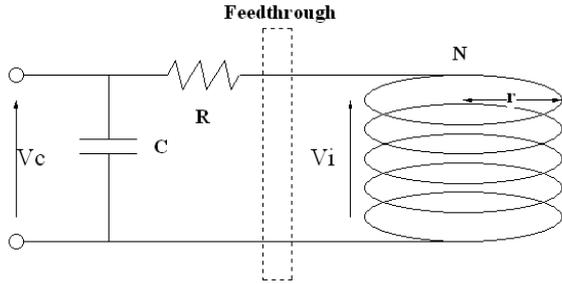


図 7：磁場確認回路の概略（上）および作成した磁場確認回路（積分回路：左、サーチコイル：右）

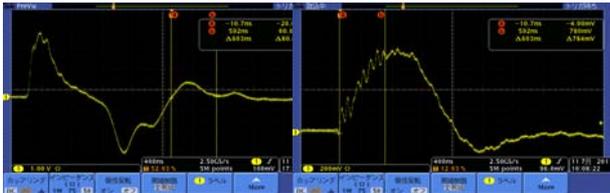


図 8：微分波形（左）、積分波形（右）

電磁石中に置かれたサーチコイルに発生した誘導起電力 V は、コイルの巻き数 $N=10$ Turns、半径 $r=10$ mm ($S=\pi r^2$) として次のよう導かれ、積分回路を通して得られた V_c を測ればピーク磁場 B が求められる。

$$V = N \frac{d\phi}{dt} = N \frac{d(BS)}{dt} = NS \frac{dB}{dt}$$

$$B = \frac{1}{NS} \int V dt = \frac{RC}{NS} V_c, \left(V_c = \frac{1}{RC} \int V dt \right)$$

実際には $R=51 \Omega$ 、 $C=324$ nF を入れて、5kV (700A) 励磁のとき 41.2 Gauss が得られた。磁場計算からは 44 Gauss であるから、良い一致を示していると言える。今後、真空中において定格 (45kV) での中心磁場測定および大気中において低電圧磁場のマッピング測定を行う予定である。

4. 今後の進め方

4.1 平坦度の改善

±3%以内、300nsec 以上のフラットトップを目指し、以下の方法で最適化を行う。

- ケーブルリターンと電源筐体間のダンパー（抵抗）の調整。尚、ダンパーを用いた時はリターン - 筐体間に発生する電圧（電流）に対しての安全対策を施す。
- PFN 回路の可変インダクターの調整。
- リンギング発生元の調査。

4.2 立ち上がり時間の改善

二台のキッカー電磁石の内、一台（フェライトの一部を間引いて磁極長を短くしたもの）について通電試験を実施し、立ち上がり時間の確認および回路パラメータの最適化を行う。尚、平坦度についても上記の改善方法を試みる。

4.3 磁場の確認

サーチコイルを用いての測定を行う。中心磁場については定格 (45kV) までの直線性を確認する。大気中において低電圧でのマッピング測定を実施し、BL 積および磁場領域の一様性を確認する。

4.4 インストールおよび運用

キッカーシステムのインストールは平成 23 年夏を予定している。インストール後も引き続き調整を行い、平成 23 年 12 月のサイクルからの運用を計画している。インストール予定のミュオンキッカーシステムを図 9 に示す。



図 9：ミュオンキッカーシステム

参考文献

- [1] Hiroshi Fujimori, et al., "Field analysis and optimization for decay muon-line magnets in J-PARC", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010
- [2] P. Strasser, H. Fujimori, et al., "New Muon Kicker System for the Decay Muon Beamline at J-PARC", Proceedings of the International Conference on Muon Spin Rotation, Relaxation and Resonance (μ SR2011), May 16-20, 2011, Cancun, Mexico