

J-PARC 崩壊ミュオンビーム輸送系キッカーシステムの現状

STATUS OF KICKER SYSTEM FOR THE DECAY MUON BEAMLINE AT J-PARC

藤森 寛^{#, A)}, 入江吉郎^{A)}, 永谷幸則^{A)}, 竹下聡史^{A)}, 池戸 豊^{A)}, 足立泰平^{A)},
土居内翔伍^{A)}, 梅垣いづみ^{A)}, 橋本亜紀子^{A)}, 湯浅貴裕^{A)}, 坂田茂雄^{B)}, 目黒 学^{B)}
Hiroshi Fujimori^{#, A)}, Yoshiro Irie^{A)}, Yukinori Nagatani^{A)}, Soshi Takeshita^{A)}, Yutaka Ikedo^{A)}, Taihei Adachi^{A)},
Shogo Doiuchi^{A)}, Izumi Umegaki^{A)}, Akiko Hashimoto^{A)}, Takahiro Yuasa^{A)}, Shigeo Sakata^{B)}, Manabu Meguro^{B)}

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

^{B)} Nippon Advanced Technology Co., Ltd. (NAT)

Abstract

The muon kicker system is originally installed to separate a double-pulse muon beam into two single pulses and to feed them to two experimental areas (D1, D2) simultaneously in 2011. It was found, however, that the kicker noise to the particle detector system appeared associated with the ignition of the kicker power supply. The amplitude of the noises ranges from a few tens to several hundreds of millivolts, and the frequency over 6-10 MHz. Varieties of measures have been taken to suppress the noises such as shielding of the power transmission line, reinforcement of the ground line, floating the magnet chamber, application of saturable inductor to suppress the surge current at the kicker ignition and reduction of common-mode current by the ferrite cores. This report summarizes these experimental results.

1. はじめに

J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) における崩壊ミュオンビームラインには、ダブルパルスのミュオンビームを二つのシングルパルスに分け、同時に二つの実験エリアに供給するため、キッカーシステムが導入された [1]。運用当初は検出器へのキッカー由来のノイズの影響が大きく、ほとんど実験にならない状況であったが、銅板遮蔽 (メタルシールド) および GND 対策の効果により一部の検出器において実験が可能になるまでノイズが低減した [2, 3]。しかし、検出器信号よりタイミング信号を抽出する実験においてキッカーノイズの影響は致命的であり、サイクロトロン起動時の突入電流を除去するため、可飽和インダクター [4] およびローパスフィルター [5] を回路に挿入する対策が講じられたが、検出器へのノイズを低減させる根本的対策には至らなかった。今回、今までのノイズ対策から視点を変え、フェライトコアをキッカー伝送ラインおよび検出器側の信号ケーブルに挿入し、共通モードノイズを除去する対策が試行された。

2. キッカーシステムおよびノイズ低減対策

Figure 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: スイッチヤード (DSY1, DSY2)、キッカー (Kicker1, Kicker2)、セプトム (Septum) より構成される。崩壊ミュオンライン (D-line) に導かれたダブルパルスのビーム (繰り返し: 25 Hz、パルス幅: 150 nsec、パルス間隔: 600 nsec) は二つのシングルパルスに分けられ、左右に 40 度 (± 40 度) ずつ偏向されて、二つの実験エリア (D1 Area 及び D2 Area) へ同時に供給されるシステムとして 2011 年に導入された。キッカーシステムを伝送ラインに実装し、いざ励磁してみると、予想外にキッカーノイズが

大きく、特にミュオン検出器信号に影響を及ぼすため、導入当初はキッカーを用いるシングルパルスの実験ができない状態が続いた。

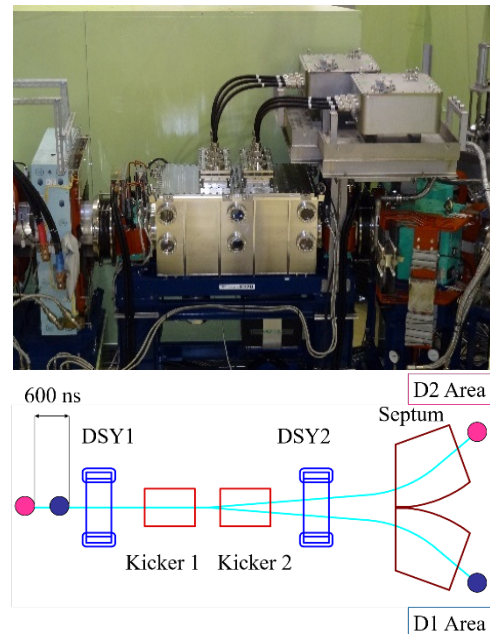


Figure 1: Muon kicker system.

ノイズ低減対策として、GND ラインの仕分け (キッカーとそれ以外 GND に分別)、GND 強化および伝送ラインを含むキッカーシステム全体にメタルシールドを施した結果、一部の検出器においてシングルパルスの実験ができるまでノイズは改善された。しかし、検出器信号と共にキッカー励磁に同期するタイミング信号を取り入れる実験においてはノイズの影響が依然大きく、実験に供せな

fujimori@post.kek.jp

い状況である。当初我々は当該ノイズがサイクロtron起動時の突入電流に起因するものと考え、サージ電流を除去するためノイズフィルタとして可飽和インダクター (SI) およびローパスフィルタ (LPF) を回路に組み込み (Fig. 2(a)) ノイズ対策を図ったが、Fig. 2(b)に示すように励磁波形のリングングは減少したものの、検出器信号に乗るノイズを抑えることはできなかった。すなわち、検出器に影響を及ぼすキッカーノイズは突入電流の成分によるものではなく、1 マイクロ秒幅のキッカーパルス本体に起因する電磁ノイズに因る可能性があることが分かった。

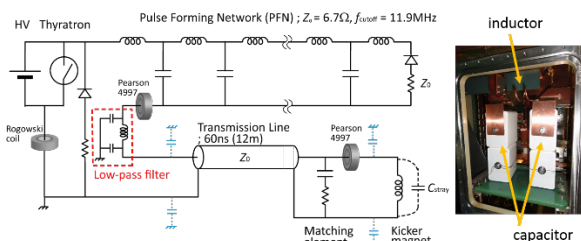


Figure 2(a): Kicker circuit with LPF.

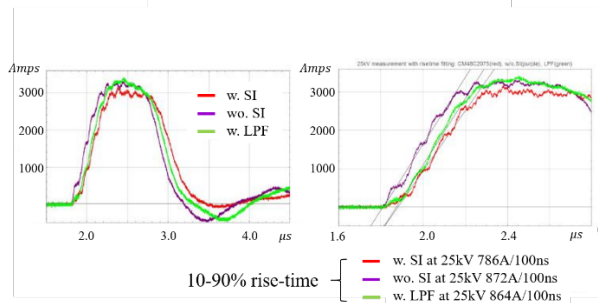


Figure 2(b): Kicker Waveform with LPF.

3. コモンモードノイズ低減対策

3.1 コモンモード電流

ピックアップコイルを用いた電磁ノイズ測定 (Fig. 3) に依れば、伝送ラインの同軸ケーブルからのノイズが最も大きく、ピックアップコイルを 180 度回転するとノイズ信号の位相が逆転することから、伝送ラインからの漏れ電流 (コモンモード電流) が発生していることが分かる。コモンモード電流によって生ずる電磁波が空間を伝播して測定器系に影響を及ぼすノイズ源と考えられる。当該ノイズ (コモンモードノイズ) を除去するため、伝送ラインの同軸電力ケーブルにフェライトコアを実装する対策が検討された。

3.2 フェライトコア対策

Figure 4(a) に示すように、コモンモード電流により生ずる磁束はフェライトの抵抗 (磁気抵抗) を受けて減衰 (発熱消費) され、しかも、信号電流への影響が少ないため、信号波形をなまらせないという利点がある。我々は Fig. 4(b) のように伝送ライン (電源側) に端末を外さずにフェライトコアを実装できるよう、半割 (クランプタイプ) のフェライトコアを用いた。

3.3 リターンプレートと電源筐体との短絡

Figure 5 に示すように電力ラインのリターンは一旦 Return Plate を経由してサイクロtronのカソード側で GND へ接続される。Return Plate と電源筐体はガラスエポキシ材 (Insulator) によって絶縁されているが、Short Bar を介して電源筐体と繋がっており GND へと接続されている。その際、Return Plate と電源筐体とを Short Bar 以外にも短絡することによってコモンモードノイズは減少した。元々 Short Bar 部分には Damping 抵抗が挿入されており、励磁波形の調整に用いた経緯があるが、励磁波形に影響がなければ、Insulator を外して Return Plate と電源筐体を直結することによって、ノイズ低減の効果があると考えられる。



Figure 3: Measurement of common-mode noise with a pickup coil.

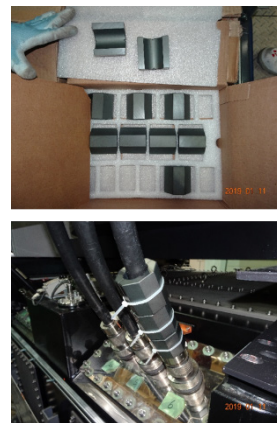
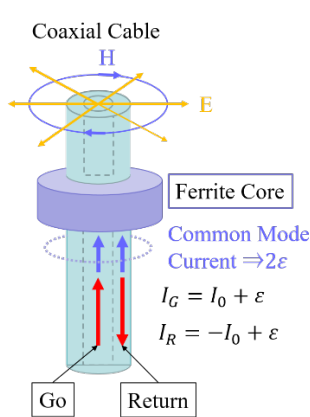


Figure 4(a): Mechanism for eliminating common-mode noise with ferrite cores (left) and Figure 4(b): Installation of ferrite cores to transmission line (right).

3.4 フェライトコアの効果

伝送ラインは合計 6 本の同軸電力ケーブルから構成され、フェライトコアは同軸電力ケーブル 1 本につき 3 個 ~ 10 個が実装され、その効果が試された。フェライトコアの有/無 (3 個/0 個) で大きな違いがみられ、ピックアップコイルではフェライトコア実装後のノイズは約 1/2 に減少した (Fig. 6)。一方、フェライトコアの連結数による大きな差はなく、同軸電力ケーブル 1 本につき 3 個連結で十

分な効果が確認できた。キッカーノイズの影響を受け易い D2 実験エリアの Ge 検出器においては、伝送ラインへのフェライトコア実装による大きな効果は見られなかったが、Fig. 7(a)に示すようにフェライトコアを検出器の信号ケーブルに実装によって大きな効果が得られ、Fig. 7(b)に示す通り Ge 検出器 (GLP) のノイズレベルはフェライトコア実装前に比べ、約 1/10 以下に減少した。

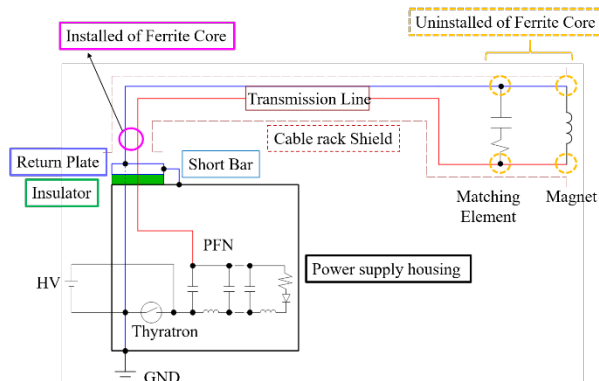


Figure 5: Kicker circuit.

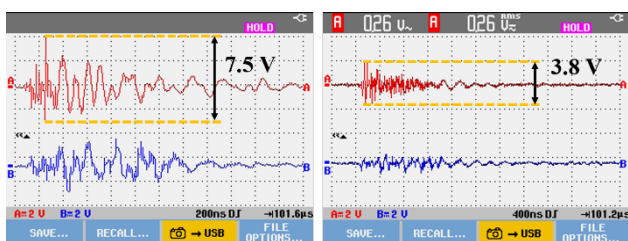


Figure 6: Comparison of noise level on pickup coil with/without ferrite core.

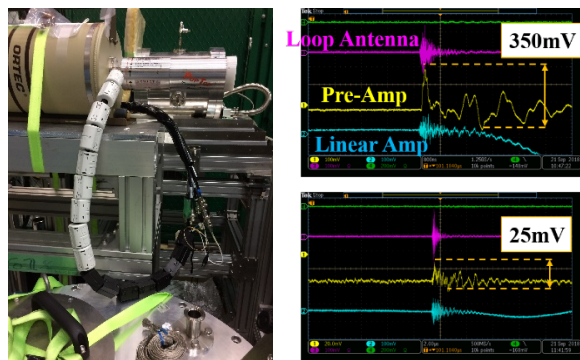


Figure 7(a): Installation of ferrite cores to signal lines of the GLP (left) and Figure 7(b): Comparison of noise level on GLP with/without ferrite core (right).

4. 結果および今後の対策

4.1 結果

伝送ラインの電源側端子付近にフェライトコアを実装することによって、Pickup coil 及び Ge 検出器においてキッカーノイズが飛躍的に減少した。これは、伝送ラインの行き還りの電流差分 (コモンモード電流) が誘起した磁場をフェライトコアの磁気抵抗によって発熱消費し、減衰

させたものと考えられる。フェライトコア実装によるノイズ対策はノイズ発生源である電源側で行うと共に測定器側においても対策するのが効果的であり、Fig. 7(a)に示したように検出器信号ケーブル終端の広い範囲にフェライトコアを実装することによって飛躍的なノイズ低減に成功した。また、超低速ミュオンライン (U ライン) の検出器 Micro-Channel-Plate (MCP) においても同様なノイズ対策によって実験可能なレベルまでノイズが減少している。一方、伝送ラインの Return が接続される Return plate と電源筐体とを短絡することによってもキッカーノイズの低減効果が確認された。これは電源筐体が低インピーダンスの GND となり、Return 電流が GND に流れ易くなったためと考えられる。

4.2 今後の対策

フェライトコアによるノイズ低減効果が大きいことから、Fig. 5 に示すように負荷側 (Matching Element 及び Magnet) の終端部にもフェライトコアを実装する計画がある。また、GND の低インピーダンス化として、Fig. 5 に示すガラスエポキシ製の絶縁板 (Insulator) をアルミニウム製の導電板 (アルミ板) と交換し Return Plate と電源筐体とを完全に短絡する試みが、キッカー励磁波形との整合性を確認しながら進行中である。

参考文献

- [1] H. Fujimori and Y. Irie *et al.*, Status of Muon Kicker System at J-PARC, Proceedings of the 10th Annual Meeting of particle Accelerator Society of Japan (August 3-5 2013, Nagoya, Japan), P646.
- [2] H. Fujimori *et al.*, Kicker System - Noise Reduction at D-line -, KEK-MSL Report 2012 (2013), P16-17.
- [3] H. Fujimori *et al.*, Kicker System - Noise Reduction at D-line -, KEK-MSL Report 2014 (2015), P14-15.
- [4] H. Fujimori *et al.*, Kicker System - Noise Reduction at D-line -, KEK-MSL Report 2015 (2016), P11-12.
- [5] H. Fujimori *et al.*, Kicker System - Noise Reduction at D-line -, KEK-MSL Report 2016 (2017), P10-11.