

## J-PARC ミュオンキッカーシステムの現状 STATUS OF MUON KICKER SYSTEM AT J-PARC

藤森 寛<sup>#, A,B)</sup>, 入江吉郎<sup>A,B)</sup>, パトリック ストラッサー<sup>A,B)</sup>, 坂田茂雄<sup>C)</sup>, 目黒 学<sup>C)</sup>,  
長友 傑<sup>A,B)</sup>, 小嶋健児<sup>A,B)</sup>, 三宅康博<sup>A,B)</sup>  
Hiroshi Fujimori<sup>#, A,B)</sup>, Yoshiro Irie<sup>A,B)</sup>, Patrick Strasser<sup>A,B)</sup>, Shigeo Sakata<sup>C)</sup>, Manabu Meguro<sup>C)</sup>,  
Takashi Nagatomo<sup>A,B)</sup>, Kenji Kojima<sup>A,B)</sup>, Yasuhiro miyake<sup>A,B)</sup>

<sup>A)</sup> Muon Science Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>B)</sup> Muon Science Section, Material and Life Science Division, J-PARC center

2-4 Shirakata Shirane, Tokai-Mura, Naka-Gun, Ibaraki 319-1195

<sup>C)</sup> Nippon Advanced Technology Co. Ltd. (NAT)

3129-45 Muramatsu Hibara, Tokai-Mura, Naka-Gun, Ibaraki, 319-1112

### Abstract

The muon kicker system is used to separate the muon pulses and feed them to two experimental areas (D1, D2) simultaneously. Beam operation with the kicker system started in winter 2011. Dividing the muon beam into two single-pulsed beams was successful, but anti-noise measures were required. Later, the kicker noise level was drastically improved through refining both the ground lines of the kicker system and the detectors. Figure 1 shows  $\mu$ -decay spectra with kicker on/off. However, the kicker noise level is still high according to the S/N ratio of some detectors. Further measures to reduce the kicker noise are contrived. On the other hand, the reduction in the rise time of the kicker current for high-intensity beams with longer bunches is in progress.

### 1. はじめに

J-PARC 物質生命科学実験施設における崩壊ミュオンビームラインには、二重化パルスミュオンビーム(ダブルパルスミュオン)を二つのシングルパルスに分別し同時に二つの実験エリアに供給するため、2011年夏にミュオンキッカーシステムが導入され、当該システムを用いての運転が同年冬に開始された。運用当初は検出器に乗るキッカーノイズの影響が大きく、ほとんど実験にならない状況にあったが、キッカー本体側および検出器側、双方の遮蔽およびGND対策によって、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(図1)。現在、ノイズ遮蔽の強化を施し、ノイズレベルをさらに下げる対策を講じる一方、ビーム強度の増強に対応するためキッカー波形の立ち上がり時間の短縮改善を進めている。

### 2. 放射ノイズ遮蔽 (RF Shield)

図1は光電子増倍管を用いた陽電子検出器(DQ1 Spectrometer)におけるキッカーon/offによる出力信号( $\mu$ -decay spectra)を示す。上段はダブルパルス、中段はキッカーを用いた最初のシングルパルス取り出しにおけるトレースである。一方、下段はキッカーシステムのアースライン整備後のトレースであり、中段(アースライン整備前)に比べ劇的なノイズ低減が見られる。 $\mu$ -decayの検出器については、アースラインの整備およびカウンタ信号の閾値

<sup>#</sup> fujimori@post.kek.jp

(threshold)の調整によって、キッカーシステムを用いたシングルパルス実験が可能となったが、シグナルが小さく且つノイズに弱い検出器については、更なるノイズ低減対策が必要である。

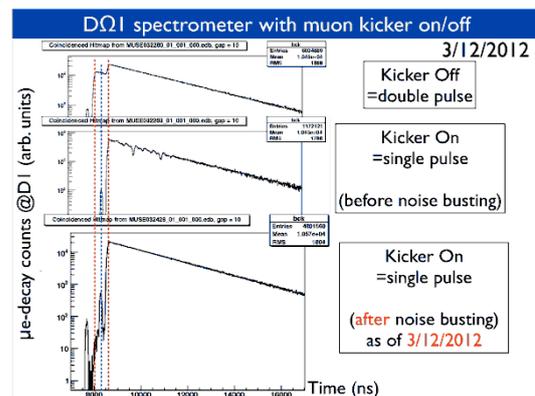


図1: 検出器の出力信号 ( $\mu$ -decay spectra)

検出器に生ずるノイズ源として最も疑わしいのは、キッカー電源、キッカー電磁石および出力ケーブルからの放射ノイズである。前回、放射ノイズが強い部分には銅板による遮蔽を施したが、期待通りの効果が確認できなかった。そこで今回、図2aのような出力端子の遮蔽強化、および図2bのようにアルミ製の箱状ケーブルラック(カバーラック)中に収納敷設された出力ケーブルをカバーラックの上から経路全体(キッカー電源出力端子から負荷電力端子)を覆うノイズ遮蔽(RF Shield)が施された。



図 2a : キッカー出力端子の遮蔽  
遮蔽強化後 (左) および遮蔽強化前 (右)



図 2b : 出力ケーブルの経路全体に施された  
ノイズ遮蔽

さらに、キッカー電磁石が 2 台挿入されたビームライン上の真空槽 (キッカー真空槽) にも厚さ 2mm のアルミ製の遮蔽が図 3 のようにビームラインのコンクリート遮蔽体との狭いスペースに設置された。一連の遮蔽強化を施した後、その遮蔽効果を確認するため、主要箇所において空間ノイズの測定が実施された。測定には前回同様、同軸ケーブルの先にサーチコイルを取り付けた簡単な Radio Wave Detector [1] が用いられた。キッカーシステム周り主要箇所の放射ノイズ分布を図 4 に示す。



図 3 : キッカー真空槽の遮蔽  
遮蔽処置後 (左) および遮蔽処置前 (右)

今回の遮蔽強化により、全体的にノイズレベルは低減し、前回高めだった負荷側、特にキッカー真空

槽の上部 (図中 12~17) について顕著な (~1/100) ノイズ改善がみられた。また、前回ノイズの影響が大きく本来の信号を確認できなかった Area-D2 検出器 (ミュオニウム実験用陽電子カウンタ) に発生するノイズレベルについては実験可能なレベル (5mV 以下) まで軽減された。

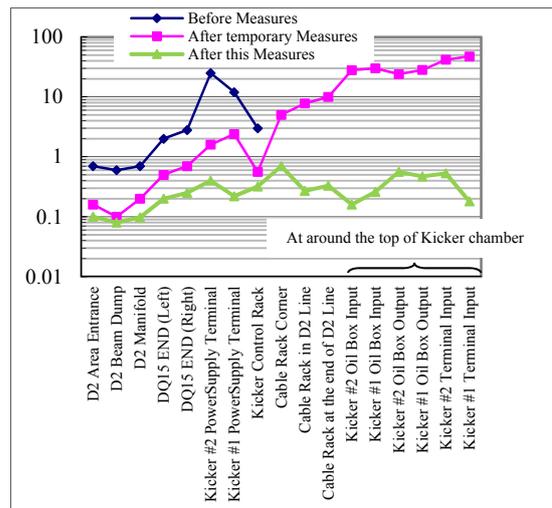
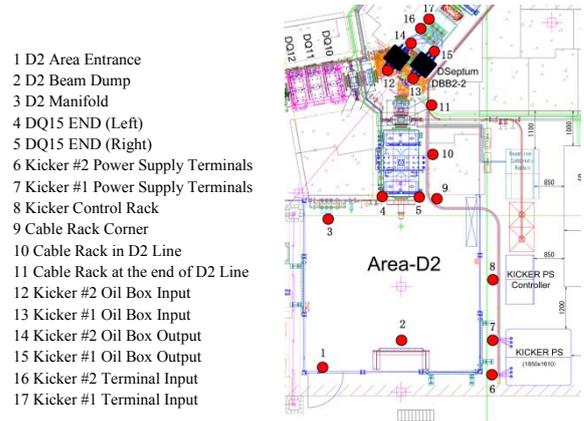


図 4 : キッカーシステム周りのノイズ分布  
測定ポイント (上) およびノイズレベル分布 (下)

検出器のノイズレベル低下は、遮蔽対策と同時にを行った検出器信号ケーブルへのジッパーチューブ (日本ジッパーチュービング社製) 用いた遮蔽および GND 処理も効果的であった。放射ノイズは検出器の信号ケーブルを媒体としてノイズを発生させる場合も考えられ、ノイズ源の低減と同時に検出器側の対応 (ノイズを受け難くする対策) が必要である。

### 3. 励磁波形の立ち上がり時間短縮改善

#### 3.1 インダクタンスの軽減

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。最初の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 2 組 (4 個) だけ間

引いて、長さ方向に 6 組 (300mm) の磁極を形成する。間引き数については、テフロンコアを用いた R&D [2]により最適化したものである。図 5 はフェライトコア 6 組を用いた磁極および組み立て後のキッカー電磁石 1 号機 (改造後) を示す。



図 5 : キッカー電磁石 1 号機  
フェライトコア磁極 (左) および改造後 (右)

改造前後の電気特性試験を実施し、両者の比較検討を行った。このときのフェライトコア数に対するインダクタンスの関係を表 1 に示す。実測値と計算値は 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 $\mu\text{H}$	実測値 $\mu\text{H}$	計算値 $\mu\text{H}$
8	1.47	1.16	1.12
6	1.14	0.94	0.85

改造前 (Ferrite 8 組) に対し、改造後 (Ferrite 6 組) のインダクタンスは約 20% 軽減された。

### 3.2 磁場測定

改造後のキッカー磁場を確認するため、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図 6 のような回路[3]を介して、電磁石の中心磁場および中心軌道に沿った磁場分布を測定した。サーチコイルは直径 20mm のガラスエポキシ製の円柱に 0.7mm 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 7 にコイル電流の CT 波形およびサーチコイルに発生した誘導起電力を積分回路に通した波形 (積分波形) を示す。

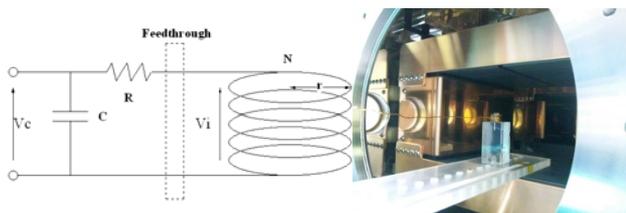


図 6 : 積分回路の概略 (左)  
および測定に用いたサーチコイル (右)

図中、上段は CT 波形であり、青線は改造前 (磁極長 400mm) の励磁波形、黒線は改造後 (磁極長 300mm) の励磁波形を示す。下段はサーチコイル起電力の積分波形であり、同様に青線は改造前の励磁波形、黒線は改造後の励磁波形を示す。ピークのずれは充電電圧の差であるが、改造前後を比較したとき改造後の立ち上がり時間の改善 (5-95%において、368ns→315ns) が確認された。

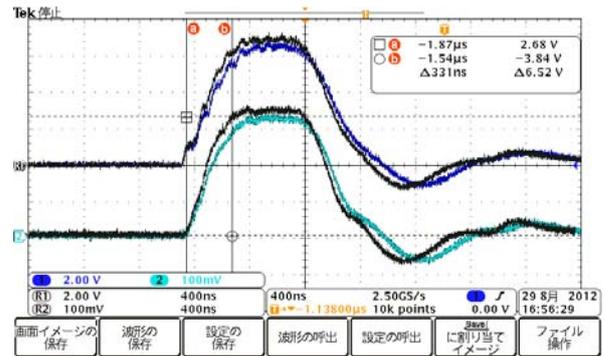


図 7 : CT 波形およびサーチコイルの誘導起電力による積分波形 (青 : 改造前、黒 : 改造後)

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  $N=10\text{Turns}$ 、半径  $r=10\text{mm}$  ( $S=\pi r^2$ ) 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  $R=110\Omega$ 、 $C=324\text{nF}$  を入れて、40kV (5380A) 励磁のとき 280Gauss が得られた。サーチコイルを磁石中心に固定し、フィードスルーを介して配線すれば、真空中での測定が可能であるため、中心磁場については真空中において 0~40kV までの測定が実施された (図 8)。

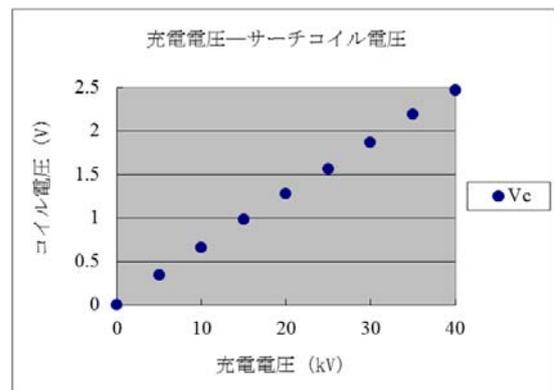


図 8 : 励磁特性 (真空中)

充電電流 0~40kV において直線性がよく、飽和は見られない。期待通りの結果が得られた。一方、中心軌道の磁場分布は、サーチコイルをビーム方向へ移動させながら測定する必要があるため、放電の観点から大気中における低電圧での測定に限られる。そこで、充電電圧 5kV において中心軌道の染み出し磁場 (fringe field) の影響を調べた。図 9 に測定結果を示す。z=0 は電磁石の中心であり、赤枠は fringe field を考慮した BL 積に相当する。磁極長が 300mm であることから、両側で 100mm 程度の fringe field が存在することが分かる。

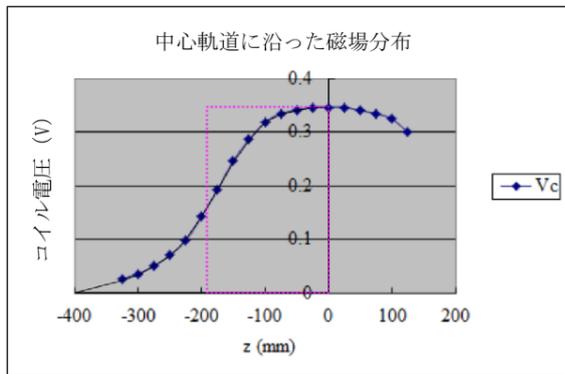


図 9：中心軌道の磁場分布 (fringe field)

## 4. まとめ

### 4.1 ノイズ対策

遮蔽効果により全体としてノイズレベルが減少し、検出器側の対策 (信号ケーブルの遮蔽、GND 処理) の相乗効果により、今までノイズレベルが高過ぎて本来の信号を確認できなかった検出器において信号を確認できるレベルまでノイズが軽減した。ただし、実験に用いるためには、今一步のノイズ対策が必要である。キッカーシステムの絶縁、GND の強化および検出器側の対応等、複合的な対策が必要と思われる。

### 4.2 立ち上がり時間の改善

インダクタンス軽減の観点から磁場長 (磁極長) を短くすることにより、立ち上がり時間の改善を図った。すなわち、磁極に用いられているフェライトコアの間引きにより、磁極長を 400mm から 300mm に短縮し、インダクタンスは 20%減少した。これによって、立ち上がり時間は約 15% 短縮改善された。

### 4.3 今後の予定

- キッカーシステムの絶縁対策として、キッカー電磁石が収納された真空槽 (キッカー真空槽) と電气的につながっている個所、すなわち、キッカー真空槽前後のビームダクトおよび架台との絶縁処理を行うと共に、検出器側の信号ケーブルおよび GND 処理を強化し、さらなるキッカーノイズの

低減を図る。

- 励磁波形立ち上がり時間改善について、キッカー電磁石 2 号機においても 1 号機同様の改造が実施され、シャットダウン中にインストールを計画している。その際、サーチコイルと積分回路を用いた磁場測定を実施し、1 号機との比較を行う予定である。

## 参考文献

- [1] H. Fujimori et al., KEK-MSL Report 2011 (2012) 9
- [2] H. Fujimori et al., Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (8-11 August, 2012, Toyonaka, Japan)
- [3] H. Fujimori, et al., Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 1-3, 2011, Tsukuba, Japan