

# J-PARC ミュオンビームキッカー用 MOS-FET MARX 駆動バイポーラパルス トランス合成方式電源の開発

## A DEVELOPMENT OF BIPOLAR INDUCTION VOLTAGE ADDERS DRIVEN BY MOS-FETS BASED MARX GENERATORS FOR J-PARC MUON BEAM KICKER

澤村 陽<sup>#,A)</sup>, 徳地 明<sup>A)</sup>, 幸田 章宏<sup>B)</sup>, 西山 樟生<sup>B)</sup>, パトリック ストラッサ<sup>B)</sup>, 藤森 寛<sup>B)</sup>

Yo Sawamura<sup>#,A)</sup>, Akira Tokuchi<sup>A)</sup>, Akihiro Koda<sup>B)</sup>, Kusuo Nishiyama<sup>B)</sup>, Patrick Strasser<sup>B)</sup>, Hiroshi Fujimori<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Pulsed Power Japan Laboratory Ltd.

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)/ Institute of Materials Structure Science

### Abstract

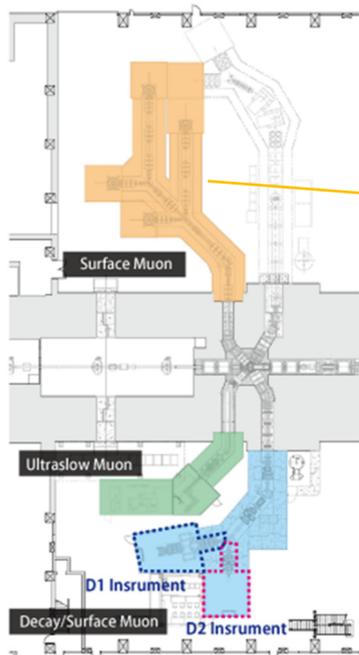
Materials and Life Science Facility (MLF) of J-PARC (high-intensity proton accelerator facility) generates world's highest intensity of neutron beam and muon beam by pulsed proton beam, and using these, materials and life scientific research has been carried out. In order to supply double pulse structured muon beam to each experimental area efficiently, beam kicker is installed at a branch to beam line legs of muon beam line in MLF experimental hall. [1] This paper is related to the development of the beam kicker power supply installed in the muon beam line.

### 1. はじめに

日本原子力研究開発機構 (JAEA)、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が共同開発した茨城県東海村の J-PARC MLF 棟は、長さ約 140m、幅 70m、高さ 30m で、加速器から世界最高強度の、パルス陽子ビーム (3GeV、25Hz を、333  $\mu$ A) を生成し、これらを用い中性子ビーム及びミュオンビームの物質・生命科学的研究が行われている。[1]

### 2. パルス電源のアプリケーションと要求仕様

ビームキッカーの目的は、効率的に各実験エリアにダブルパルス構造ミュオンビームを分配することである。ビームキッカーは MLF 棟 実験ホール内のミュオンビームラインのビームラインの分岐点に設置されている。Figure 2 にビームキッカー設置位置を示す。



<http://j-parc.jp/researcher/MatLife/en/instrumentation/ms.html>

Figure 1: Materials and Life Science Experimental Facility at J-PARC [2].

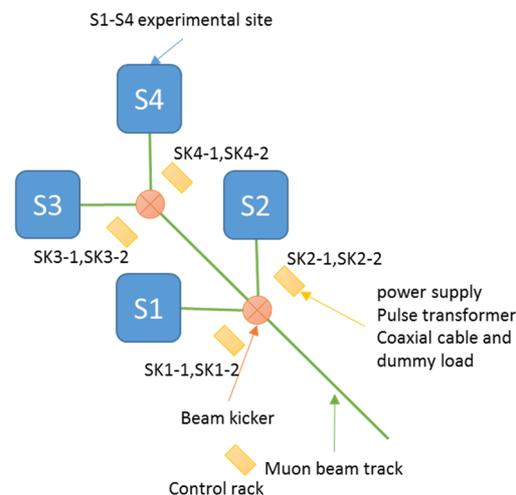


Figure 2: Planned experimental site for muon beam line at MLF, J-PARC.

ビームキッカーで使用されるパルス電源の要求仕様を Table 1 に示す。

<sup>#</sup> sawamura@myppj.com

Table 1: Requirement of Pulsed Power Supply for Muon Beam Kicker

Parameter	Requirement value
Rated output voltage	+54kV and -54kV (bipolar)
Output pulse width	300ns (+54kV), 300ns (-54kV)
Output impedance	50Ω
Discharge voltage wave form	square wave
Output pulse rise time	50nsec
Reputation frequency	25Hz

### 3. 回路構成

#### 3.1 システム設計

システムレベルの設計段階では、以下の 2 点に重点を置いた。

1) パルストランスを用いた誘導電圧加算器  
+54kV 300ns と -54kV 300ns の高電圧、両極性の短いパルス幅出力を必要とされている。従って、54kV を発生させるために 6 ユニットのパルス電源の誘導電圧加算方式を採用した。

2) 高速 MOS-FET を用いたマルクス回路構成  
300nsec の短いパルス幅の要求に対し、マルクス回路に高速スイッチング特性の MOS-FET を選択した。

#### 3.2 パルストランスを用いた誘導電圧加算器

12 台の HV ユニットの出力電圧は、ファインメットコアを使用した、パルストランスに誘導的に加算される。

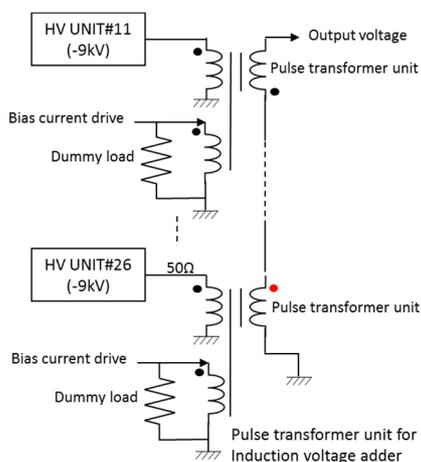


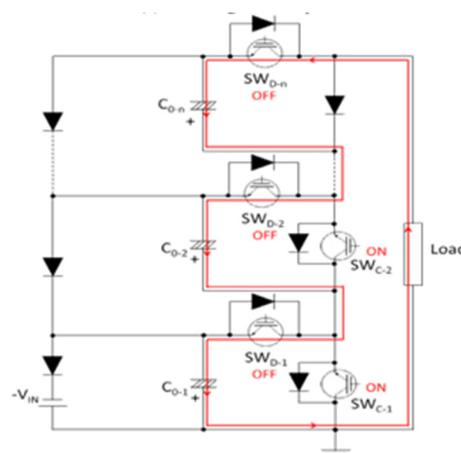
Figure 3: HV pulsed power supply unit and Pulse transformer unit for Induction voltage adder.

ミュオンダブルパルスを分配するために、両極性パルスを生成する必要があるが、すべての高電圧パルス電源は、負極性の -9kV を生成する構成とした。パルストランスでの誘導加算時に合成する磁束の方向を変えることにより、ビームキッカーの極性に対応した。

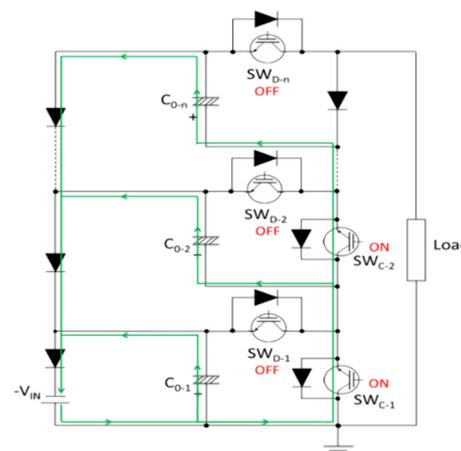
これは、将来的に供給電圧を拡大することができるように、パルストランスと各高電圧電源はスケラブルなユニット構成とした。

#### 3.3 高速 MOS-FET を用いたマルクス回路構成

Figure 4 は、半導体を用いた一般的なマルクス発生器の動作および回路図を示す。[3] また、充電 (SW<sub>C</sub>) と放電 (SW<sub>D</sub>) 半導体スイッチ、ダイオード、及びエネルギー貯蔵用コンデンサ (C<sub>0</sub>) で構成している。充電期間では、各段のコンデンサは (a) (緑線) の経路で並列に充電される。放電期間では、(b) (赤線) の経路で、V<sub>IN</sub> のステージ数倍の電圧が負荷に生成される。C<sub>0</sub> は、放電により瞬間的にその電荷を失い、出力電圧は、放電により指数関数的に減少する。

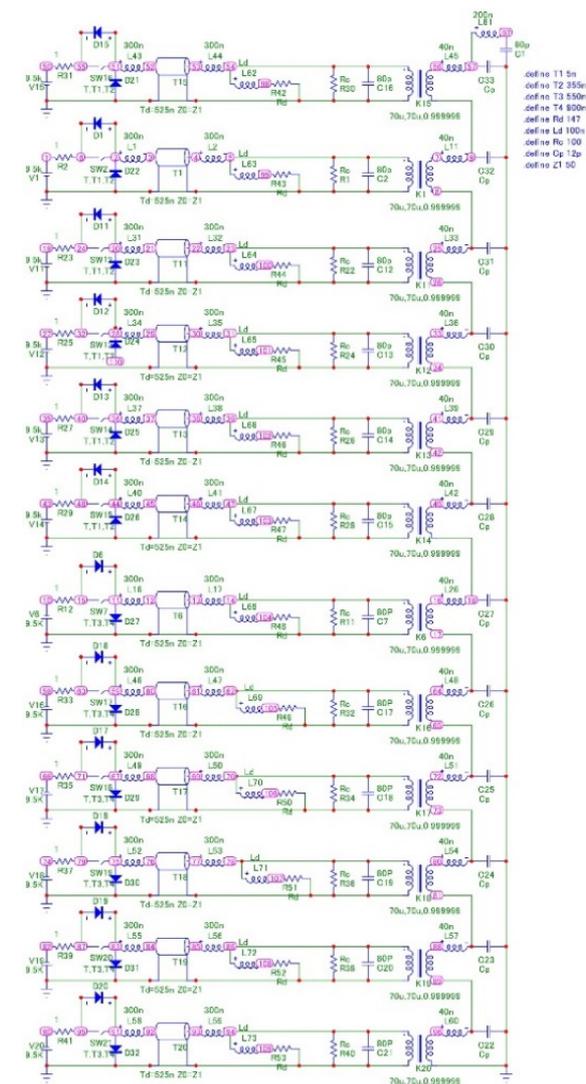


(a) The charge current path.

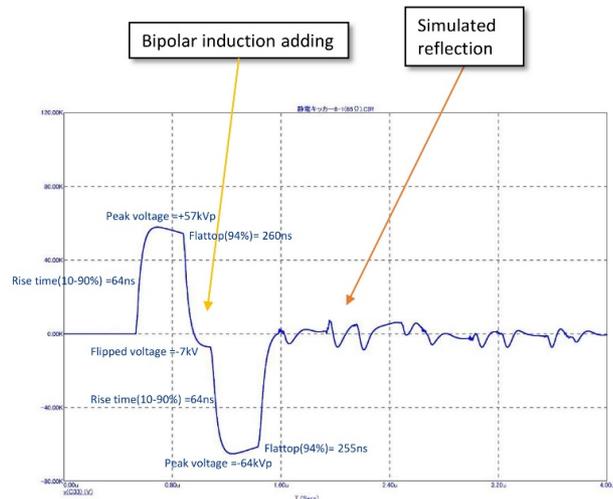


(b) The discharge current path.

Figure 4: General circuit diagram of Marx generator using semiconductors.



(a) Simulation circuit.



(b) Simulated result.

Figure 5: Simulation circuit and simulated wave.

300nsec 以内指定された出力パルスの立ち上がり時間及び電圧ドレープ率を達成するために、高速の MOS-FET と、 $C_0$  の適切な容量値を選択した。

ミュオンダブルパルス間隔が 600ns で構成されているため、 $-9kV/300ns$  の高電圧パルスを発生するパルス電源は、50ns の立ち上がり時間 (10%~90%) が必要とされる。仕様を満足するために、16 段のマルクス回路は、高速の FET によって駆動する。

また、FET へのトリガ信号の  $dv/dt$  は  $-9kV/30ns=300kV/us$  にも達するため、マルクス回路異電源間のトリガ信号は光ファイバを採用した。

#### 4. 回路シミュレーション

パルス電源から  $-9kV/300ns$  の高電圧パルスをパルストランスに転送するために、同軸ケーブルを使用した。また、パルストランスコアの磁気抵抗を補償するためのダミー抵抗は、インピーダンス不整合によるパルスの反射を回避するように実装した。

同軸ケーブルの長さは 105m に設定し、第 1 ショットパルスの反射が戻ってダブルパルス (1.0us) の期間中に入らないように、遅延線の機能を有している。

上記の同軸ケーブルの長さは下記の回路シミュレーションにより算出した。

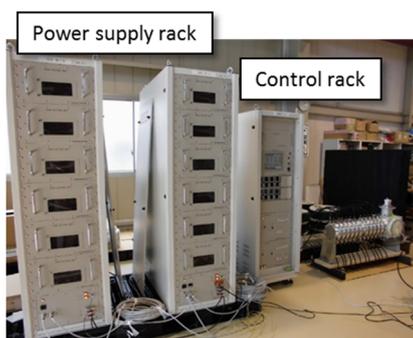
#### 5. システムの実装と検証

##### 5.1 システム実装

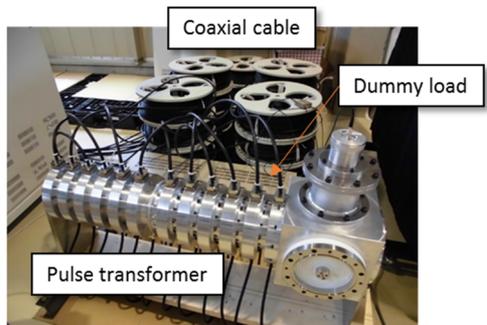
Figure 6 は、今回開発した 1 サイト分のビームキッカーシステム用パルス電源である。それらは、Table 2 に示すいくつかの装置で構成されている。2 台のパルス電源ラックは各ビームキッカーサイトに配置されるため、合計 8 台のパルス電源ラックを開発した。

Table 2: Equipment of One Pulsed Power Supply for Muon Beam Kicker

Equipment	Description
Two power supply racks	Six HV units (-9kV) per each
One control rack	All pulsed power supply rack can be controlled by this Control rack
Twelve coaxial cable reels	Each coaxial cable length is 105m
One pulse transformer	12 (6+6) inputs are equipped, induction voltage adder for bipolar output pulse
One dummy load	Dummy load for impedance matching and bias current supply for transformer core



(a) One pulsed power supply for beam kicker system.



(b) Pulse transformer, dummy load and coaxial cable.

Figure 6: System implementation.

## 5.2 システム検証

Figure 7 にパルストランスの出力波形、Table 3 に波形の測定値を示す。

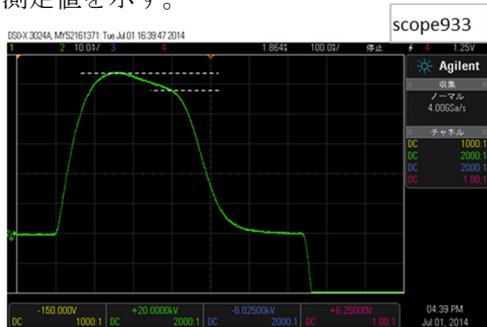


Figure 7: Output wave form.

Table 3: Measurement Results

Parameter	Values
Steeple voltage	54.0kV
Posterior border voltage	48.0kV
Drop from steeple voltage	88.9%
Droop	11.1%

上表に示すように、誘起電圧加算器により 54.0kV の出力電圧を達成した。

## 5.3 システム検証 2 図

Figure 8 に、バイポーラ駆動におけるパルストランスの出力波形を示す。

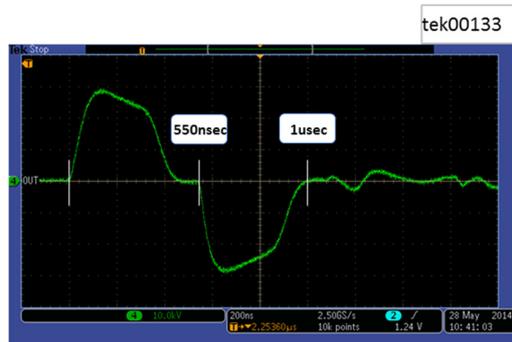


Figure 8: Output wave form.

出力パルスによる反射波は、105m の同軸ケーブルを使用することによって回避することができた。

反射ノイズの影響は、Figure 5(b)のシミュレーション結果に示すように 1.0us を超えたタイミングであることが確認できた。

## 6. 結論

本稿では、ミュオンビームキッカーのパルス電源に次の 2 つのシステム実装提案を行った。

- 1) パルストランスを用いた誘導電圧加算器
- 2) 高速 MOS-FET を用いたマルクス回路構成

Figure 9 に今回開発した全体装置を示す。

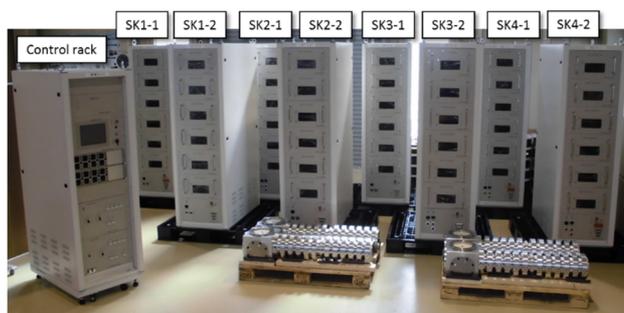


Figure 9: Developed whole equipment.

上記結果により、パルス電源、パルストランス、同軸ケーブルを含め個々のデバイスが正しく機能していることを確認した。

次のステップとして、J-PARC MLF 棟におけるミュオンビームキッカーラインの実際の負荷に実装し、総合的な評価を予定している。

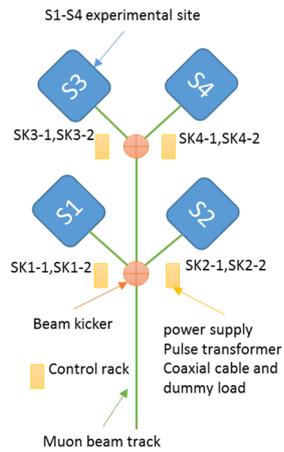


Figure. 10: Planned experimental site for muon beam line at MLF.

### 参考文献

- [1] Japan Atomic Energy Agency, High Energy Accelerator Research Organization, and J-PARC center, "High-intensity proton accelerator facility J-PARC Materials and Life Science Facility", J-PARC user center's office issue, pp. 12, 2012.
- [2] Materials and Life Science Experimental Facility at J-PARC <http://j-parc.jp/researcher/MatLife/en/instrumentation/ms.html>
- [3] Y. Kozasa, S. Sato, T. Sugai, W. Jianga, A. Tokuchi, M. Akemoto and H. Nakajima, "SOLID-STATE MARX GENERATOR FOR INTERNATIONAL LINEAR COLLIDER", p. 1.