

# ELECTRO-MAGNETIC COMPATIBILITY FOR THE IGBT BASED LARGE CURRENT POWER SUPPLY

Tomoaki Ueno<sup>1</sup>, Tomohiro Takayanagi, Michikazu Kinsho, Masahiro Yoshimoto  
Junichiro Kamiya, Masao Watanabe

Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)/Japan Atomic Energy Agency (JAEA)  
2-4 Shirane, Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195

## Abstract

The injection bump power supply of J-PARC 3-GeV RCS is composed of the assemblies that are multiple connection with the IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) choppers, and It can make optionally current wave form. The switching frequency of the IGBT choppers is controlled over 48 kHz. The high-frequency noise due to the switching of the IGBT choppers has caused the damages to the control system. Then, the ground wires that connect to each power supply panel and each magnet has been changed to copper sheets and the neutral ground (ME) resistor of the IGBT assemblies have been installed. So that the voltage due to the switching noise has been decreased from 900 V to 24 V.

## IGBTチョップを用いた大電流パルス電源のノイズ対策

### 1. はじめに

大強度陽子加速器施設(J-PARC)<sup>2</sup>の3-GeV RCS (Rapid Cycling Synchrotron)の入射バンプシステム<sup>[1][2]</sup>は、入射部に設置してある4台の水平シフトバンプ電磁石と4台の水平ペイントバンプ電磁石、及び、2台の垂直ペイント電磁石で構成されている。そのうち、水平シフトバンプ電磁石は、入射用バンプ軌道を生成し、リニアックからの入射ビーム(H-)とRCSの周回ビーム(H+)を合流させる機器である。水平シフトバンプ電磁石用の電源は、IGBT(絶縁ゲートバイポーラトランジスタ)チョップの多段多重の並列回路で構成されており、最大20kAの大電流を500 $\mu$ s以下の高速で立上げと立下げを行い、600 $\mu$ sのフラットトップを1%以下の高精度で制御して励磁することができる。

この水平シフトバンプ電磁石電源を工場試験にて24時間安定に運転できることを確認した後、現地に移設して運転したところ、IGBTチョップによる高周波のスイッチングノイズ(48kHz以上)が電源の制御系とモニター系に大きな影響を与え、運転することができなかつた。工場と現地の主な違いは、工場の場合は接地極が電源のすぐ近くにあり、接地線の長さが短くて済んだ。しかし、現地では接地極まで距離が70m以上もあるため、接地系のインピーダンスがより小さくなるように接地線のケーブルを銅板に変更したり、また、高周波の接地電流を減少させるためにIGBTアセンブリの中性点(ME)に抵抗を追加したりした。その結果、高周波のスイッチングノイズが飛躍的に減少し、安定した運転が可能となった<sup>[3]</sup>。

水平シフトバンプ電磁石電源におけるスイッチングノイズの原因とその対策、及び、結果について報告する。

### 2. 水平シフトバンプ電磁石電源

4台の励磁タイミングのズレが無く精度の良いバンプ軌道を生成するために、水平シフトバンプ電磁石は直列に接続して1台の電源で励磁している。電源の回路構成は、IGBTチョップを用いた整流器とチョップ回路による間接変換方式で、素子は3300V-1200Aを用いている。また、8多重で構成したIGBTチョップのアセンブリの中性点を接地し、大地電圧を±3200V(正側4段と負側4段)としている。スイッチング周波数は、IGBTチョップの素周波数が6kHzで8多重なので合成で48kHz以上となる。図1に電源の回路構成を、図2にバンプシステム全電源盤の配置図を示す。

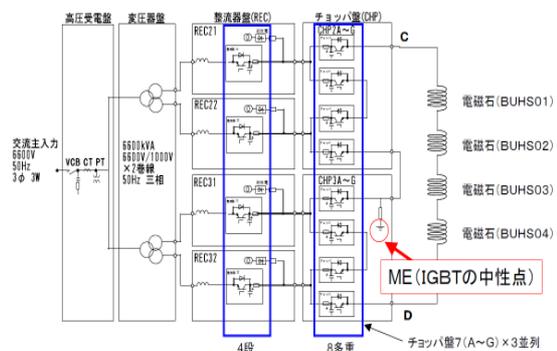


図1：水平シフトバンプ電源回路構成図

<sup>1</sup> E-mail: [ueno.tomoaki@jaea.go.jp](mailto:ueno.tomoaki@jaea.go.jp)

<sup>2</sup> <http://j-parc.jp/index-e.html>

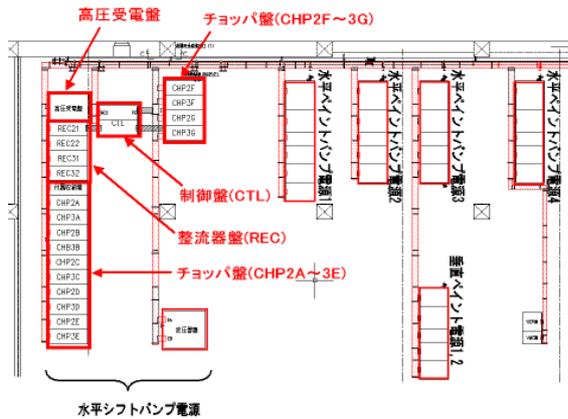


図2: 電源盤配置図(RCS棟地下1階)

### 3. ノイズ対策

#### 3.1 盤間の電位差減少

水平シフトポンプ電磁石電源は、設置場所のスペースの関係で、制御盤(CTL)、チョッパ盤(CHP2F~3G)、そして、整流器盤(REC)とチョッパ盤(CHP2A~3E)の3つに分かれて構成されている(図2参照)。

運転開始を行いIGBTチョッパが始動した直後に、制御系に誤動作が生じて運転することができなかった。そのため、3つに分かれた盤間の電位差を測定したところ、それぞれ150Vあった。この3つの盤間は、100mm<sup>2</sup>のアース線で繋がっていたため、接地のインピーダンスが小さくなるように、ケーブルを銅板(W300mm×T1mm)に変更した。銅板は、既設のケーブルラック下面の塗料を剥がした部分に密着させ、ケーブルラックと組み合わせることで、よりインピーダンスが小さくなるようにした。

その結果、150Vあった盤間の電位差が20V以下に減少し、運転初期の誤動作が無くなった。盤間を繋ぐ銅板とケーブルラックの外観を写真1に示す。



写真1: 水平シフトポンプ電源の外観図

#### 3.2 高周波ノイズフィルターの取外し

電源が安定に運転しないため、接地系の見直しを行なったところ、既設の接地盤内に高周波ノイズフィルターが設置されていた。このノイズフィルターを100mm<sup>2</sup>のアース線でバイパスした結果、制御系に生じていたスイッチングノイズが減少し、誤

動作が無くなった。

#### 3.3 ME抵抗追加

制御盤—大地間の接地電流(CTL電流)と、MEの接地電流(ME電流)、そして、筐体(CHP2F~3G)—大地間の電圧(筐体電圧)の測定を行った。その結果、CTL電流は140A、ME電流は320A、筐体電圧は900Vであった(図3参照)。いずれも、波形のPeak to Peakの値を測定した。また、測定した波形が約20μs(50kHz)で振動していることから、IGBTチョッパのスイッチングノイズが大きな原因であると考えた。

そこで、IGBTチョッパからのME電流を小さくするために、中性点に抵抗を追加した(ME抵抗)。20Ω、100Ω、200Ωの抵抗体を、IGBTアセンブリと中性点の間にそれぞれ接続し、筐体電圧とME電流を測定した結果を図4に示す。接続したME抵抗が200Ωの場合、ME電流は4Aまで減少し、筐体電圧は210Vまで減少した。また、CTL電流は24Aまで減少した。そして、ME電流が原因と考える50kHzの振動が大きく減少した。ME抵抗200Ωを接続した時に測定した波形を図5に示す。

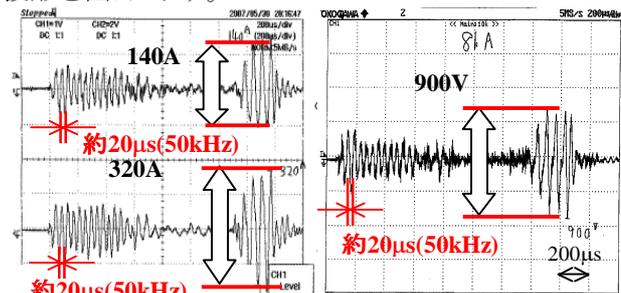


図3: ME抵抗追加前のCTL電流(左上)、ME電流(左下)、筐体電圧(右)

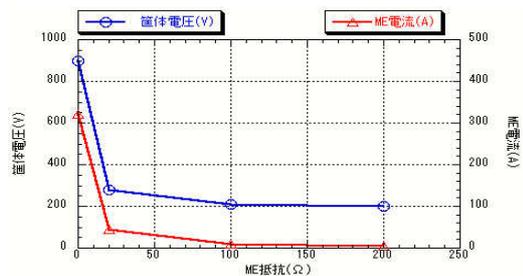


図4: ME抵抗に対する筐体電圧とME電流の関係

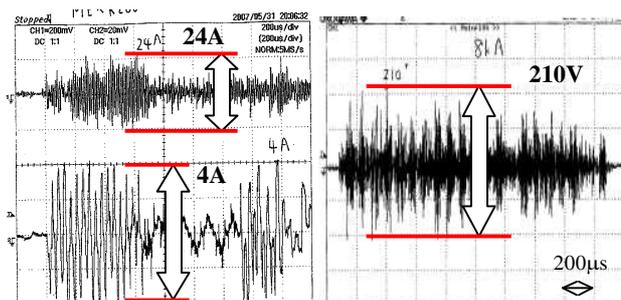


図5: ME抵抗追加後のCTL電流(左上)、ME電流(左下)、筐体電圧(右)

### 3.4 シールド線の接続先の変更

電力ケーブル(6.6kV EM-CEQ 38mm<sup>2</sup>)のシールド線をIGBTアセンブリのMEと筐体にそれぞれ接続し、スイッチングノイズの変化を測定した。

シールド線をMEに接続した場合、出力電流が不安定になった。また、CTの波形やインターロックの信号ラインにスイッチングノイズが生じて、誤動作を招いた。シールド線を筐体に接続した場合、スイッチングノイズが減少し、制御系の誤動作が無くなった。

### 3.5 接地系の改善

接地のインピーダンスを小さくしてスイッチングノイズが減るように、3.1章で行なった接地線のケーブルから銅板への変更を全電源に対して行なった。銅板と電源盤との接続は、銅板を筐体のフレームに密着するように固定し、銅板の延長時の接続は、銅板を折り込んで接触面積を増やすようにした。写真2に電源盤内に固定した銅板と、盤間を繋ぐ銅板の配置を示す。また、図6に接地銅板の延長時の接続方法を示す。

これらの変更により、筐体電圧が210Vから24Vまで減少し、181MeV入射時での電源の定格である16kAで25Hz(運転周波数)の運転が可能となった。定格運転時の筐体電圧の測定結果を図7に示す。

また、電磁石間の接地線と、各々の電磁石から電源盤までの接地線も、全て銅板へと変更した。写真3に水平シフトバンプ電磁石間を接続する銅板の外観図を示す。電源間の接地系を変更した結果(筐体電圧24V)からの大きな変化は見られなかった。よって、スイッチングノイズの主な原因は、電源のIGBTチョップパからの接地電流であると考えられる。

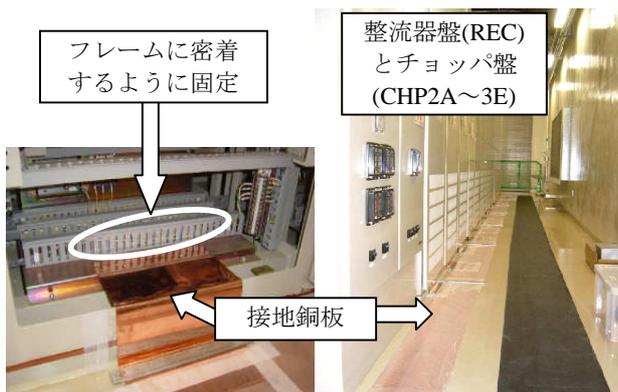


写真2：電源盤内(左)、電源室(右)の接地(接地銅板)

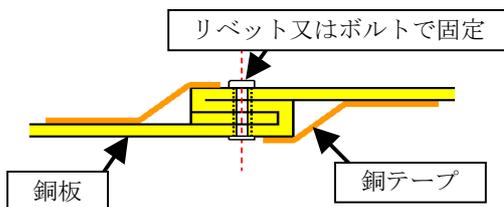


図6：接地銅板の接続方法

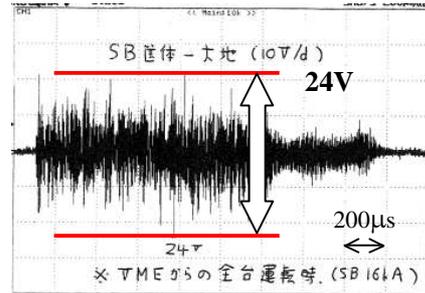


図7：筐体電圧(16kA、25Hz運転時)

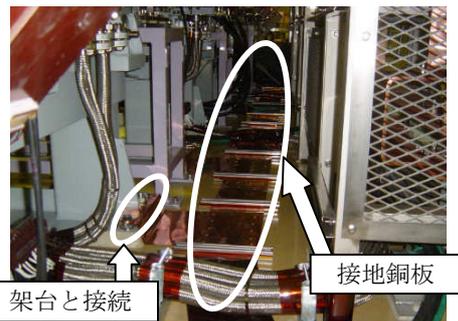
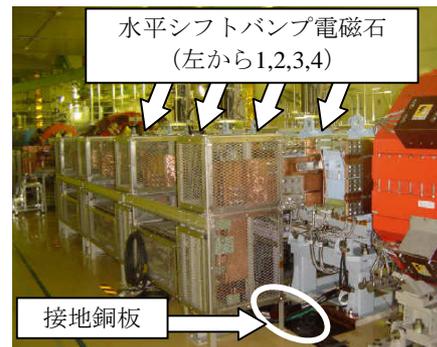


写真3：電磁石間を接続する接地銅板

(上) 水平シフトバンプ電磁石を含む外観図

(下) 各々の電磁石架台と接続している外観図

## 4. まとめ

IGBTアセンブリの中性点(ME)に抵抗を追加することで、IGBTチョップパからの高周波の接地電流を小さくすることができた。また、電源盤間を繋ぐ接地線をケーブルから銅板へと変更した結果、スイッチングノイズが減少し、チョップパ盤などの筐体一大地間に生じていた電位差が小さくなった。

今後は、IGBTチョップパ盤内の接地配線の強化などの対策を行い、更なる高周波のスイッチングノイズの低減を行ないたいと考える。

## 参考文献

- [1] T.Takayanagi, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 16, no.2, p.1358-1361, Jun. 2006.
- [2] T.Takayanagi, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 16, no.2, p.1366-1369, Jun. 2006.
- [3] T.Takayanagi, et al., Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy, p.1461-1463