

J-PARC, MR-RF 陽極電源におけるインバータユニット故障に関する調査

INVESTIGATION INTO THE INVERTER UNIT MALFUNCTION IN J-PARC MR-RF ANODE POWER SUPPLY

古澤将司^{#A)}、大森千広^{A)}、杉山泰之^{A)}、長谷川豪志^{A)}、原圭吾^{A)}、吉井正人^{A)}
島田太平^{B)}、田村文彦^{B)}、野村昌弘^{B)}、山本昌亙^{B)}

Furusawa Masashi^{#A)}, Chihiro Ohmori^{A)}, Yasuyuki Sugiyama^{A)}, Katsushi Hasegawa^{A)}
Keigo Hara^{A)}, Masahito Yoshii^{A)}

Taihei Shimada^{B)}, Fumihiko Tamura^{B)}, Masahiro Nomura^{B)}, Masanobu Yamamoto^{B)}

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

^{B)} Japan Atomic Energy Agency, JAEA

Abstract

In J-PARC MR-RF, we use inverter units in the tetrode anode power supply. We currently increase beam power. By 2018, we accomplished supplying 500 kW proton beam to NU facility, and 51kW to HD facility. With increasing the beam power, the number of the inverter unit malfunction is also increasing. The cause of the malfunction is the breakage of the Insulated-Gate-Bipolar-Transistor (IGBT) or the IGBT Gate circuit. For the further increase of beam power, the measures for the inverter unit malfunction are required. We described the outline of the inverter unit used in J-PARC MR anode power supply, investigation into the inverter unit malfunction, measures of the unit malfunction in 2019.

1. 序論

J-PARC MR 高周波加速 (MR-RF) システムで、陽子加速に使用する電圧は四極真空管からの高周波電力供給によって生成される。真空管プレート部へ供給する直流電力は、インバータユニットを用いた陽極電源にて DC600V から DC10kV へ昇圧して生成される。

MR ではビーム強度の増加を進行中で、2018 年には NU 施設へ 500kW、HD 施設へ 51kW のビーム供給を達成した。ビーム強度上昇に伴い陽極電源インバータユニットの故障数も増加傾向にある。ユニット故障の原因は、主に絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT)、IGBT スイッチパルス用ゲート回路基板 (以下ゲート回路基板) の破損、又はユニット内油タンクからの油漏れである。

本稿では、2018 年度までのインバータユニット故障数の傾向、ユニット故障数増加の対策として昨年度から開始したインバータユニット修理作業体制整備の概要について記載し、作業例と故障ユニットからの回収部品から判明した事項について報告する。

2. 概要

2.1 J-PARC 高周波システムと四極真空管増幅器

MR の加速空洞は一台当たり最大 50kV 以上の高周波電圧を生成可能である。生成電圧は空洞 GAP 部分にて陽子に印加され、ビーム加速に使用される。空洞高周波電圧生成のために MR-RF の終段増幅器では、設置された四極真空管二台の Push-Pull を使用して、加速空洞電極部に高周波高電力を供給する。

四極真空管増幅器とは高周波電力増幅器の一種である。フィラメント加熱で生成される熱電子を、正電位を持つプレート (陽極) で引き寄せることで、高電力を生成する。このとき負電位を持つコントロールグリッド (CG) に、Low Level RF と駆動段増幅器 (半導体増幅器) から高周波パルスを供給することでプレートに到達する電子の量を制御し、また正電位を持つスクリーングリッド (SG) でプレートからフィラメントへの電子反射を抑制することで良精度の高周波高電力を生成できる[1]。

Figure 1 に MR-RF システムで使用される四極真空管増幅器と終段増幅器の概要を記載した。

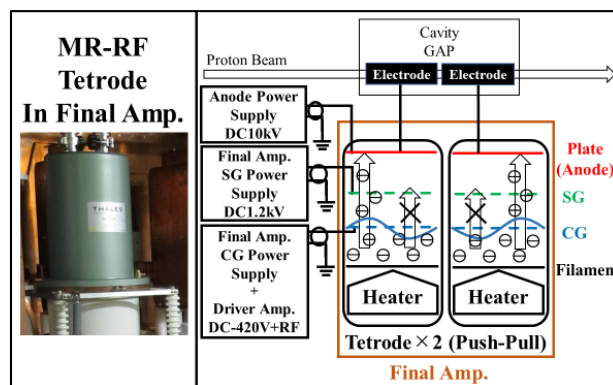


Figure 1: The tetrode and the final amplifier in J-PARC MR-RF.

[#] masashi.furusawa@kek.jp

2.2 陽極電源とインバータユニット

四極真空管にて高周波高電力を生成するために、真空管プレート部に直流高電力を供給する必要がある。MR-RF ではインバータユニットを 15 台用いた陽極電源にて昇圧された電力を真空管プレート部に供給する。

Figure 2 に MR-RF の陽極電源装置とインバータユニット、Fig. 3 に陽極電源インバータユニットにおける昇圧方法の概要を記載した。Figure 3 より、陽極電源に入力された DC600V は、インバータユニットにより DC10kV に昇圧される。陽極電源で使用するインバータユニットは、昇圧のために直流電力を交流電力に変化させる IGBT 使用インバータ回路部、交流に変換された電力を昇圧する変圧トランス部、昇圧後の交流電力を直流電力に変換する整流ブリッジ回路部で構成される。

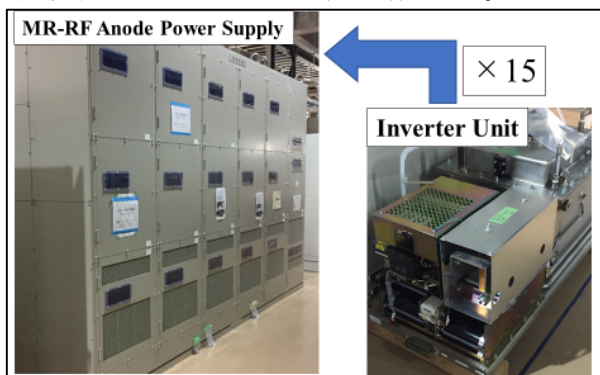


Figure 2: J-PARC MR-RF anode power supply and the inverter unit.

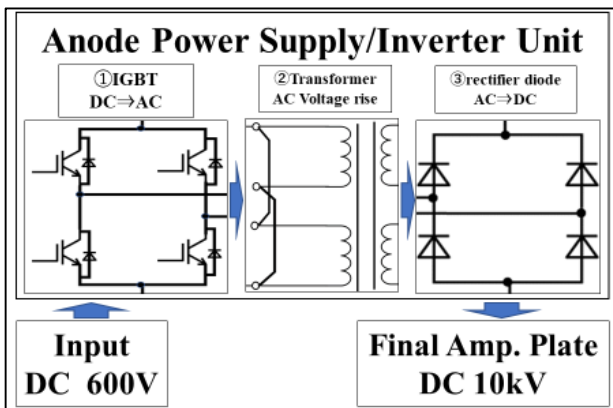


Figure 3: Voltage transformation process in the inverter unit.

2.3 絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT)

IGBTとは、PNPN接合された半導体を使用した、入力パルス操作で高電力の制御を行うパワーエレクトロニクスデバイス的一种である。ゲート端子とエミッタ端子間にゲートパルス電圧を印加することで、コレクタ端子とエミッタ端子間電力の ON/OFF を制御できる[2]。インバータユニットでは、一台当たり IGBT8 個 (2 個×4 相) を用いたインバータ回路が使用される。インバータ回路内の 8 個の IGBT を「U 相と Y 相」、「V 相と X 相」の 2 組に分けてスイッチングすることで、直流電力から交流電力への変換を行う。MR-RF インバータユニットの IGBT は、現在は富士電機の 1MBI600PX-140 が使用されている。

Figure 4 に IGBT の構造、Fig. 5 にインバータ回路による交流電力生成方法、Table 1 にインバータユニットで使用する IGBT の詳細について記載した[3]。

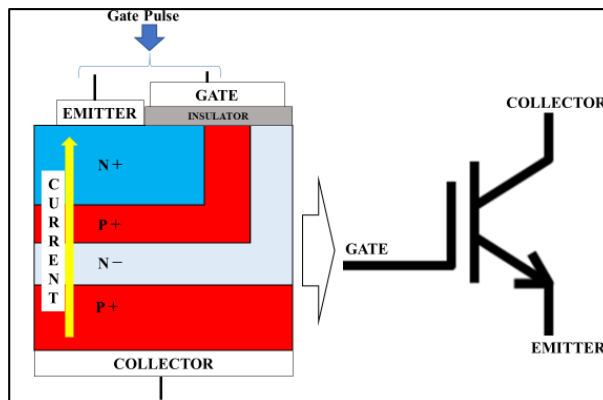


Figure 4: The constitution of IGBT

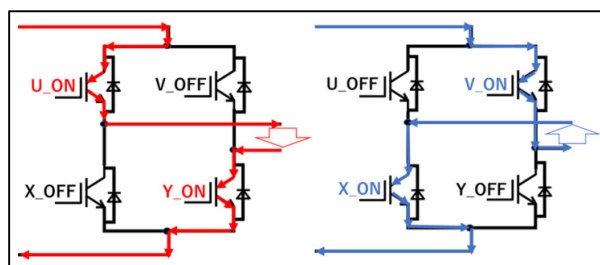
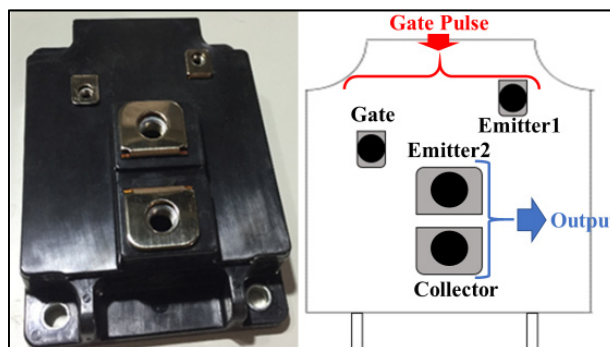


Figure 5: Conversion from direct current to alternative current by inverter circuit using IGBT units.

Table 1: The IGBT Unit Used in MR-RF Inverter Unit.

IGBT	1MBI600PX-140 (Fuji Electronic Co.)
------	--



G-E Voltage	~+15V
C-E Voltage	600V
Gate Pulse Frequency	31.25kHz
Operation Temperature	~150°C

2.4 電圧増幅部

インバータ回路で交流に変換された交流電力は、Fig. 3 に記載された変圧部で 10kV まで昇圧される。その後、整流用ブリッジ回路で直流電力に変換し、真空管増幅器のプレート部分に供給される。変圧部と整流部分はいずれも高電圧を扱う部分であり、絶縁のために油タンク内に取り付けられる。

3. インバータユニット故障の現状と対策

3.1 2014 年度以降のインバータユニット故障数について

J-PARC のビーム供給開始から現在まで、MR ではビーム強度の増加を進行している。2018 年には NU 施設へ 500kW、HD 施設へ 51kW のビーム供給を達成した。ビーム強度の上昇に伴い、陽極電源インバータユニットの故障数は2014 年度から2017 年度まで増加傾向を示した。

Figure 6 に 2014 年から 2018 年までの MR の供給ビーム強度と MR-RF グループで記録したインバータユニット故障台数を記載した。Figure 6 に記載したユニット故障の原因は、主に以下の三種類である。

- ・絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT) の破損
- ・IGBT ゲート回路基板の破損、

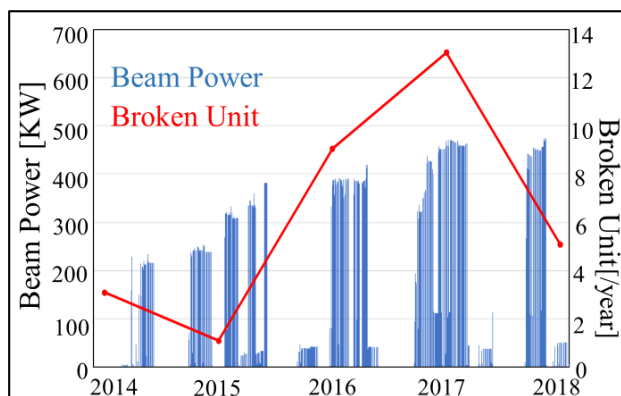


Figure 6: MR beam power and the number of broken inverter units.

- ・ユニット内油タンクからの油漏れ (比較的少数、2 台)

3.2 インバータユニット故障増加への対応策

上記のインバータユニット故障数増加の対策として、昨年度からユニット修理体制の整備を実施している。従来、インバータユニットの修理はメーカーに一任され、MR メンテナンス期間の一括修理により維持してきた。しかし近年のユニット故障台数増加により、今後はビーム運転中等、メンテナンス期間以外でも早急な修理が必要になると考えられる。以上より、メーカーとJ-PARC 間で相互協力と情報交換することで、メンテナンス期間外でも早急なユニット故障対応が可能となる新体制を整えた。

2019 年度春までに新体制下で故障ユニット 2 台の修理を完了した。修理されたユニットは秋以降の MR 運転で導入予定である。

本稿では、ユニット修理体制整備にあたって実施した部品選定作業の一例、および破損ユニット修理時に回収した IGBT、ゲート回路基板から判明した事項について記載した。

3.3 放熱グリスの選定

インバータユニット修理体制整備にあたって、ユニット各部品の整理と再選定が必要となった。ここではその一例として IGBT 放熱用グリスの選定について記載した。

Figure 7 にグリスによる放熱を計算するために使用したインバータユニット内の IGBT 使用環境モデル、Table 2

に選定した放熱グリスの性能を記載した[4]。

Figure 7 のモデルより、IGBT を放熱し、温度 130 度以下に保って動作させるためには、熱伝導度 2.6W/m・K 以上の放熱グリスが必要だと判明した。以上の結果から、Table 2 に記載の放熱グリスを選定した。

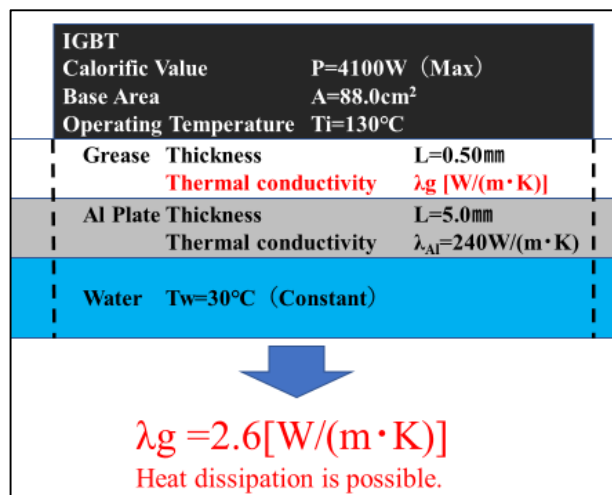


Figure 7: The cooling model of the IGBT unit in the inverter unit.

Table 2: Selected Heat Dissipation Grease

Manufacturer	Shin-Etsu Silicone
Product	G-777
Thermal Conductivity	3.3[W/m·K]
Temperature Range	-40~200 °C

3.4 IGBT の破損

ユニット故障原因の一つが内部 IGBT の破損である。

Table 3 に 2018 度に故障した 5 台のインバータユニットに設置された IGBT の端子間の抵抗値を記載した。Table 1 より、IGBT のゲート端子は他の端子から絶縁されているため、ゲート-エミッタ端子間、ゲート-コレクタ端子間は正常であれば絶縁状態となり、破損があれば導電状態となる。破損が確認された IGBT は Table 3 にて黒塗りで表記した。Table 3 より、インバータユニット故障一回ですべての IGBT は破損せず、IGBT は V, Y 相の個所に集中することが分かった。今までのインバータユニット修理の際、IGBT は旧使用品 8 個すべてを新品に交換してきたが、今後は故障時の破損していない IGBT が再利用可能であるか調査する必要がある。

3.5 ゲート回路基板の破損

インバータユニットには IGBT ゲート端子に ~±15V のスイッチング用ゲートパルスを提供するためのゲート回路基板が取り付けられている。ゲート回路基板の破損もインバータユニット故障原因の一つである。

Figure 8 にインバータユニットで使用されるゲート回路基板、Fig. 9 に回路に破損確認に使用するゲートパルスを記載した。ゲート回路基板の破損は、回路の各端子間の電圧と抵抗の測定値が規定値範囲内であるか比較し、オシロスコープにてゲートパルスの波形形状を確認することで判別可能であると判明した。

3.6 その他のインバータユニット故障対策

インバータユニット故障数増加の対策として、上記のインバータユニット修理体制整備の他に、下記の作業が実施されている。

- ・陽極電源付近の空調機器の改良
- ・IGBT ゲート信号ノイズ除去用フェライトコアの 2 個直列接続 (2S) 化

Table 3: IGBT Units in 5 broken Inverter Units

	①			②		
	G-E1	G-E2	G-C	G-E1	G-E2	G-C
U1	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.
U2	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.
V1	1.7	1.8	1.7	26.5	28.6	1.2
V2	41.2	34.6	5.5	Ins.	Ins.	Ins.
X1	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.
X2	0.86M	0.86M	0.86M	Ins.	Ins.	Ins.
Y1	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.
Y2	Ins.	Ins.	Ins.	14.9	15.1	1.0
	③			④		
	G-E1	G-E2	G-C	G-E1	G-E2	G-C
U1	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.
U2	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.
V1	Ins.	Ins.	Ins.	2.0	2.0	2.0
V2	Large Damage (unmeasurable)			3.4	3.4	2.5
X1	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.
X2	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.	Ins.
Y1	Ins.	Ins.	Ins.	17.7	18.0	0.8
Y2	1.3	1.3	1.3	44.5M	44.5M	6.1
	⑤					
	G-E1	G-E2	G-C			
U1	Ins.	Ins.	Ins.			
U2	Ins.	Ins.	Ins.			
V1	Ins.	Ins.	Ins.			
V2	Large Damage (unmeasurable)					
X1	Ins.	Ins.	Ins.			
X2	Ins.	Ins.	Ins.			
Y1	0.16M	0.16M	3.2			
Y2	4.8	4.8	2.9			

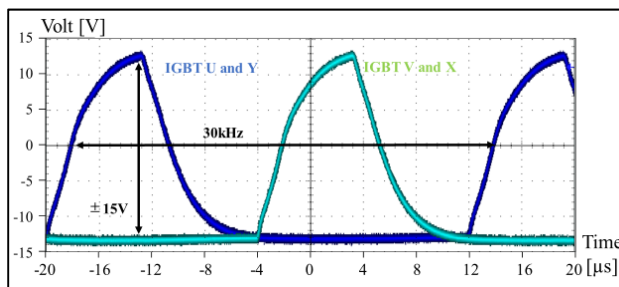


Figure 9: IGBT gate pulse.

4. まとめ

本稿では J-PARC MR-RF で使用される四極真空管増幅器を用いたビーム加速高周波電圧供給システムと直流高電圧生成用陽極電源の概要、今年度までのビーム強度とインバータユニット故障数の傾向について記載した。またインバータユニット故障数の対策として実施されたインバータユニット修理作業の新体制整備で実施した作業、故障インバータユニットの調査から判明した事項について報告した。

今後の展望として、新体制下で修理したインバータユニットを運転に組み込み、その動作状況などを調査する。また故障インバータユニットから取り出した、破損していない IGBT についても再利用が可能か調査予定である。

参考文献

- [1] 朝倉書店, “電磁気学応用 II”, 1.5 四極管および五極管, pp. 17.
- [2] オーム社出版局, “アルテ 21 パワーエレクトロニクス”, IGBT, pp. 138.
- [3] 富士電機, “1MBI600PX-140 IGBT Module P-Series 1400V/600A 1 in one-package”, Maximum rating and characteristics
- [4] 信越シリコン, “グリース・オイルコンパウンド”, G-777, pp. 12.

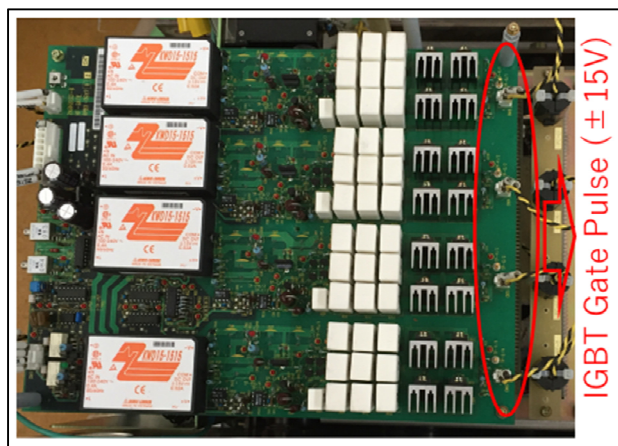


Figure 8: IGBT gate circuit.