

MA コアを用いたハイパワーバランの開発 (2) DEVELOPMENT OF HIGH POWER BALUNS USING MA CORES (2)

田村文彦 ^{*A)}、島田太平 ^{A)}、吉井正人 ^{A)}、大森千広 ^{A)}、山本昌亘 ^{A)}、
野村昌弘 ^{A)}、戸田信 ^{A)}、長谷川豪志 ^{A)}、原圭吾 ^{A)}

Fumihiko Tamura^{*A)}, Taihei Shimada^{A)}, Masahito Yoshii^{A)}, Chihiro Ohmori^{A)}, Masanobu Yamamoto^{A)},
Masahiro Nomura^{A)}, Makoto Toda^{A)}, Katsushi Hasegawa^{A)}, Keigo Hara^{A)}

^{A)} J-PARC Center, KEK & JAEA

Abstract

In the J-PARC RCS, magnetic alloy (MA) loaded rf cavities are employed to achieve a high accelerating voltage and to realize the dual harmonic operation, where a single cavity is driven by the fundamental accelerating rf and the second harmonic. The cavity is driven by a class-AB push-pull tetrode amplifier. R&D for a high power balun to mitigate the unbalanced output voltages of two tubes is undergoing. The balun is a rf transformer, which consists of a MA core and high voltage cables. In application to the RCS rf system, the maximum rf voltage is very high in the order of 15kV and suppression of corona discharges is a key. We present the techniques to suppress corona discharges. Also, cooling methods of the balun and cables are discussed.

1. はじめに

J-PARC rapid cycling synchrotron (RCS) では、金属磁性体 (magnetic alloy、MA) を装荷した広帯域空洞により、高い加速電圧を実現しており、また、1 台の空洞を基本波および 2 倍高調波を重畳した電圧で駆動するデュアルハーモニック運転を行っている [1]。加速初期のバンチングファクターを改善することで空間電荷効果を緩和しビームロスを低減するために、大強度ビーム運転においてデュアルハーモニック運転は必須である [2]。広帯域 MA 空洞において、大強度ビームによるウェーク電圧は複数のハーモニクスを含むため、RF フィードフォワード法を用いたマルチハーモニックビームローディング補償が行なわれている [3]。通常運転では 3 倍高調波まで ($h = 2, 4, 6$) を補償している。

空洞は四極管、Thales 社の TH558K を用いた AB 級プッシュプル構成の真空管アンプで駆動される。プッシュプル構成により、AB 級動作の各真空管が発生する同相の 2 倍高調波歪み成分は打ち消し合うので、加速ギャップには 2 倍高調波歪み成分は現れない。J-PARC RCS の広帯域空洞では、ギャップの上流側および下流側にブスバーで直接給電する構成であり、上流側と下流側の結合は必ずしも強くないために、上流側真空管 (VT1 と呼ぶ) と下流側真空管 (VT2) の出力電流の同相成分はプッシュプル構成においても打ち消し合うことなく、VT1、VT2 それぞれの出力電圧は同相成分を含むものとなる [4]。

昨年も報告したとおり [5]、デュアルハーモニック運転において 2 倍高調波を重畳すると、VT1 と VT2 の出力電流および電圧は非常に異なるものとなり、大きな同相成分が発生する。さらに、大強度ビーム加速においては、フィードフォワード信号の振幅が大きくなり、加速全域にわたりアンプの出力はマルチハーモニックとなるために、2 倍高調波のプログラム電圧がゼロとなる 5 ms 以降も同相成分は大きなものとなる。

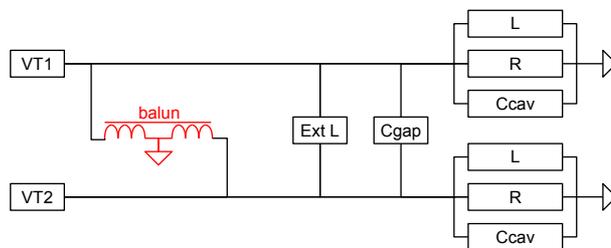


Figure 1: A simplified circuit diagram of the cavity and the final stage amplifier^[5]. The DC-cut capacitors are omitted. The balun (red) is connected in parallel.

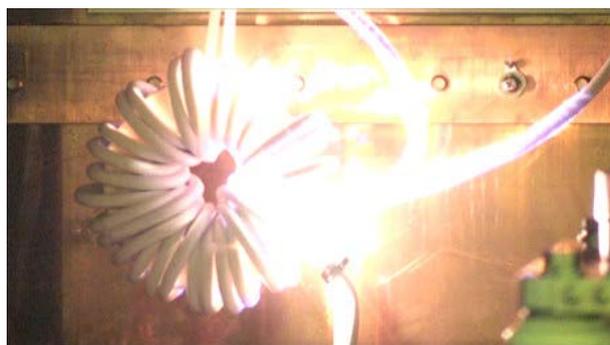


Figure 2: Corona discharge of the MA balun^[5].

大きな同相成分により、加速空洞の VT1 側と VT2 側のタンクに流れ込む電流の差による消費パワーのアンバランスや、真空管のプレート電圧がスクリーングリッドに近づき、スクリーングリッド電流の増加が生じる問題などが生じている。このため、VT1、VT2 の電流の同相成分が打ち消し合うようにする、あるいは同相成分に対するインピーダンスを下げ電圧の同相成分を小さくすることを目的に、バランと呼ばれる高周波トランス^[6]の開発を進めている^[5]。バランは Fig. 1 に示す

* fumihiko.tamura@j-parc.jp

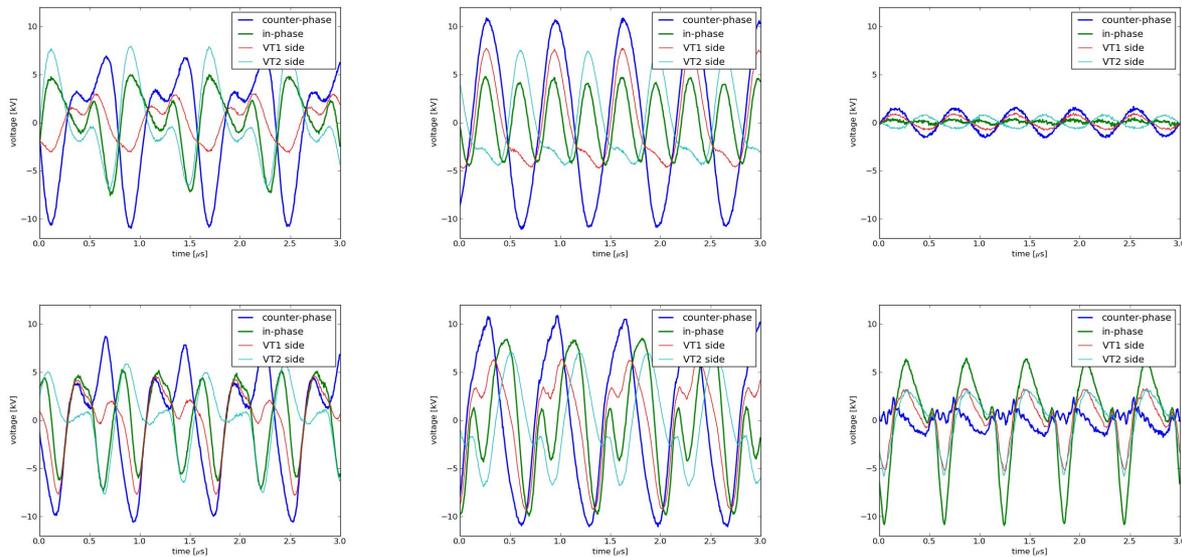


Figure 3: Voltage waveforms with the second harmonic rf at $B_{\min} + 2, 6, 20$ ms (from left to right). (Red) VT1, (light blue) VT2, (blue) counter-phase, and (green) in-phase. Upper plots are without beam, lower plots are with beam at the intensity of 8.3×10^{13} ppp.

ように VT1、VT2 間に空洞と並列に挿入され、中点が設置されている。加速ギャップ電圧を発生させる逆相電圧 (push-pull) に対しては、バランは大きなインダクタンスを持ち、RF 電流は阻止され、バランには電流が流れない。また、同相電圧 (push-push) に対してはコア内部の磁束がキャンセルされるためにインピーダンスが低くなることで同相電流はアースに流れ、結果、同相電圧の振幅は小さくなる。15 kV の高い逆相電圧によりバランに用いるコア内部の磁束密度は 2000 ガウス以上に及ぶため、MA (ファインメット) を用いている。試作のバランにより、逆相に対するインピーダンスをほとんど変化させずに、同相に対するインピーダンスを大きく下げることが出来、各真空管の出力電圧を対称に近くすることに成功しているが、10 kV 以上のギャップ電圧では、対策を行わなければ Fig. 2 に示すようなコロナ放電が発生してしまうことも判明している [5]。

本稿では、大強度ビーム運転における真空管の出力波形について報告するとともに、バランの実用化に向け必要なコロナ放電抑制の試験結果、また、冷却方式の検討状況について報告する。

2. 大強度ビーム加速におけるプレート電圧測定

前述のように、大強度ビーム加速においては、ビームローディング補償のために、2 倍高調波の電圧プログラムが 0 となる 5 ms 以降も真空管は高調波成分 ($h = 4, 6$) を空洞に供給する。ビームなしの場合および大強度 (8.3×10^{13} ppp) ビーム加速の場合について終段アンプの RF 電圧モニタ波形を VT1、VT2 の各真空管について、電圧パターン開始から終了まで全てをオシロスコープにより記録した。電圧モニタ波形について、逆相成分および同相成分を VT1 側、VT2 側の波形の引き算、足し算を行うことで計算した。これら電圧波形を、

B_{\min} から 2 ms、6 ms、20 ms の各時間についてプロットしたものを、Fig. 3 に示す。バランはまだビーム試験ができる段階にないため、この測定はバランなしであることに留意されたい。図中、赤は VT1、空色は VT2 の波形、青は逆相成分、緑は同相成分を示す。

2 ms では、ビームなしの場合は VT2 側の振幅、特にマイナス側の振幅が大きくなっている一方、ビームありの場合は VT1 も同程度の振幅を持っていることがわかる。逆相電圧波形はビームの有無によらずほぼ同じになるように制御されているが、各真空管の波形が異なるために、同相成分は異なる。

6 ms では、2 倍高調波の電圧プログラムが 0 となっているために、ビームなしの場合には VT1、VT2 電圧波形は位相が 180 度違うのみで振幅はほぼ同じである。同相成分は、2 倍高調波を主に含んでいることが波形から見てとれる。一方、ビームありの場合には、ビームローディング補償のために 2 倍、3 倍高調波を含む電流を真空管は空洞に供給する。このため、同相成分は逆相成分と同程度の大きな振幅を持ち、また、VT1 は大きくマイナス側に振れている。プレート電圧がスクリーングリッド電圧に近づき、VT1 にスクリーングリッド電流が大きく流れる原因となっている。

20 ms では、設定電圧が低いために、ビームなしの場合には真空管の出力振幅が小さく、各真空管の動作は A 級に近い。この時の同相振幅は逆相の振幅よりもはるかに小さい。一方、ビームありの場合には、ビームローディング補償のための高調波により、同相成分が逆相よりも大きくなっている。逆相には大きな歪みが生じており、正弦波とは遠い。

以上のように、ビームローディング補償のための高調波により、2 倍高調波のプログラムがゼロとなる 5 ms 以降も、加速全域にわたり同相成分による真空管の振幅のアンバランスが生じているのが現状である。

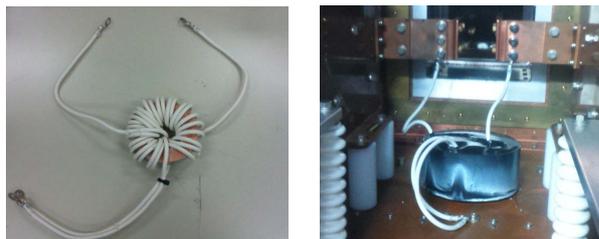


Figure 4: (Left) the prototype balun before molding, (right) after molding and installed in the amplifier.

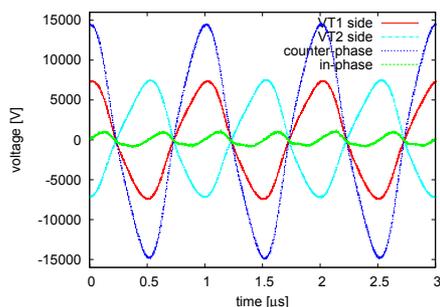


Figure 5: Voltage waveforms with the balun. (from left to right).(Red) VT1, (light blue) VT2, (blue) counter-phase, and (green) in-phase.

3. コロナ放電の抑制のために

先に述べたように、使用しているケーブルの絶縁耐圧には問題ないものの、対策を行わない限り 10 kV 以上の動作電圧で Fig. 2 に示すコロナ放電が発生してしまう。線間のコロナ放電を防ぐためには、コロナの原因となく空気層を排除すれば良い。樹脂によるモールドにより空気を排除する方法と、フロリナート漬けによる方法について検討を行ってきた。以下に詳細を述べる。

3.1 樹脂によるモールド

前回ハイパワー試験で使用したバラン (Fig. 4 左) は、ケーブルおよび MA コアにはコロナ放電による損傷は全く見られなかったため、この試作バランをシリコン樹脂 (スリーボンド TB1230G) によりモールドした。モールドにあたっては、十分に隙間を埋めることができるよう、真空引きを行った。モールドしたバランを J-PARC ヘンデル棟 RF テストベンチの終段アンプ内にインストールした様子を Fig. 4 右に示す。硬化した樹脂は黒色であるが、白いマーブル状の模様が残っているのは白色の硬化材が一部残っているためである。

この試作バランは冷却機能を持たず、テストベンチには実機 LLRF システムがないため、ファンクションジェネレータをバーストモードで使用し、シングルハーモニック 1 MHz 固定でバーストサイクル数とバースト周期によりデューティを変えながら通電を行った。オシロスコープで VT1、VT2 側のギャップ電圧を記録した。

モールド前のバランでは、10 kV を超えると大きなコロナ放電が発生していたが、モールドしたバランは、低いデューティの場合は 15 kV でも大きな放電を生じることはなかった。この時の電圧波形を Fig. 5 に示す。バ



Figure 6: The balun was broken by the discharge inside.

ランにより同相に対するインピーダンスが低下し、緑で示した同相成分は十分に小さく抑制されていることがわかる。VT1、VT2 の各波形も上下対称な波形となり、逆相成分の波形に近いものになっている。

サーモカメラにより温度測定を行っていたが、10%程度の低いデューティでは温度上昇が見られなかったために、20% までデューティを上げたところ、数十秒で光とともに大きな放電が生じた。その後は高い RF 電圧がかからない状態となってしまった。

このため、樹脂を除去し、検分を行った。ケーブルは、ブスバーに最も近い導入部で放電により損傷していた。ケーブル被覆が完全に貫通しており、絶縁耐圧の低下により RF 電圧がかからない状態となったと考えられる。損傷部を除き、ケーブルは高温になった様子もなく健全な状態であった。また、コアのエッジ近くにはケーブルとの間に微小な隙間が発見された。ケーブルを完全に取り除いてみたところ、コアの内周部と外周部の、ケーブル損傷近傍のエッジの部分に放電痕が見つかった。

以上より、損傷に至った経緯は以下のように推察される。コアとケーブルが接するエッジの部分に微小な隙間があったために、高い RF 電圧によりコロナが発生していたが、全体がモールドされていたために外観からは放電を観測することができなかった。デューティを上げたことにより、コロナによりケーブル被覆が損傷し、絶縁耐圧が低下したことにより大きな放電が発生してしまったと考えられる。

コアのエッジがコアに食い込む状態となっていたことが、微小な隙間の発生原因と考えられる。ケーブルを緩く巻き、樹脂がエッジとケーブルの間に入るようにすれば、樹脂によるモールドは使用可能であると考えている。しかし、モールドは内部にボイドが残る可能性も否定できず、またモールド後には内部を見ることができないことが不安要素である。また、モールドの場合には冷却方法は間接冷却以外に選択肢はない。

3.2 フロリナート漬け

空気層を排除するために絶縁油に漬けることが考えられるが、加速器トンネルで使用すること、また試験では放電も発生する可能性があることを考慮し、引火性がないフロリナート (FC-3283) を使用することとした。

新たに MA コア (FT3L) 2 枚を用いたバランを製作し (Fig. 7 左)、フロリナート漬けでのハイパワー試験を行った。Fig. 7 にアンプ内でのインストール状況を示す。フ



Figure 7: (Left) another prototype balun, (right) it is dipped in fluorinert.

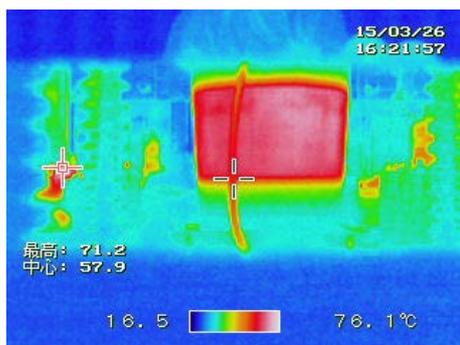


Figure 8: Temperature distribution with rf power.

フロリナートは容量3リットルのプラスチック製のビーカー内に満たされ、バルンはアンプ筐体からプラスチックの台座により距離を取って設置されている。バルンはフロリナートに完全に漬かった状態である。このセットアップでは、フロリナートの使用量は2.5リットル程度であった。

このバルンもこれまでの試験同様に冷却機能を持たないため、シングルハーモニック1MHz固定でバーストサイクル数とバースト周期によりデューティを変えながら通電を行った。オシロスコープで電圧波形を記録したほか、サーモラベルおよびサーモカメラにより、コアとフロリナートの温度測定を行いながら通電した。

まず低いデューティ(2%)で15kVまでの通電を行った。これまでの試作バルン同様、同相成分が抑制され、VT1、VT2の電圧波形は上下対称なものになっており、バルンとしての動作を確認できた。15kVまでの範囲でコロナ放電が発生しないことが確認された。

デューティを徐々に上げ、温度変化を測定した。デューティ15%では、3分間でフロリナートの温度は50度から70度に上昇し、コア表面のサーモラベルは50度程度だったものが100度以上を示した。サーモカメラによる温度分布測定をFig. 8に示す。ビーカー下部のフロリナートは温度があまり上昇していないことがわかる。大まかに熱量を考えよう。フロリナートのおよそ2/3が様に20度上昇したと仮定し、フロリナートの比熱1050 J/kgKおよび密度1.83 kg/リットルを用いると、温度上昇20度から、フロリナートへ約64000 Jの熱が与えられたと考えられる。また、コアは質量が1.6 kgであり、比熱440 J/kgKを用い、様に50度の温度上昇があったとすると、約35000 Jである。これらを合計すると、3分間の平均パワーは約550 Wと見積もられる。

試験後、バルンのコアおよびケーブルを確認したが、放電の痕跡はなかった。液体であるために、ケーブルとコアの隙間に十分に入り込み、空気を排除できていると考えられる。以上のように、フロリナートによるコロナ放電の抑制効果を確認することができた。

4. 冷却方法の検討

バルンの逆相に対するシャントインピーダンスを40000 Ωと仮定すると、15 kVの逆相電圧による消費パワーは約2.8 kWである。RCSではパワーの平均デューティは30%であるので、バルンに使用されるコアからは平均1 kW弱を除熱しなければならない。試作バルンに用いている外径100 mm、内径60 mm、厚さ25 mmのコアの体積は125 ccであるから、2枚のコアを用いた場合でも、4 W/cc近い、非常に高い発熱密度となる。

逆相に対してはケーブルに流れる電流は小さいが、同相電流は中心に向け数十 A ピークの電流が流れるために、ケーブルの除熱についても考えなければならない。

これまでは、水冷冷却銅板による間接冷却を検討していたが、MAコアの場合、両面を銅板に接触させるとインピーダンスが低下するために片面からの冷却となる。4 W/ccという高い発熱密度を除熱するには、両面からの除熱が好ましい。また、冷却銅板ではケーブルの除熱は困難であることから、コロナ抑止のためのフロリナートを冷媒として用いる直接液冷が最適と考えている。

5. 今後について

同相に対するインダクタンスを小さくするにはケーブル長は短い方がよく、従ってコアも小さくしたいが、発熱密度の低減のためには同じ内外径比(同じインピーダンス)ならば体積を大きくしたい。ケーブルが通せる範囲で内径を小さくし、内外径比を大きくすることでインピーダンスを上げ、またわずかではあるが体積を増加させることで発熱密度を下げるができることと考えられる。また、コアの厚さを減らし枚数を増やすことで、除熱効率を上げることも考えられる。今後、コアの大きさ、厚さおよび内外径比の最適化、冷却流路、タンク的设计を進めていく予定である。

6. 謝辞

フロリナートの使用においては、KEK 加速器研究施設の森田裕一助教、影山達也教授にご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] F. Tamura et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, 11, 072001 (2008).
- [2] F. Tamura et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, 12, 041001 (2009).
- [3] F. Tamura et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 14, 051004 (2011).
- [4] M. Yamamoto et al., in proceedings of PAC 2005, pp. 931 (2005).
- [5] F. Tamura et al., 第11回加速器学会年会プロシーディングス, pp. 1122 (2014).
- [6] 山村英穂, “改訂新版 定本 トロイダル・コア活用百科”, CQ出版社 (2006).