

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

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. In the dual harmonic operation, the output voltages of two tubes are unbalanced. By the unbalanced output voltage, we observe an increase of screen grid current of one of the tubes, and the power consumption of the cavity tanks are also unbalanced. To balance the output voltage, high power baluns using MA cores are under development. We present the development of the baluns and test results using the RCS rf system.

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するとともに、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]。入射時のバンチングファクターの改善により空間電荷効果を緩和しビームロスを低減するために、大強度ビーム加速においてデュアルハーモニック運転は必須である^[2]。

空洞は AB 級プッシュプル構成の真空管アンプで駆動される。使用している四極管は Thales 社の TH558K である。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。しかし、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^[3]。

さらに、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。このことで、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が生じてしまう。現在の電圧パターンにおいては、水温上昇から考えると 20% から 30% の消費パワーの差が生じている。また、出力電圧振幅が大きく異なるものとなることで、一方の真空管、VT2 のみ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がある。スクリーングリッド過電流による電源のトリップを防ぐために、大振幅の 2 倍高調波電圧は入射から 3 ms 程度までの期間に制限され、5 ms

で振幅ゼロとなるパターンとなっている。現在の電圧パターンでも、VT2 のみに最大 2 A 以上のスクリーングリッド電流が流れる状態である。

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ができれば、上記の問題は解消する。これを実現するためには、対向するコアを 8 の字で結合させる、空洞への給電を VT1-VT2 を結ぶループで行うなどの手法があるが、いずれも空洞本体の大幅な改造が必要であるのみならず、8 の字やループ給電の配線をするためのスペースの観点から現実的とは言えない。そこで、同相成分に対するインピーダンスを下げるために、バランと呼ばれる高周波トランス^[4]を VT1-VT2 間に並列に挿入することを検討している。本稿では、バランの構成、および試作バランによるハイパワー試験の現状、そして今後の開発の課題について報告する。

2. MA コアを用いたバラン

磁性体コアを用いたバランの動作原理を Fig. 1 に示す。バランはコアにケーブルを 2 条巻きにした構成であり、各ケーブルの一方は Fig. 2 に示すように各真空管の高圧側に接続され、もう一方は接地されている。空洞ギャップ電圧を発生させる逆相電圧 (push-pull) に対しては、バランには図中黄色で示した向きの電流が流れようとするため、コア内に磁束が発生し大きなインダクタンスを持ち、RF 電流は阻止される。また、逆相電圧について、中点はアース電位を持つために、アースには電流は流れない。同相電圧 (push-push) に対しては、青で示した電流の向きとなるために、それぞれの電流の作る磁束はキャンセルするため、同相に対するバランのインピーダンスは小さくなり、同相電流はアースに流れ込み、同相電圧の振幅は小さくなる。

同相電流によるコア内の磁束がキャンセルされる効果を高めるためには、巻線のターン数は多いほうが良い。一方、コア内の磁束がキャンセルされている場合、同相

* fumihiko.tamura@j-parc.jp



Figure 1: The operating principle of the MA balun. This is a low power balun using coaxial cables as normal cables.

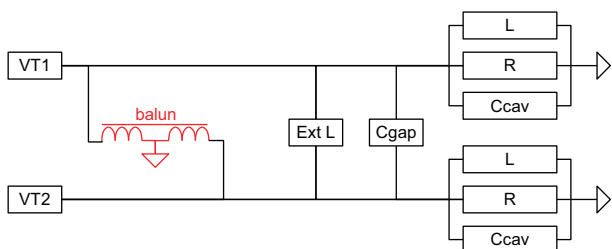


Figure 2: A simplified circuit diagram of the cavity and the final stage amplifier. The DC-cut capacitors are omitted. The balun (red) is connected in parallel.

に対するコアを含まない2条の平行線路のインダクタンスにより決まる。このため、線路長はなるべく短くすることが求められる。つまり、大きなサイズのコアを使用することは適切ではない。また、逆相に対するインダクタンスを高めるためには、透磁率の高いコアを使い、ターン数を増やすのがよいことがわかる。J-PARC RCS空胴においては、逆相電圧は15 kVピークと非常に高いために、小型のコアを用いた場合、コアの飽和が問題となる。共振がない場合、コア内部の磁束密度 B_{rf} は

$$B_{rf} = \frac{V_{rf}}{\omega SN} \quad (1)$$

である。ここに、 V_{rf} は両端にかかる電圧、 ω は角周波数、 S はコア断面の面積、 N はターン数(2条巻きの回数の2倍)である。例えば、外径10 cm、内径6 cm、厚さ25 mmの小型のコアに2条巻きで5ターン巻いた($N = 10$) バランに1 MHzで15 kVのRF電圧を印加した場合には B_{rf} は2000 Gauss以上となる。共振がある場合は Q 倍となり(RCSでは空胴の Q 値は2)、フェライトではこのような高い磁束密度に耐えることができない。金属磁性体であるファインメット^[5]では、飽和磁束密度は1.2 Tと高く、またフェライトで見られる振幅依存によるシャントインピーダンスの低下がない。

上記の条件から、コアとしてはファインメット(FT3L)を用いることとした。外径10 cm、内径6 cm、厚さ25 mmのFT3Lコアに、DC 15 kV耐圧のシリコンケーブル(Dielectric社製「2139」、ケーブル直径6.5 mm、導体太さAWG 8)を14ターン巻いた試作バランを製作した。このFT3Lコアのシャントインピーダンス R_p は

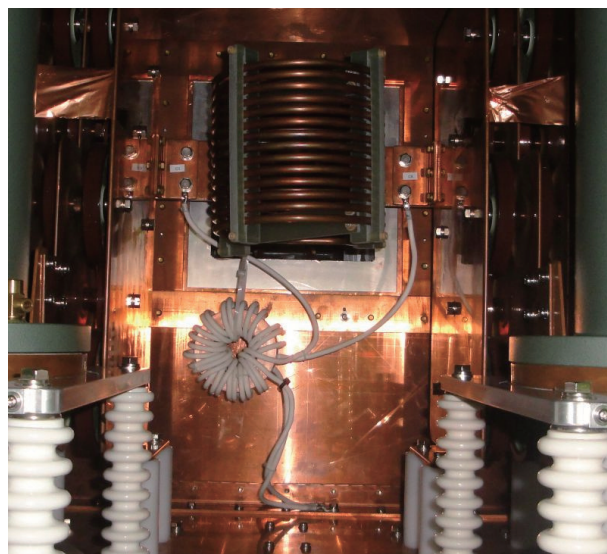


Figure 3: The MA balun installed in the final stage amplifier.

1 MHzで約94 Ω であり、インダクタンスは9 μ Hである。逆相に対しては28ターンのインダクタとなるために、バランの R_p は70000 Ω 以上となる。このように高い R_p であるが、15 kVを印加した際には1.6 kWピークの消費電力となり、デューティ30%でも500 W近い発熱となるため、実機においては冷却は必須である。冷却方法は冷却銅板を用いた間接冷却方式が適切であると考えているが、今回の試作では、冷却がなくても、dutyを十分に下げることによって試験を行うことができると判断し、冷却機能を実装せずに、コアの片側の表面に銅テープを貼り付けることで冷却銅板を模擬した。銅テープの接触により、コアの R_p は約90 Ω に低下したが問題はない。

試作MAバランを終段アンプ内に設置した様子をFig. 3に示す。アンプ筐体にある端子を接続した。図の中央の銅のコイルは、 Q 値調整用の外部インダクタ^[6]である。バランの有無によるインピーダンスの比較をFig. 4に示す。逆相に対するインピーダンスの周波数応答(Fig. 4上図)は大きな変化はない。バランにより、共振点は1.632 MHzから1.537 MHzに下がるとともに、共振点でのインピーダンスは289.4 Ω から287.1 Ω に低下した。バランのこの周波数帯域におけるインダクタンスは直接測定は困難だが7 mH以上と推察され、空胴の数 μ Hより極めて大きいため、共振への影響を与えない。共振周波数の低下は、バランの線間のキャパシタンスによるものと考えられ、この低下から見積られる線間キャパシタンスは約30 pFである。

同相に対するインピーダンスの周波数応答(Fig. 4下図)はアンプと空胴を接続するブスバーを銅テープによりショートし、ブスバーとアース間のインピーダンスを測定することにより得られたものである。同相に対してはFig. 2に示したギャップコンデンサ(C_{gap})および Q 値調整用の外部インダクタ($Ext L$)は見えず、空胴のインダクタンス(L)、シャントインピーダンス(R)、浮遊のキャパシタンス(C_{cav})により共振が見える。バランにより、アースに対してのインダクタンスが追加され、

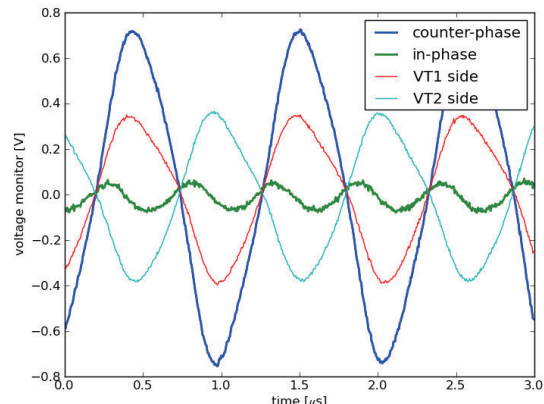
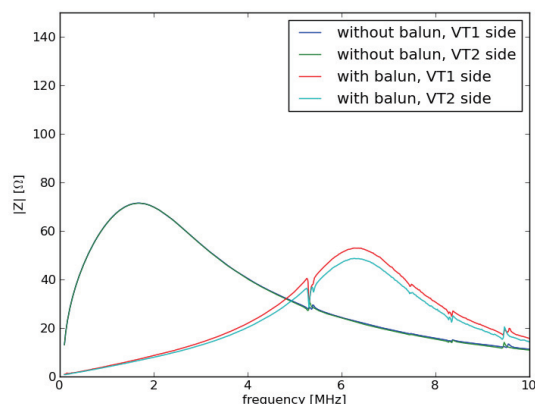
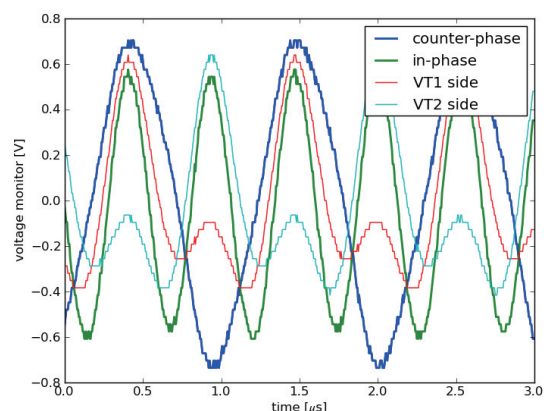
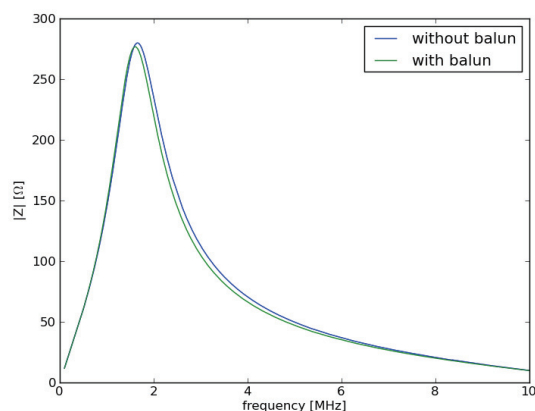


Figure 4: Comparison of the impedance between without and with the MA balun. (Top) push-pull mode, (bottom) push-push mode.

Figure 5: Voltage monitor waveforms with fundamental accelerating harmonic only at $B_{\min} + 0$ ms. (Red) VT1, (light blue) VT2, (blue) counter-phase, and (green) in-phase.

このインダクタンスは平行線路のインダクタンスであり小さい ($0.5 \mu\text{H}$ 程度) ために、共振点は大きく高周波側へ変化する。この結果、プッシュプル構成のアンプにおいて同相に大きな成分を持つ 2 倍高調波領域 (2 から 3.5 MHz) のインピーダンスを低下させることができていることがわかる。

3. ハイパワー試験結果

試作 MA バランを RCS の実機空洞、終段アンプと組み合せ、ハイパワー試験を行った。基本波および 2 倍高調波の電圧パターンは通常運転で使用しているものを用いた。試験電圧の調整は、パターン全体に 1 より小さい係数を掛けることにより行った。通常の運転では、25 Hz の繰り返しで電圧を発生させているが、前述のように今回の試作バランは冷却機能を持たないために、ファンクションジェネレータにより 1 Hz のトリガを発生させ、また測定を数サイクルで行うことで、duty を大幅に下げ、バラン発熱に関する問題を回避して試験を行った。

3.1 バランによる電圧波形の改善

測定は、終段アンプの RF 電圧モニタ波形、終段アンプ電源のスクリーングリッド電流モニタ波形を 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。

基本波のみ通電した場合の、 B_{\min} (磁場が最小) の電圧モニタ波形の比較を Fig. 5 に示す。バランがない場合 (上) では、VT1、VT2 の波形は 2 倍高調波を多く含む歪んだものとなっており、またプラス側およびマイナス側に非対称であることがわかる。この結果、緑で示した同相成分は大きな振幅を持つ。このように、AB 級プッシュプルアンプにより広帯域空洞を駆動した場合には、基本波のみの通電であっても、大きな同相電圧が発生するのである。同相電圧の分も空洞のパワー消費となることに留意されたい。

バランありの場合の波形を Fig. 5 の下図に示す。青で示した逆相電圧成分は、電圧制御によりバランのない場合と同様である。バランにより 2 倍高調波の同相に対するインピーダンスが低下するため、緑で示した同相成分が大きく減少し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、逆相電圧成分、つまりギャップに発生する電圧波形に近いものとなっている。また、各波形の最大振幅はバランなしの場合に比べ減少している。このように、基本波のみの通電の場合でも、

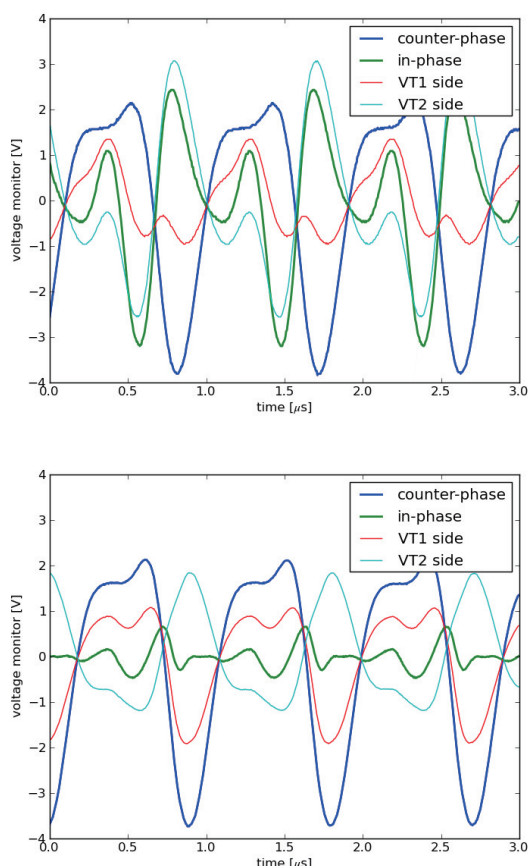


Figure 6: Voltage monitor waveforms with the second harmonic rf at $B_{\min} + 3$ ms. (Red) VT1, (light blue) VT2, (blue) counter-phase, and (green) in-phase.

バランスにより各真空管の波形を改善することができる。各真空管および逆相の波形はサイン波とは違う歪んだ波形となっているが、これは真空管の非線形により電流が3倍高調波成分を含み、また逆相に対し3倍高調波領域ではインピーダンスが比較的高いことが原因で、バランスあるいはプッシュプル構成により除去することができない歪みである。

2倍高調波ありの電圧パターンで通電した場合の、2倍高調波振幅が最大となる B_{\min} から3ms付近での電圧モニタ波形を Fig. 6 に示す。バランスなしの場合、必要とされるギャップ電圧(逆相電圧)を発生させるために、VT1、VT2の波形は大きく異なるものとなっており、特にVT2の波形がVT1より大きな振幅を持ち、またマイナス側に大きく振れていることがわかる。緑で示した同相成分は全体の振幅大きい。波形から、また、Fig. 7 に示した同相成分のFFT結果から、同相成分は2倍高調波だけでなく基本波の成分も多く含むことがわかる。バランスありの場合、波形の振幅、FFT結果から明かなように、同相電圧成分が大きく減少している。また、VT1、VT2の波形が対称に近くなり、特にVT2の波形のマイナス側の振幅がバランスなしの場合に比べ小さくなっていることがわかる。

バランスの有無によるスクリーングリッド電流の比較を

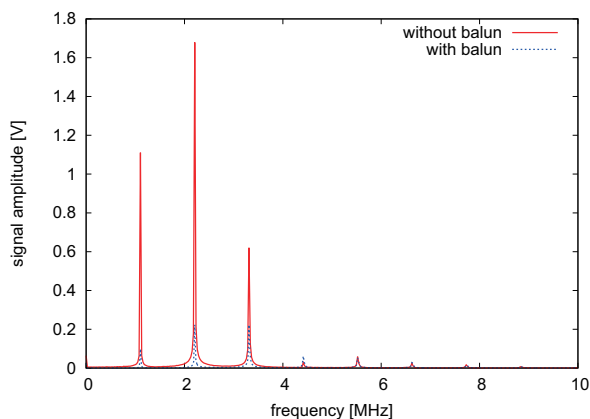


Figure 7: A comparison of frequency spectrum of the in-phase voltage components, without and with balun. Fairly good reduction of the in-phase voltage component is observed.

Fig. 8 に示した。バランスがない場合 (Fig. 8 上図)、2倍高調波振幅が大きい2msから3msの間に2A程度のスクリーングリッド電流が流れてしまう。これは、VT2の振幅がVT1に比べ非常に大きいことが原因である。バランスにより、VT1、VT2の振幅が対称化されるために、スクリーングリッド電流の差は非常に小さくなる (Fig. 8 下図)。バランスにより、プッシュプル動作の各真空管の動作をバランスさせることに成功したと言える。今回の試験では duty が低く測定できなかったが、空胴のVT1側およびVT2側の消費電力および発熱の差を減少させ、装荷されているMAコアの熱負荷の均等化にも寄与することが期待される。

3.2 放電問題

上記のように、真空管の出力電圧の対称化については成功したが、ギャップ電圧(逆相電圧)が10kV以上の運転において、バランス周辺で放電が発生するという問題が生じた。放電のようすをビデオカメラで撮影した。放電の生じる瞬間の連続する2フレームを Fig. 9 に示す。はじめに、ケーブルに巻きつくように放電が発生し、その後強い光を生じ、大きな音を立てて放電する。特にブスパーと繋がる配線の付近で強く発光していることがわかる。この付近にはブスパーとほぼ同じ電圧差があるため、強い電界が発生するものと考えられる。

試験終了後にMAバランスを取り外し検分したところ、放電箇所には黒いスス状のものが付着していたが、その下のシリコンケーブル絶縁体には損傷がなく貫通している様子もなかった。また、放電発生時には、電圧モニタ波形には全く変化が見られなかった。以上より、この放電は、RFによるコロナ放電であると考えられる。アーク放電が発生していないことから、ケーブルの絶縁耐圧自体には問題がないと考えている。コロナ放電の耐圧は、DCよりもRFで発生しやすいことが知られている。線間のコロナ放電を防ぐために、バランス全体をシリコン樹脂でモールドし、コロナの原因となる空気層を排除したものを製作中である。モールドにあたっては真空引きを行い、樹脂が隙間なく入るように留意して製作している。

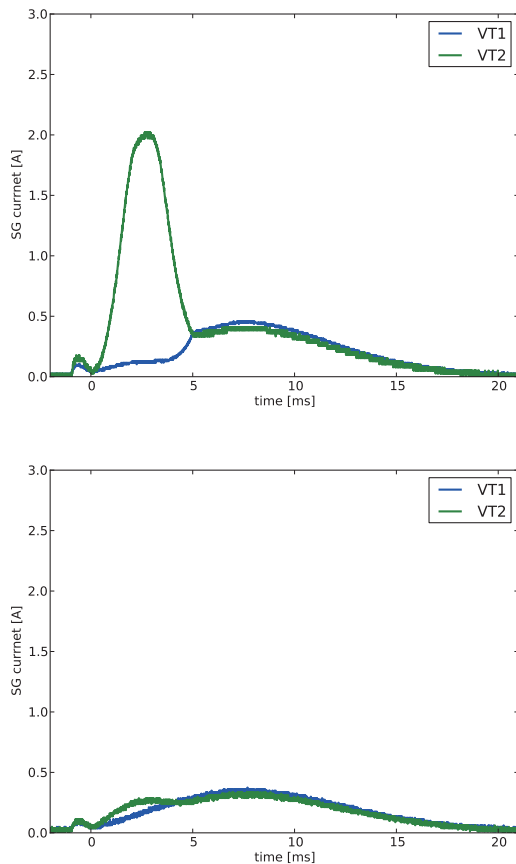


Figure 8: A comparison of the screen grid current for the voltage pattern with the second harmonic rf. (Top) without balun, (bottom) with balun.

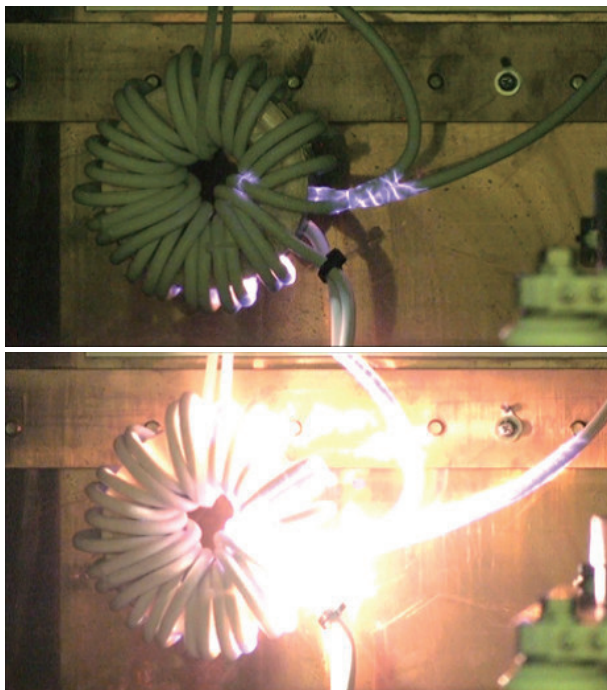


Figure 9: Discharge of the MA balun. Two consecutive frames from the recorded video.

4. まとめと今後

以下に、まとめを示す。

J-PARC RCSでは広帯域のMA空腔を用い、1台の空腔を基本波および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。AB級プッシュプル構成の真空管のアンプで広帯域空腔を駆動する場合には、ギャップ電圧は各真空管の電圧を差し引いたものとなるが、ギャップ上流、下流に現われる電圧は同相成分を大きく含んだものとなる。特に2倍高調波を重畳した場合、それぞれの真空管の出力電圧振幅はアンバランスとなるため、片方の真空管のみのスクリーングリッド電流の増加や、コア発熱のアンバランスが生じてしまうことが問題である。2本の真空管出力電圧をバランスさせる目的で、小型のMAコアと高電圧シリコンケーブルを用いた balan を試作した。balanにより、逆相に対するインピーダンスを殆んど変化させずに、2倍高調波領域での同相に対するインピーダンスを大きく低下させることに成功した。実機空腔、アンプと組み合わせたハイパワー試験では、各真空管の出力電圧を対称に近くすることに成功した。特に、2倍高調波を加えた運転パターンではbalanなしの場合に生じるスクリーングリッド電流の増加を抑制することに成功した。しかし、10 kV以上のギャップ電圧ではコロナ放電が発生してしまうことも判明した。

実機への適用に向けて、コロナ放電対策とbalanの冷却の検討が必須である。今後は、コロナ放電対策として全体をモールドしたbalanのハイパワー試験を行うとともに、水冷銅板を用い冷却機能を実装したbalanを設計、製作し、試験を行う予定である。

balanにより、2倍高調波を加速サイクル中より長い時間大きな振幅で印加することが可能になると考えられ、RCSではMRへの入射ビームのハロー低減の効果が期待される。より広帯域の空腔を用い、より高次のハーモニクスまで用いたマルチハーモニック加速を行う際には、balanを使用することでプッシュプル構成の真空管アンプの使用が可能になることも強調しておきたい。

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] M. Yamamoto, et al., in proceedings of PAC 2005, pp. 931 (2005).
- [4] 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)
- [5] Y. Yoshizawa, et al., Journal of Applied Physics, 64, pp. 6044 (1988)
- [6] A. Schnase, et al., in proceedings of PAC 2007, pp. 2131 (2007)