

DEVELOPMENTS OF COMPONENTS FOR J-PARC RING RF SYSTEMS

Chihiro Ohmori^{1,A)}, Shozo Anami^{B)}, Eizi Ezura^{A)}, Keigo Hara^{A)}, Katsushi Hasegawa^{A)}, Masahiro Nomura^{A)},
Taihei Shimada^{A)}, Alexander Schnase^{A)}, Hiromitsu Suzuki^{A)}, Koji Takata^{C)}, Akira Takagi^{A)}, Fumihiko Tamura^{A)},
Makoto Toda^{A)}, Masanobu Yamamoto^{A)}, Masahito Yoshii^{A)}

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

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

^{B)} Nihon Advanced Technology

319-45 Hirahara, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1112

^{C)} KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

Abstract

J-PARC ring RF systems have been operated successfully with a high RF voltage of 15 kV/gap. High power tetrode tubes are used in final-stage amplifiers to drive the RF cavity and can deliver up to 1MW. To realize the performance of the system, many RF components were innovated by cooperation of companies and laboratory. In this paper, we will report about the ceramic capacitors in final-stage amplifiers, vacuum capacitors in cavities, anode power supply and solid-state amplifiers produced by collaboration with CERN.

J-PARCリングRFシステムのための高周波部品の開発

1. はじめに

J-PARC高周波システムは20kV/mを超える高い加速電圧勾配を実現すると同時にビーム強度増強のために二次高調波混合にも成功している^[1]。

図1は加速システムの構成を示したものである。フルデジタルのLLRF^[2]によって作られたRF信号は駆動段アンプにより数kWまで増幅された後、終段増幅器により1MWの高周波出力となる。終段増幅器に13kV92Aの電力を供給するのが陽極電源である。ハイパワー機器について、J-PARCのために他の研究所やメーカーに依頼して開発したものについて、すでに他で述べられている金属磁性体コアとLow Level RFをのぞいたものについて紹介する。ここで紹介するのは以下の通りである。

- 1) 反射に強く故障の起きにくい駆動段増幅器
- 2) RCSの25Hz運転時に電圧変動の少ないIGBTを用いた陽極電源
- 3) 13kVDC下で1MWの高周波電力が通過する終段増幅器のブロッキングコンデンサー
- 4) 小型でありながら高い高周波電圧に耐える真空コンデンサ

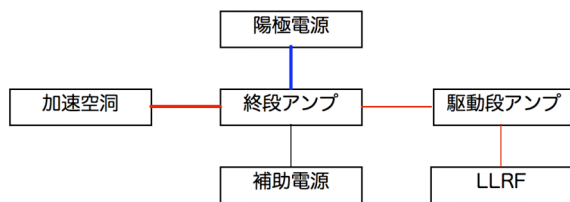


Fig. 1. Block diagram of RF system.

2. 駆動段アンプ(Driver Amplifier)

駆動段アンプはLLRFで発生した1V以下のRF信号を4kW(MR)または8kW(RCS)に増幅し、終段増幅器に供給するためのもので、地上の電源室に設置されている。J-PARCでの大強度ビーム加速のためには、駆動段増幅器の故障によりビームを加速中に損失することは最も避けなければならない点であり、このためセルソとの国際共同研究の一環として技術提供^[3]を受け、国内において製造されたものである。図2にその基本構成を示した。9台の120Wアンプを9-wayのコンバイナーで一度に合成しているため、仮に1台のトランジスターが故障したとしても他のトランジスターに与える影響は少なく、継続してRFを出力することができる。4kWアンプではこの1kWユニットを4台(図3)、8kWでは9台同様に合成している。使用しているトランジスターは120W出力に対し300W仕様のものを使用しており、94台の1kWユニットが加速器運転に使われている。

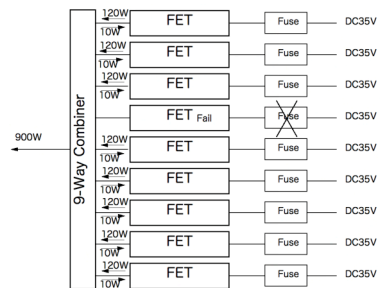


Fig. 2. Scheme of 9-way combiner.

¹ E-mail: chihiro.ohmori@kek.jp

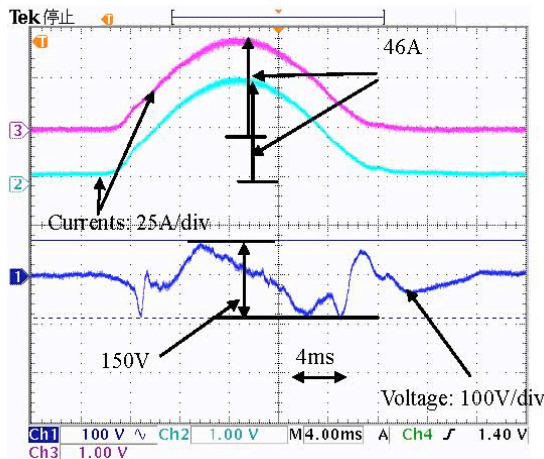


Fig. 3. Driver amplifiers for MR.

3. IGBTを用いた陽極電源

RCSでは1MWビーム加速時には陽極電流はアイドリング電流(10A)から最大電流(92A)まで大きく変動する。図4は92Aの陽極電流(紫、水色)を幅24msのhalf-sine波形に流した場合の、電圧変動(青線)を示したものである。電圧のフィードバックと電流のフィードフォワードを用いて、陽極電圧変動を150Vに押さえることができた。

Fig. 4. The response of anode voltage (Blue) for fast anode



current variation (Pink and light blue)

従来、陽極電源には高圧トランスとダイオードにより三相全波整流した後にコンデンサーで平滑する方式が用いられてきた。負荷である真空管を真空管内部のアーキングから保護するために過大な電流の発生時にクローバー回路により真空管への電流の流れ込みを防いでいる。J-PARCでは電流の変動が大きいため、陽極電圧の変動を減らすためには、極めて大きな容量の平滑用コンデンサーが必要となる。しかし、この場合コンデンサーに蓄えられた電荷が大きくなるためクローバー回路でも十分な保護は難しい。つまり、現実的なコンデンサー容量ではRCS運転時の陽極電圧の変動は数kVにもなり、最も加速電圧の必要な10ms付近では、RFを出力するのに必要な

陽極電圧が不足する事態となることがわかった。このため、我々は東芝と協力し、KEK-12GeVPS用にIGBTを用いた陽極電源を製造し運転に使用した。この試験結果を元に現在の陽極電源の原型となる1MW出力の電源を製造した^[4]。現在J-PARCで稼働している陽極電源15台は、これに更にノイズ対策、リップル対策を行ったものである。

4. ブロッキングコンデンサ

終段増幅器では真空管(四極管)をGrounded Cathodeで使用している。このため、真空管の陽極には高周波出力に加えDC10-13kVが重畳されている。このDC分を除いて加速空洞に高周波のみを出力するためのコンデンサ(ブロッキングコンデンサー)は耐電圧に加え低損失と優れた高周波特性が要求される。このため、終段増幅器内部での故障原因にもなってきた。J-PARCでは使用する周波数が0.9から5MHzと幅広いため、十分な静電容量が必要となる。最初に制作したコンデンサーに耐圧不足による不具合が生じたため、我々はコンデンサーメーカーである日東電磁と協力し、セラミックの厚みを増やした8000pFを制作し、増幅器あたり32個をブロッキングに、その他に14個用いている。

5. 真空コンデンサ

高周波加速空洞には共振周波数を加速に適した値に調整するために真空コンデンサーが加速ギャップの周りに配置されている。真空コンデンサーは損失が少ないため、大きな共振電流が通過する用途に適している。MRでは大強度ビームとりわけ空きバケツによるトランジェントなビームローディングに対応するために加速システムのR/Qを下げる設計をしている。このため、加速ギャップ周りに配置されている真空コンデンサーの合計容量は1600pF以上で、例えばAGSの600pFに比べても大きい。更に、J-PARCの加速空洞は高勾配を実現するために、加速ギャップ周りのスペースも限られている。このため我々は厚みが75mmで加速空洞内におさめることができる国内メーカーの真空コンデンサー(ピーク試験電圧35kVAC)を用いていることとした。

これを用いて高周波加速空洞の連続運転試験を行ったところ、非常に短い間加速ギャップの電圧が低下する現象が見られた(図5)。これは真空コンデンサー内部の微小な放電(閃絡)によるもので、放電は数msで治まり、電圧は回復する。加速器では短時間の電圧低下でもビーム損失に繋がるため、原因の調査と対策を行った。原因の主なもの真空内にある電極に微小な突起があり、そこが電子を放出しやすい状態にあるためと考えられた。閃絡を起こすコンデンサーではDC電圧でも耐圧の不足が見られた。このため、真空コンデンサーにDC電圧をかけて選別することとし、使用電圧21kVに対し、漏れ電流の小さい値を25kVDCで100 μ Aとし、閃絡があまり起きないものを空洞に組み込み、1.7MHz、15kVでのMR空洞での連続運転試験に使用した。更にDC電圧での耐圧

の劣化がないことを確認した。その結果、この選別条件であれば高周波印可時に閃絡がほぼ起きないことがわかった。

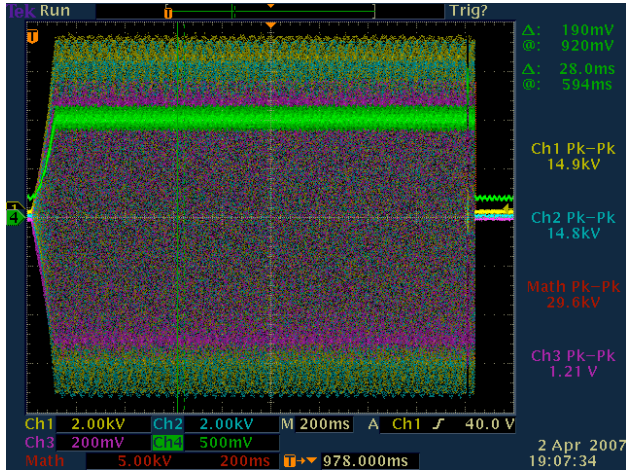


Fig. 5. Arcing in vacuum capacitor. When RF voltage of 15 kV was applied, the gap voltage dropped. Automatically, the voltage recovered. The whole system was stopped by interlock after 10 ms.

この真空コンデンサーはRCS空洞では1台につき1個、MR空洞では12個以上使用しているため、100個に近い数が必要となる。その最終の選別を行うため、DC耐圧のあるものに対し、トンネル外にあるRFシステムを用いて100時間以上のRF15kVの印可試験を行った後、再度DC耐圧の劣化の有無を調べ、MRトンネル内に設置した。図6に閃絡の検出に使用したインターロックシステムのブロック図を示す。高速のデータロガーにより、閃絡によるRF電圧の不足を検出し、半導体アンプを停止させると同時に、制御とは別のPLCを用いて、電子メールを送信させ、関係者に停止を知らせることができる。

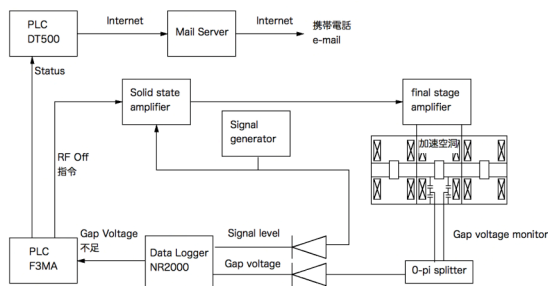


Fig. 6. Block diagram for arc detection.

耐圧の不十分なものに対しては、メーカーにおいて再度調整（高電圧でのコンディショニング）を行った。更に今後加速器運転により加速空洞内のコンデンサーが放射化し、容易にメーカーにコンディショニングを依頼できなくなることが予想されるため、我々は独自のコンディショニング装置を制作し、コンディショニングを行った。このコンディショニング装置はメーカーの装置と異なり、閃絡発生時に電源を切り、流入電力を制限している。図7にこの

装置により、コンデンサーの耐圧があがっていく様子を示す。

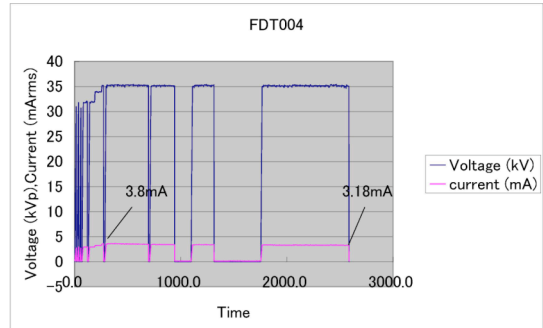


Fig. 6. Conditioning of vacuum capacitor. Time variations of arcing voltage (Blue) and AC current through capacitor (red) are shown. Although arcing occurred below 30 kVAC at the beginning, it could stand 35 kVAC, at last.

6. まとめ

今後、J-PARCはMLF施設へのビーム供給、MRでのビーム加速が予定されている。安定したビーム供給のため、高周波システムのキーとなる装置、部品の開発を行ってきた。現在、RCSとMRのシステムは順調に稼働している。

参考文献

- [1] M. Yoshii, et al., "The Status of the J-PARC RF Systems", Proc. of EPAC08, p385, URL: <http://cern.ch/AccelConf/e08/papers/mopc126.pdf>
- [2] F. Tamura, et al., "BEAM ACCELERATION WITH FULL-DIGITAL LLRF CONTROL SYSTEM IN THE J-PARC RCS", Proc. of EPAC08, p364, URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e08/papers/mopc126.pdf>
- [3] CERN技術資料EDA00097
- [4] F. Saito et al., "Development of MW-class high-voltage DC power supply based on series resonant converter technology", Proc. of the 2005 International Power Electronics conference" April 4-8, 2005