

The status of J-PARC Ring RF systems

Masahito Yoshii^{A)}, Eiji Ezura^{A)}, Katsushi Hasegawa^{A)}, Masahiro Nomura^{A)}, Chihiro Ohmori^{A)}, Alexander Schnase^{A)},
Taihei Shimada^{A)}, Hiromitsu Shimada^{A)}, Akira Takagi^{A)}, Fumihiko Tamura^{A)}, Makoto Toda^{A)}, Masanobu
Yamamoto^{A)}, Koji Takata^{B)}, Shozo Anami^{C)}, Koichi Haga^{C)}, Koki Horino^{C)}

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

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

^{B)} KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{C)} Nippon Advanced Technology (NAT)

3129-45 Hirahara, Muramatsu, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, 319-1112

Abstract

The R&D for the Magnetic Alloy loaded rf-systems to realize a high field gradient accelerating system for the J-PARC high intensity proton synchrotron have been initiated in 1995. The MA loaded cavities have no tuning control loop. The cavities act as if it is a passive load. The RCS RF system, especially, is designed to cover both the accelerating frequency and the second harmonics for bunch shape manipulation and the optimum Q-value is Q=2. On the other hand, the MR RF system is realized Q~25 by using a cut-core configuration. The first acceleration of a proton beam at J-PARC RCS started in October 2007. And, The beam commissioning of the 50GeV MR started in May 2008.

J-PARC リング高周波システムの現状

1. はじめに

J-PARC 実現に向けた高電場勾配型高周波加速空洞システムの研究開発は、平成7年高エネルギー物理学研究所田無分室で始まった。特に、J-PARC RCSは繰り返しが速く、またリングのフリースペースの制限からこれまでより2倍以上の加速電場勾配が求められた。さらにビームパイプのサイズが大きいことなどからより大きな磁性材コアが必要になり、大型コアの製造、その冷却方式など様々な技術的課題を明らかにしなければならなかった。金属磁性材料は飽和磁束密度、熱転移温度が高く、従来のフェライト磁性材料に比べて高い高周波磁界に対してもその磁気特性が安定であることに着目し、その実用化を進めた^[1]。もともと金属磁性体を使った加速空洞はイオン加速、医療用陽子シンクロトロンなど広い周波数帯域をカバーする比較的加速電圧の低い装置の応用に限られていたが、平成12年、現システムの原形となる直接水冷型高電場勾配加速空洞を完成させた。その後50GeV MR及びRCS両シンクロトロン空洞の量産に入ったが、最適なQ値の実現方法、コアの防錆方法など技術的課題を建設と平行して解決していかなければならなかった。

現在、50GeV MRに4台、RCSに10台のシステムが設置され安定に稼働している。RCSビーム加速、MR DCモードでのビーム試験も順調に行われた。そして平成20年12月には、3GeVビーム利用施設へのビーム供給及びMRでは30GeVビーム加速と遅い取り出しがスタートする。

2. 加速空洞

高電場勾配高周波加速空洞に採用した金属磁性体は、飽和磁束密度、キュリー温度が高く、高周波

磁界強度や温度に対して従来のフェライト磁性体に比べ飛躍的に安定な特性を有する。金属磁性体のQ値はQ~0.6程度と低い。けれども、金属磁性体の比透磁率は大きく、MAコアで空洞を組んだときのシャント抵抗を十分な値にすることが出来る。また、MAコアは厚さ20 μ mの表面が絶縁された薄い磁性リボン材料を巻いて製造される。そのためMAコアの大きさに制限はなく、3GeV RCSのようにビームパイプが大きな加速器への応用が可能になった。J-PARCシンクロトロンの高周波システムの主なパラメータを表-1に掲げる。

表 - 1: The design parameters of RF Systems

	3GeV RCS	50GeV MR
Energy (GeV): Inj.	0.181	3
Ext.	3	50
γ_t	9.14	-31.6 ^{*1}
Cycle or period	25Hz	3.64 sec
Number of proton	8.3 $\times 10^{13}$	3.3 $\times 10^{14}$
Acc. Voltage (fund. ^{*2})	450kV	280kV
Max. ϕ_s	45 degree	28 degree
Circumference (m)	348.333	1567.5
RF harmonic (fund.)	2	9
RF frequency (fund.)	0.938 /	1.67 /
Inj. /Ext.	1.67MHz	1.72MHz
Number of cavities	11 (+1 spare)	6 (+1 spare)
Voltage per cavity	41kV	47kV
Quality factor	2	20~30

*1: imaginary transition energy

*2: fund. = Fundamental

大強度陽子ビームの加速では、空間電荷によるチューンの拡がりを抑制するため、周回するビーム

のピーク電流を下げるのが重要になる。このことを考慮し、初期設計の段階で2次高調波システムを検討してきた。3GeV RCSでは、パンチが形成される入射部とMRとのパンチ整合のための取り出し部で特に2次高調波の導入が不可欠である。RCSの加速周波数は0.938MHzから1.67MHzまで1.8倍変化する。2次高調波システムの周波数帯域が加速周波数帯とほぼ重なっていること、リングがコンパクトに設計され、空きスペースの有効利用の観点からRCS空胴はQ値を $Q=2$ としてビーム加速のための基本波成分の電圧とパンチ形成に必要な2倍高調波成分の電圧を1つの空胴で発生できるように設計した^[2]。一方、50GeV MRでは、RCSとのバケツ整合、空間電荷の緩和などRCS同様2次高調波システムが有用である。ただMRの場合、加速周波数は1.67MHzから1.72MHzに変化し、変化量が3%弱と小さいこと、入射時間が長く、トランジェント・ビームローディングに対する考慮も必要なことから最適なQ値として $Q=25$ を選択した^[3]。したがって、加速空胴と2次高調波空胴はMRの場合別なシステムになる。

2.1 空胴Q値の最適化

金属磁性体のQ値は低く、空胴の高周波損失はそこに装填した金属磁性体で殆どが発生する。装填するトロイダル状のコアを2分割し、その切断面間隙を調整することでコアの磁気抵抗を変化させ見かけ上のインダクタンスを操り、空胴Q値を最適化するカットコア法^[4]を提案してきた。カットコアは、樹脂コーティング→ウォーター・ジェット→切断面の樹脂含浸→ダイヤモンド研磨などの製造プロセスを経る。コア表面の樹脂コーティングでは、純水冷却されるコアの防錆及び切断した時の形状維持を目的とし、また、ダイヤモンド研磨ではウォーター・ジェット切断で破壊された層間絶縁を回復させることを目的としている。ウォーター・ジェットの切断精度は $\pm 0.5\text{mm}$ 程度であったがこの研磨工程により精度は 0.1mm 以下にすることができる。文字通り切断面は鏡面に仕上がるが、防錆の点ではたとえば樹脂による切断面コーティングに適さないなどの課題が残った。実際には、コア切断面は一度酸化第二鉄に覆われ赤さびが発生するが、その後還元され黒錆に変化する。純水冷却系の脱酸素により、さらに防蝕効果を高め、腐食を抑制している^[5]。現在、コアの切断面を事前に黒錆化させる方法の研究開発を進めている。MR空胴の場合、切断面の間隙を10mmに設定することで最適値 $Q=25$ を得ている。RCS空胴では、 $Q=2$ がその最適値である。カットコアで実現するには切断面の間隙距離は 0.8mm になり、切断の工作精度や冷却などの技術的困難な課題を短期間で解決する必要があった。カットコア法に代わる方法として、加速空胴を構成する3つの $\pi/2$ 型ギャップセルの内、2つのセルに未切断コアを残りの1つのセルに工作管理可能な2mm程度に隙間を開けたカットコアを装填するハイブリッド・セル法をRCS空胴の $Q=2$ を実現するバックアップとして提案した^[6]。しかしながら最終的にはより信頼性の高い、セルに未切断

コアを使用し、空胴と並列にhigh-Qのインダクタンスを接続することでインダクタンスが下げる方法^[7]を見出した。このようにして、RCSでは空胴にカットコアは用いずに並列に接続したhigh-Q インダクタンスと周波数調整用のコンデンサーにより、空胴の共振パラメータを決定している。

3. 高周波源

高周波源は空胴に電圧を発生するだけでなく、大強度陽子ビームの加速に必要な電力の供給能力がなくてはならない。空胴のインピーダンスから加速電圧発生に必要な電力及びビームに供給される電力から真空管電力増幅器のピーク電力は1MWに達する。空胴の広帯域化にともない、複数の合成波形の重畳運転、ビームローディング補償のためのフィードフォワードを考慮し、真空管電力増幅器を設計した。真空管には陽極損失600kW-class (TH589 or 4CM500,000GB)の4極管2本をカソード接地でグリッドをプッシュ・プル励振し、class-AB動作させた。このクラスの電子管はコントロールグリッドの入力容量がnFを超え大きい。コントロールグリッド励振回路の広帯域のため、オールパス回路を導入した。

3.1 陽極電源

陽極電源は、2つの真空管に対して共通電源とし、電圧13kV-電流92Aをそれぞれ最大定格としている。RCS/MRでは、高繰返し、高効率(30~60%)が求められる。特にRCSでは、25Hzの繰返しの中で出力電流が1桁以上変化し、いわゆる出力電圧のサグ変動を小さくすることが真空管増幅器の安定化に不可欠である。陽極電源の電圧安定性は、出力電流によらずリップル変動 $\pm 0.2\%$ 、サグ変動は $\pm 1\%$ とした。従来の変圧整流器とコンデンサーバンクを組み合わせた電源方式では25Hzの繰り変動に対応するためのコンデンサー容量が大きく、整流リップル変動をどのように制御するなどの問題があった。一方、半導体スイッチング素子を使う方式は、当時は新たな試みであり、特にスイッチングノイズに関わるEMIが問題視された。

J-PARCリング高周波の陽極電源は、スイッチング素子IGBTを使い、インバーターユニット15台を並列に接続してその出力構成した。これによりユニットの異常に対して、異常ユニットを短時間で切り離すことで早期にシステム復旧が可能になる。使用するIGBTは、スイッチング周波数を最大33kHzまで変化させることが可能であり、出力電流値はその周波数を変化させることで制御される。また、真空管保護のためクローバーレス方式を採用し、IGBTのゲート信号を遮断することでVCBを遮断することなく電源出力を $200\mu\text{s}$ 以下の高速停止することに成功している^[8]。

陽極電源の研究開発は平成11年頃に開始し、平成12年に現在の原型モデルが完成した。陽極電源は直

流電源であるが半導体スイッチング方式であるため、ビームの加速周波数と重なる800kHz付近に電源ノイズは分布するため、設計には高周波電源の考えを取り入れる必要があった。さらにトンネル内の真空管増幅器や給電ケーブルからのEMIの影響も重要になる。原子力研究開発機構の高周波テストベンチ（ヘンデル棟）では、電磁ノイズの影響をみるために実際に模擬したケーブル選定、接地系の取り方など調査した^[9]。

3.2 補助電源とその制御

陽極電源を除く、真空管増幅器の電源は、真空管ごとに用意されている。それらは1つの電源ラックに収められPLCにより陽極電源を含めたシーケンス制御がローカル及びリモートで可能となっている。そして、J-PARC制御ネットへはVxWorksをOSとするEPICS/IOCを介して、機器の状態ステータス及びアナログモニターが可能になっている。

3.3 トランジスタ増幅器

KEKとCERNの間では2003年2月にCommissioned Research Contractが交わされた。それによりKEK側はLHC-Leir用MA空胴の設計/制作し、CERN側がJ-PARC用トランジスタアンプユニット(1kW)の開発が開始した。RCSとMRの駆動段増幅器は、複数の高調波合成波形を出力するので高いPEPパワーが要求される、また、ビーム負荷の変動に対応するため、半導体アンプは不整合負荷に対して十分な耐性を備えていなくてはならない。このようにして設計されたCERN型1kWユニットは、ゲイン58dB、1dBバンド幅0.45MHz~5.1MHzである。RCS/MRの両リングに周波数帯域がカバーされている。RCSでは9台、MRでは4合成してそれぞれの定格出力8kW及び4kWを得ている。また、アンプユニットの状態はPLCで制御され、故障しては最初の1台で“WARNING”のみ、2台目以降、システムが異常停止するよう、ビームの安定供給に対する設計がなされている。

4. ローレベル高周波制御

広帯域MA空胴は、周波数同調のための制御ループを持たず、受動的な負荷として動作する。これは大強度ビームを安定に加速/運動操作する上で重要な考えである。我々はそれを採用した。ローレベル高周波制御は高精度かつ安定、また再現性よく動作し続けることが求められる。高精度高周波信号発生はダイレクト・デジタル・シンセシス(DDS)をベースとし、FPGAによるデジタル信号処理を導入したフルデジタル高周波制御システムを開発した。

RCS/MRでは、偏向電磁石の磁場パターンから運動量を計算し、リングの周長をもとに周回周波数が求められる。RCSでは1 μ s毎、MRでは200 μ s毎の基準周波数の時系列パターンが作られる。高周波発生モジュールでは、高周波ハーモニックに応じて基準周波数に同期した加速周波数や2次高調波信号などが作られる。基準周波数に同期した高調波信号は、

ビーム加速やバンチ操作のため信号として使われるほか、自動振幅制御、位相フィード、フィードフォワードのためのIQ変調の基準信号として利用される。

5. ビームコミッショニング

現在RCSに10台、MRに4台の高周波システムが据え付けられ、昨年10月からのRCSビームコミッショニング、今年5月、6月のMRビームコミッショニングで運転している。特にRCSでは磁場パターンの安定性、再現性が良く、また、リニアックビームも再現良く安定であったため、One-shotビームのスタディーで将来の大強度ビーム加速に向けた貴重なデータを効率よく得ることができている。

今年秋には物質生命研究所の各実験施設の施設検査が予定され、その後12月からは本格的に100kWビーム供給を目指した3GeVビームの利用実験が開始される。そのため、RCSでは11台目システムを11月に追加設置する計画である。また、MRでは2008年12月~2009年2月のビームコミッショニングで30GeVビーム加速およびハドロン実験施設への遅いビームの取り出しを開始する。さらに、2009年4月からニュートリノ実験施設へのビーム供給も開始する。MRでは、5台目システムの追加設置を2009年3月に行うようその準備を進めている。

参考文献

- [1] Y. Mori, et al., "A New Type of RF Cavity for High Intensity Proton Synchrotron using High Permeability Magnetic Alloy" Proceedings of EPAC98, page 299-301, 1998
- [2] Accelerator Technical Design Report for High-intensity Proton Accelerator Facility Project, J-PARC, KEK Report 2002-13
- [3] M. Yamamoto et al., "Beam Loading Effects on High Gradient MA Loaded Cavity", PAC99, New York, USA page 860-862, 1999
- [4] M. Yoshii, et al., "J-PARC Ring RF System" Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Funabashi, Japan, 2004
- [5] A. Schnase et al., "Status of J-PARC Ring RF systems" Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, Japan, 2007
- [6] A. Schnase et al., "Hybrid Cavity for J-PARC Rapid Cycling Synchrotron" Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tosu, Japan, 2005
- [7] A. Schnase et al., "MA cavities for J-PARC RCS controlled Q-value by external inductor", PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA page 2131-2133
- [8] F. Saito, et al., "Development of MW-class high voltage DC power supply based on series resonant converter technology" Proceedings of the 2005 International Power Electronics Conference.
- [9] M. Yoshii, et al., "Present status of J-PARC Ring RF Systems", PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA page 1511-1513
- [10] F. Tamura, et al., "Dual-harmonic auto voltage control for the rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex", Phys. Rev. ST Accel. Beams 11, 072001 (2008)