

J-PARC RING RF SYSTEMS

M.Yoshii^{1,A)}, S.Anami^{A)}, E.Ezura^{A)}, C.Ohmori^{A)}, A.Takagi^{A)}, M.Toda^{A)}, Y.Hashimoto^{A)}, K.Hara^{A)}, A.Schnase^{B)},
F.Tamura^{B)}, M.Nomura^{B)}, M.Yamamoto^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801, Japan

^{B)} Center for Proton Accelerator Facility, Japan Atomic Energy Research Institute

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195, Japan

Abstract

To achieve a MW-class proton accelerator facility prior to the world, a new type of accelerating system using a high permeability magnetic alloy has been developed and constructed in the J-PARC synchrotron complex. In this paper, the basic design of the ring rf-system is mentioned. And, the commissioning scheme in early stage is described.

J-PARC 陽子シンクロトロンの高周波加速システム

1. はじめに

大強度の陽子ビームを加速するシンクロトロンでは加速空洞の高電場勾配化が不可欠である。従来のフェライト磁性体を装填した空洞システムは、磁性体の高周波磁束に対する非線形効果及び不安定性、発熱密度制限、磁気余効効果と同調制御など、大強度加速器に応用する上でいくつかの課題を解決しなくてはならない。一方、金属磁性体は飽和磁束密度が高く、Qが低いことから高周波磁束密度に対して一般に非線形性を示さない。また、キュリー温度が高く比較的溫度特性にも優れている。このように、金属磁性体はフェライト磁性体に代わり、空洞の高電場勾配化、広帯域化を実現する上で不可欠な磁性材料であることが分かってきた¹⁾。

J-PARC陽子リングは、速い繰り返し(25Hz)のシンクロトロン (**R**apid **C**ycling **S**ynchrotron; RCS) と 50GeV メイン・シンクロトロン (**M**ain **R**ing; MR) で構成される。RCSのビームパワーは1MW、RCSから取り出される3GeVビームは、物質生命科学実験施設(MLF)とMRに供給される。MRでは、さらにビームを50GeVまで加速し、ニュートリノ実験や原子核素粒子実験にビームを供給する。

世界に先駆けメガワットビームの加速実現に向けて、J-PARCでは金属磁性体を利用した空洞を用いることを前提にリングの設計されている。

2. 加速空洞

RCSは12台 (内1台予備)、MRは7台 (内1台予

備)の加速空洞がそれぞれリングの直線部に配置される。空洞はビームの加速や縦方向の電荷分布を制御する役割を担っている。後者は空間電荷効果によるベータトロン振動のチューン・シフトの抑制を目的とし、RCSでは2次の高調波成分を基本波に重畳している。RCS空洞は表-1にも示すように2つのバンド幅をカバーしなければならない、空洞の最適なQ値としてQ=2が選ばれた。一方、MRの加速周波数可変範囲は3%程度であるため、空洞のQ値として~15としている。このように狭帯域化することによって、ビーム電流が誘起する高調波ひずみを抑えることができる。

Table 1: RF parameters

	RCS	MR
Frequency(MHz): `fundamental` `second`	0.938*~1.67 (h=2) 1.877~3.34 (h=4)	1.67~1.72 (h=9) 3.34~3.44 (h=18)
RF harmonics: `fundamental`	2	9 or 18
Peak accelerating voltage:	450kV	280kV
# of stations	11+(1)**	6+(1)**

*: 181MeV injection. The original value is 1.23 MHz at 400MeV injection

** : 括弧内は予備機の台数

空洞のQ値を自由に調整する手法としてカットコアの技術を応用できる²⁾。トロイダル状のコアを2つに切断し、切断面の距離を変化させるとコアの磁気抵抗を操作し、実効的なインダクタンスを変化させ、Q値を調整する。

$$\frac{1}{\mu_{eff}} = \frac{1}{\mu_r} + \frac{l_{gap}}{l_m} \quad (1)$$

¹⁾ E-mail: masahito.yoshii@kek.jp

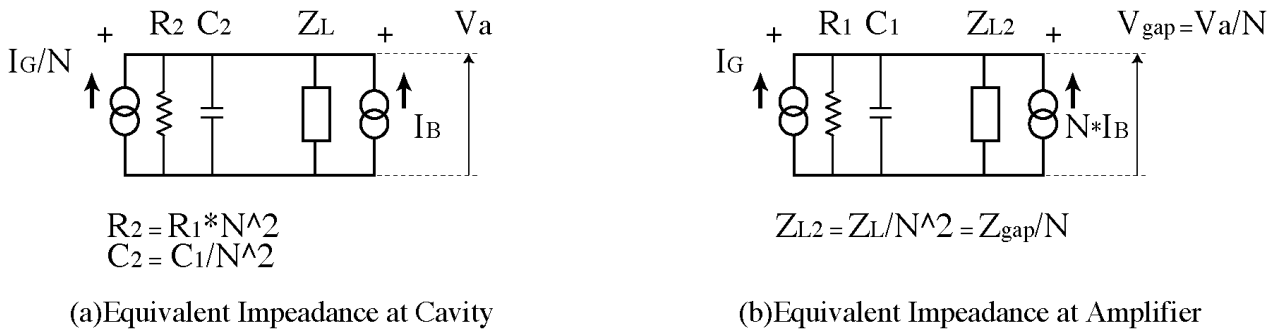


図1 RF systemの等価回路：N = voltage step-up ratio = number of gaps, R1 = plate resistance of push-pull system, C1 = total inter-electrode capacitance of push-pull system, I_B = beam current, V_{gap} = peak gap voltage, V_a = peak accelerating voltage per system, Z_{gap} = Gap impedance, Z_L = load resistance of N-gap rf system (=N* Z_{gap})

式(1)において、 μ_{eff} は実効的な透磁率、 μ_r は磁性体本来の透磁率($\mu_r \sim 2000$ at 1MHz)、 l_{gap} は切断面の空隙距離、 l_m は平均磁路長 (~1600mm(MR), 1900mm(RCS))。

空洞は3つ加速セルに分かれ、3つの加速ギャップを有する。高周波源とはバスバーで並列に結合される。したがって、高周波源から見た空洞の等価インピーダンスはギャップ・インピーダンス(Z_{gap})の1/3 (図1 b) に成る、その反面、3倍のビーム電流が高周波源に作用する。図1は、高周波システムをビームと高周波源のそれぞれから見た等価インピーダンスを示す。

3. ビーム加速及びビーム負荷補償

平成19年度のコミッションングはリニアックのエネルギー181MeVでスタートする。MRユーザへのビーム強度を維持するために、この期間MR高周波のハーモニック数は9から18に変更して運用される。また、RCSでは、 $h=2$ で1バンチ加速が行われ、MRへ15バッチの入射が行われる。物質生命科学実験施設とMRに対して、この期間、2バンチ及び1バンチ加速の運転が交互に行われることになる。

3.1 RCSでのビーム加速

RCS入射ではビーム損失を抑えることが、1MWのビームをRCSから引き出す上で重要な課題の1つである。そのため、横方向のペインディングのみならず縦方向の電流密度拡散の手法が粒子トラッキングにより研究されている^[3]。

リニアックビームは、リング高周波の周波数に同期したチョッパー波形によりパルス整形され、RCSの待ち受けバケツに入射される。入射ビームの蓄積・バンチ形成過程では、空間電荷効果の抑制の

ためビームの電荷密度分布の制御が重要になる。効果的な波形操作として、(a)運動量オフセット入射、(b)位相オフセット入射、(c)2次高調波の重畳などを検討している^[3]。

RCSからのビームは、中性子、ミューオンやMR利用などそれぞれの要求に応じた、ビームパラメータで取り出される。たとえば、ミューオンユーザーは短バンチビーム(100ns程度)を要求し、一方、MRではピーク電流を十分に押さえた縦方向に広い、長バンチビームを求められる。このように、ビーム供給先に応じてパルス毎に高周波を制御させ、安定に動作させることが求められる。低レベル高周波制御システムは、最新のデジタル技術を導入し制御波形の任意発生により、多様な運転に対応出来るよう設計されている。

3.2 MRでのビーム加速

MR高周波システムは、RCSから取り出されるバンチの数に応じて高周波のハーモニック数(h)を変えた運転が考えられている。MRの周長はRCSの4.50倍に設計されているので、基本設計ではRCSの $h=2$ に対してMRは $h=9$ 、RCSから2バンチ×4バッチの合計8発(1バンチ分の空間は取り出しキッカーの立ち上がりスペースのため使われる)のバンチが入射される。一方、リニアックのエネルギーが181MeVで運転されるコミッションングの初期には、RCSのビームパワーがバンチあたり0.3MW(粒子数 2.5×10^{13} ppb)に制限される。MRビーム強度を維持するためこの期間MR高周波は $h=18$ で運転される。MR高周波($h=18$)のバケツ幅は300nsに対して、RCSから120ns(全幅)のバンチが1バンチ×15バッチ入射される、そして、3つの空バケツがキッカーの立ち上がりスペースとして使われる。MR高周波システム

の $h=18$ への対応は、空洞の同調用コンデンサーの変更、低信号レベル高周波制御システムのパターン変更で行われる^[7]。

MRにおいてビーム入射に要する時間は、 $h=9$ の時120ms、 $h=18$ では560msになりさらに長くなる。空間電荷効果によるベータatron振動のチューン・シフトを抑えるために、縦方向の荷電密度の尖塔値と平均電流の比で与えられるバンチング係数の大きさを目安に、RCSから取り出されるビームの分布やMR入射後の縦方向分布の操作が行われる。

単バンチビームの不安定性に関しては、Keil-Schnell-Boussardの計算式が示すインピーダンスの閾値を元に考察した。それによると50GeV付近のエネルギー域でマイクロウェーブ不安定性を抑えるために、ビームエミッタンスをブローアップさせる必要がある^{[4][5]}。

3.3 フィードフォワード補償

空洞の広帯域化は同調システムが省略でき制御系の安定性が増す反面、帯域内にあるビームの高調波成分が誘起する電圧により波形ひずみが生じる問題がある。この波形ひずみを補償する方法として、ビーム・フィードフォワードが積極的に導入される^[6]。フィードフォワードはリング上のビーム電流モニターの波形から対象になる高調波成分をそれぞれ分析・抽出し、高周波システムの伝達関数を考慮した上、ビームが各空洞を通過するタイミングに合わせて位相反転し空洞に流すことでビームが誘起する電圧をキャンセルする。

Table 2: フィードフォワード補償に必要なビームの高調波成分

	400MeV入射	181MeV入射
RCSビーム ($h=2$) Double bunches Single bunch	$n = 2, 4, 6$ -	$n = 2, 4, 6$ $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$
MRビーム ($h=9$)	$n = 8, 9, 10$	N/A
MRビーム ($h=18$)	N/A	$n = 15, 16, 17, 18,$ $19, 20, 21$

表-2は運転パターンの違いによりフィードフォワード補償で対象になるビームの高調波成分をまとめる。RCSでは1バンチ加速のとき奇数次の高調波補償が必要になり、さらに、MRでは $h=18$ 運転のとき空洞のQ値の低下から $n=15\sim 21$ の高調波の補償が対象になる。これらはいずれも低信号レベル高周波制御モジュールを拡張することで対応される

3.4 シンクロナイゼーション

2つのリングの出入射同期 (シンクロナイゼー

ション) は、整数倍の関係にある2つの周波数の位相差を制御することで実現される。現実には、MRの入射周波数は固定し、RCSの周波数にオフセット周波数を許される運動量誤差 (0.1%) の範囲内で加える。

RCSのトランジション・ガンマは9.14、取り出し付近のスリップページ係数は小さく、殆ど変化しない。そのため、予測制御により最大180度の位相差をコントロールするにはシンクロナイゼーション・プロセスは加速の途中からスタートしなければならない^[8]。

4. まとめ

J-PARCリング高周波は金属磁性体の特性を生かした新しいタイプの広帯域で高電場勾配な空洞を導入し、メガワットビームの加速実現を目指している。カットコアの技術を導入することでRCSとMRの両方で金属磁性体の応用が可能となった。大強度ビームを加速する上で、フィードフォワードによるビーム電流のローディング補償が不可欠である。RCSの1バンチ加速やMRの $h=18$ 運転など、多様な運転に対応した高周波システムが求められている。

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, p229-301
- [2] C.Ohmori, et al., "High filed gradient cavity for JAERI-KEK joint project", Proceedings of EPAC2002, p.257 - p.261
- [3] M. Yamamoto, et al., "Longitudinal beam dynamics on 3GeV PS in JAERI-KEK joint project", Proceedings of EPAC2002, p.1073-p.1075
- [4] T.Uesugi, et al., "Longitudinal emittance control in the J-KJ 50 GeV Synchrotron", Proceedings of EPAC2002, p.1311 - p.1313
- [5] M.Yoshii, et al., "RF Acceleration Systems for the JAERI-KEK Joint Project", Proceedings of EPAC2002, p.2181 - p.2183
- [6] F.Tamura et al., "Multi-Harmonic RF Control System for J-PARC RCS", Proceedings of PAC2003, TPAB-015
- [7] T.Uesugi, et al., "Direct-Cooling MA Cavity for J-PARC Synchrotrons", Proceedings of PAC2003, TPAB-021
- [8] "Accelerator Technical Design Report For High-Intensity Proton Accelerator Facility Project, J-PARC", KEK Report 2002-12 or JAERI-Tech 2003-044, p.561-563