

J-PARC リング RF 空洞の更なる高勾配化とビーム増強

(Upgrade scenario of J-PARC ring RF)

大森千広¹、島田太平¹、シュナーゼ・アレクサンダー¹、鈴木寛光¹、高木 昭¹、
田村文彦¹、戸田 信¹、野村昌弘¹、原 圭吾¹、長谷川豪志¹、山本昌亘¹、吉井正人¹
¹JAEA&KEK J-PARC

Abstract

The Magnetic Alloy (MA) cavity was adopted for J-PARC synchrotrons for reducing the size of rings and for future upgrade. So far, 11 and 5 RF systems were installed and have been operated successfully in the RCS and MR, respectively.

Recently, it is found that the characteristics of MA will be improved by a factor of 2 by annealing under magnetic field. The mechanism of improving impedance was investigated using μ SR technique which is a powerful tool to study the magnetic property of materials. Adopting the new technology to large MA cores for accelerators, it is expected to upgrade the performance of J-PARC synchrotrons including beam power upgrade and a short bunch for muon experiments.

INTRODUCTION

J-PARC RCS では従来の約 2 倍の加速勾配を実現できる金属磁性体加速空洞を前提に加速器設計をおこなった世界で初めての加速器である[1]。これにより MLF(Material and Life science Facility)ユーザーの要望のビーム幅 $1 \mu\text{s}$ 以下を満足しながら MR に必要な 3 GeV を達成できる約 350m のリングが建設された。RCS は 3 回対象のリングで、一つの長い直線部が RF に割り当てられた。この長さは途中の 5 台の Q 電磁石を含めて 44m であり、11 台の金属磁性体空洞により大強度ビーム加速に必要な 400kV をえることができた実現している[2]。最終的に、この直線部には最終的に 12 台の加速空洞が設置される。

RCS では直径 20cm を優に超える大口径のビームパイプが必要なため、高い加速電圧を得ることは従来のフェライト空洞を用いた技術では困難であった。例えば RAL の ISIS のフェライト空洞では 1 m あたり 10kV 以下の加速勾配であった (図 1)。これに対し J-PARC RCS では金属磁性体空洞[3]の開発により約 20kV/m の加速勾配を実現している。

RCS のユーザーであるミュオンを用いた実験では、より短パルスかつ大強度のビームが求められている。これを大強度の陽子ビームで実現するためには、入射時の縦方向エミッタンスを減らすことができないため、バンチを位相空間内で運動量方向に広げ、バンチ長を短くすることになる。このための加速後半でのバンチマニピュレーション (バンチ回転) が必要であり、より高い高周波電圧が必要となる。

MR の RF システムも同様に金属磁性体空洞が用いられている。MR のビーム増強のシナリオでは加速電圧を上げ、加速周期を 1Hz まで早めることが必要となっている。この論文では RCS と MR 両方の加速システムのアップグレードとそれによる加速器の性能向上について述べる。

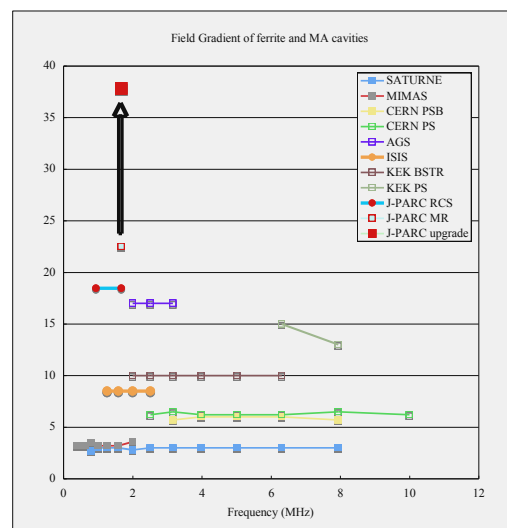


図 1、陽子・イオン加速空洞の加速勾配

MAGNETIC ALLOY

J-PARC 加速器において金属磁性体空洞が用いられている主な理由は、この磁性材料は次のような特質を持つためである：

- (1) 飽和磁束密度が高く、透磁率とシャントインピーダンスが高い高周波電圧下でも安定していること
- (2) Q 値が低く、広帯域にわたって高いインピーダンスを持つため、空洞共振の同調回路を用いずにビーム加速を実現できる。これにより、大強度ビームに対しての加速制御を簡易化することができる

近年、この金属磁性体コアのシャントインピーダンスを飛躍的に改善する手法が見つかった[4]。これは金属磁性体リボンを結晶化するための温度処理の過程で磁場を加え結晶の磁化容易軸の向きをそろえる手法である。この手法を従来よりも薄い金属磁性体リボンに適用した場合、磁気特性が約 2 倍程度向

上する。図2は直径10cmの小型コアを用いて測定したものである

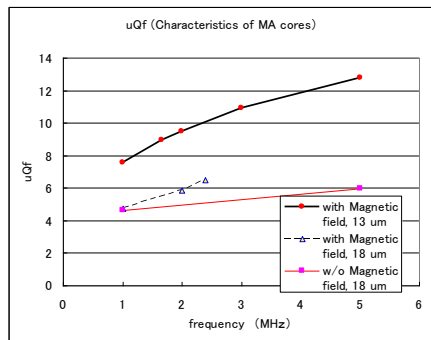


図2. Characteristics of MA cores. The μQf product indicates the shunt impedance of MA cores. By applying a magnetic field during the annealing process of the cores, the impedance will be twice larger compared to ordinary MA cores.

この優れた金属磁性体コアの特性を元に、現状の3ギャップを4ギャップに増やした加速空洞の設計を行った(図3)。加速空洞全体の長さは現在のものにくらべ7cm長くなるが、現在のスペースにおさめることができる。コアの特性が向上するため、コアの厚さを現状の3.5cmから2cmに減らしたとしてもインピーダンスは今より40%増やすことができる。加速ギャップの数が増えるため、高周波増幅器からみた空洞のインピーダンスはほぼ同程度のままである。

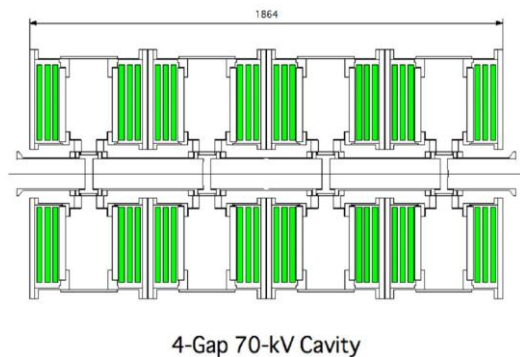


図3. 高インピーダンスコアを用いた高勾配空洞。

RCS

μSR のための短バンチ形成

J-PARC RCSで加速されたビームはMLF施設において中性子散乱やミュオンを用いた研究に使われている。このうちミュオンを用いた物性研究の手法として μSR (muon Spin Rotation/Relaxation/Resonance)実験では実験の分解能を向上させるうえで陽子ビームのバンチ幅が短いことが重要である。通常の加速ではadiabatic dampingによりビーム幅は100ns程度ま

で細くなる。RCSは大強度の加速器であるため、入射の時点では積極的に大きなエミッタンスを形成することが望ましく、これ以下にすることは難しい。

加速後半でのバンチ回転はこの問題を解決する一つの手法である。図4はRCSにおいて実際にバンチ回転の試験を行った時の電圧パターンである。ビーム取り出しのシンクロトロン振動4分の1周期前に急に電圧を上げ、四極振動を励起している。この直前直後の電圧の違いがバンチとバケツの mismatch となるため、より高い電圧でバンチ回転をすることが望ましい。これにより、バンチ幅で60ns程度のバンチを形成することができた(図5)。バンチ回転は加速終了でおこなうため、ビームサイズが小さくなっており、バンチ回転によって生じる大きな運動量広がりがあってもビームを失うことはなかった。

しかしながら、高分解能な μSR に必要なバンチ幅は約30nsであり、現在のRCSの加速システムでは実現は難しい。これに必要な加速電圧は約700kVであり、現状の電圧をほぼ倍にする必要がある。

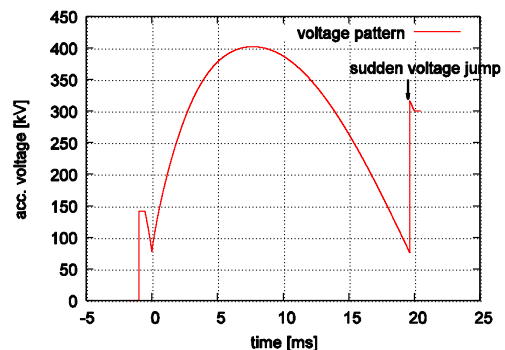


図4. RF voltage pattern for bunch rotation in the RCS. Before the beam extraction, the RF voltage was increased to excite a quadrupole oscillation. After a quarter turn of the synchrotron motion, the beam was extracted.

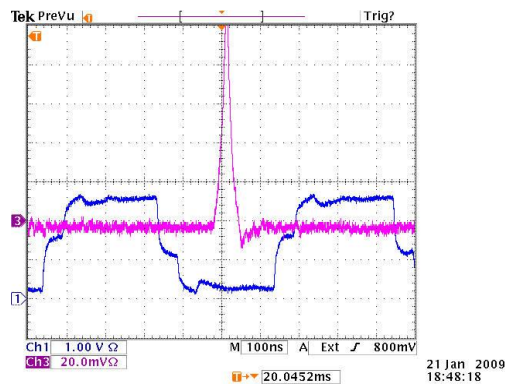


図5 The longitudinal profile of the circulating beam in the RCS before beam extraction.

RCSでのビーム増強

J-PARC RCSのビーム強度を制限する主なものは入射時の空間電荷効果であると考えられている。こ

のため、これまでも 3×10^{13} を超えるビームの試験的な加速では 2 次高調波を RF 電圧に加えバンチ幅を広げバンチングファクター 0.4 を実現することにより空間電荷の緩和を試みた。今後、設計値を超えるビーム強度を加速するためには、2 次およびより高次の高調波を加速空洞に加えバンチ幅を更に広げバンチングファクター 0.5 以上を実現することが必要となる。現状の加速空洞のインピーダンスではより高次の RF を加えることは空洞の負荷が重くなるため好ましくないが、高インピーダンスの加速空洞を開発することにより、大きなバンチングファクターを実現することができる。

高信頼性

RCS では現在 11 台の加速空洞が約 2 年間稼働している。これだけの金属磁性体空洞を同時に使用することは初めてのことである。加速空洞のインピーダンスを上げ、空洞での損失を減らすことは空洞システム全体の信頼性を向上させることにつながる。

MR

1 MW ビーム実現のための 1 Hz 繰り返し

ニュートリノ実験では 1 MW を超えるより大強度のビームパワーが求められている。ビーム強度を増やす上でバンチあたりの強度を増やすことはそれ以上のビームロスを招くことが多い。このため、電磁石の繰り返しを上げ、大強度のビームを早い繰り返しでユーザーに供給することがアップグレードシナリオとして検討されている(表 1)。

MR は周長 1.5km の加速器であるが、直線部の多くはビームの入射および取り出しを高効率で行うために使われており、現在 RF の使用できる場所は 12 箇所すぎない。このスペースを利用して必要な電圧を得る必要があるが、1 Hz の繰り返しに必要な RF 電圧は基本波で 540kV、2 次高調波で約 200kV である。MR では早い取り出しのためにビームバンチの入らない空バケツがあるために periodic transient beam loading が深刻であり、そのため空洞の Q 値を 26 とし R/Q を下げている。しかし、これにより基本波と 2 次高調波の加速空洞を分離する必要がある。すなわち、RCS 空洞のように 1 台で 2 つ以上の高周波を出力することは原理的にできない。このため、12 箇所のスペースを基本波 9 台、2 次高調波 3 台に割り振ることが必要となる。この 9 台で必要な電圧を得るためには空洞あたり 60kV 以上が必要となる。

Table 1: Upgrade of MR cavity

| | | Present | Upgrade |
|---------------------------------------|------|---------|---------|
| Total RF voltage | kV | 200 | 540 |
| Number of cavities (1 st) | | 5 | 9 |
| Number of cavities (2 nd) | | 0 | 3 |
| Voltage per cavity | kV | 40 | 70 |
| Cycle time | S | 3.6 | 1 |
| Acceleration time | S | 1.9 | < 0.5 |
| Duty factor | % | < 60 | < 60 |
| Max. fs | deg. | 30 | 61 |
| Max. filing factor | % | 75 | 70 |
| Cavity parameters | | | |
| Number of gaps | | 3 | 4 |
| Thickness of core | cm | 3.5 | 2 |
| Gap impedance | kΩ | 1.1 | 1.7 |
| Cavity Q-value | | 26 | 26 |

高インピーダンスコア実現にむけて

最近、磁場中熱処理により 27cm のコアを製造することに成功し、図 2 の小型コア同様の高い特性を確認した。次のステップとして、大型の磁場中熱処理炉の製作を行い、J-PARC サイズのコアを製造することが求められている。

CONCLUSIONS

J-PARC ではリング RF システムに金属磁性体コアを使用している。この磁性体コアの製造方法を改良することにより、より高い加速勾配を持つ空洞を作ることができる。この加速システムにより、将来の MR と RCS のビーム強度の増強に繋がる。

REFERENCES

- [1] "Accelerator Technical Design Report for J-PARC", J-PARC 03-01, KEK Report 2002-13, JAERI-Tech 2003-044.
- [2] M. Yoshii et al., "The Status of J-PARC Ring RF Systems", Proc. of EPAC08, p385.
- [3] C. Ohmori et al., "High Field Gradient Cavity loaded with MA for Synchrotrons", Proc. of PAC99, p413.
- [4] C. Ohmori et al., "Design of a new J-PARC RF cavities for short muon bunch", Proc. of PAC09. 大森千広他, "J-PARC Ring RF のアップグレード", 2008年加速器学会