

## UPGRADE SCENARIO OF J-PARC RING

Chihiro Ohmori<sup>1,A)</sup>, Shozo Anami<sup>B)</sup>, Eizi Ezura<sup>A)</sup>, Keigo Hara<sup>A)</sup>, Katsushi Hasegawa<sup>A)</sup>, Masahiro Nomura<sup>A)</sup>,  
Taihei Shimada<sup>A)</sup>, Alexander Schnase<sup>A)</sup>, Hiromitsu Suzuki<sup>A)</sup>, Akira Takagi<sup>A)</sup>, Fumihiko Tamura<sup>A)</sup>, Makoto Toda<sup>A)</sup>,  
Masanobu Yamamoto<sup>A)</sup>, Masahito Yoshii<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> KEK-JAEA J-PARC Center

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

<sup>B)</sup> Nihon Advanced Technology

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

### Abstract

The Magnetic Alloy (MA) cavity was adopted for J-PARC synchrotrons for reducing the size of rings and for future upgrade. So far, 10 and 4 RF systems were installed and have been operated successfully in the RCS and MR, respectively. The numbers of systems will be increased gradually to 12 and 9, respectively.

Recently, it is found that the characteristics of MA will be improved by a factor of 2 by annealing under magnetic field. Adopting the new technology to large MA cores for accelerators, it is expected to upgrade the performance of J-PARC synchrotrons.

## J-PARC リングRFのアップグレード

### 1. はじめに

J-PARC RCSは金属磁性体を用いた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]。これを前提にすることにより中性子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3 GeVを達成できる約350mのリングが設計された。リングは3回対象のラティスを採用し、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、ここに設置された10台の金属磁性体空洞により加速に必要な360kVを得ている[2-4]。大強度のビーム加速に対応するために、この直線部には最終的に12台の加速空洞が設置される予定である。

図1に示すようにRCSのような大口径のビームパイプを持つ加速空洞では高い加速電圧をえることが特に困難であり、フェライト空洞では1mあたり10kV以下の加速勾配であった。金属磁性体空洞[5]の開発により約20kV/mの加速勾配を実現している[6, 7]。

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[8, 9]。MRの加速空洞はRCSのものより若干短く、より高い加速勾配を実現している。MRでもRCSと同じく3回対象のラティスが採用されており、一つの直線部の約半分がRFに準備されており、最終的に9台まで設置することができる。MRのビーム増強[10, 11]のシナリオでは加速空洞の台数を増やしつつ加速空洞の勾配をあげ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。

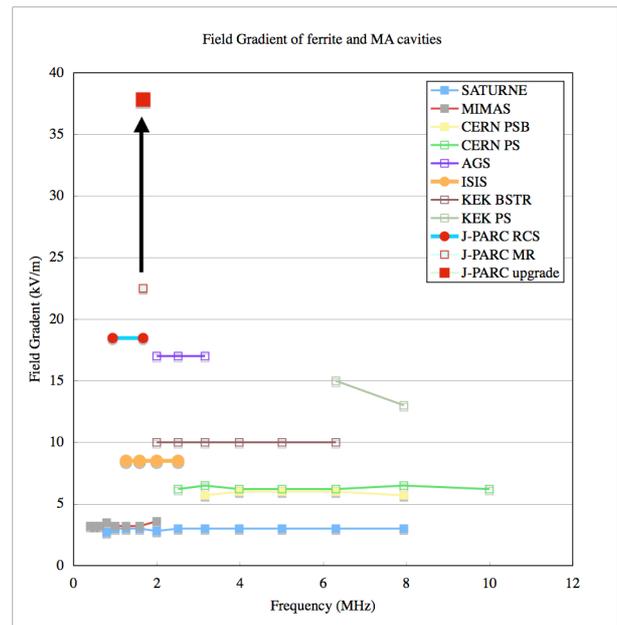


Fig. 1. Field Gradient of ferrite and MA cavities. Based on the core technology, the field gradient of a new cavity will be 38 kV/m.

### 2. MAGNETIC ALLOY

金属磁性体を用いた加速空洞は1990年頃フランスのサクレ研究所の加速器MIMASのために開発されたものが最初と思われる[12]。この時の磁性体コアにはコバルトを含んだアモルファスリボンが使われた。この時に金属磁性体を使った理由は非常に広い

<sup>1</sup> E-mail: chihiro.ohmori@kek.jp

周波数帯域（130kHzから3MHz）で使用するためであった。日本における金属磁性体空洞の開発は1995年に始まったが、この主な目的は高強度の陽子加速器に応用するためであった。ここでは微小な結晶構造を持つ軟磁性材料が用いられた。この磁性材料は次のような特質を持つ：

- (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) キュリー温度が高く温度特性が安定していること
- (3) フェライト材料よりも高い透磁率をもつ
- (4) 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
- (5) 大型のコアの製造が可能であること

この特質の(1)と(5)により高勾配の加速空洞の実現に繋がった。これとは対照的にMIMAS [12]、FAIR-HESR [13] and CERN LEIR [14] では(3)と(4)の特質を生かしている

近年、この金属磁性体コアの特性を飛躍的に改善する手法が見つかった。これは金属磁性体リボンを経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

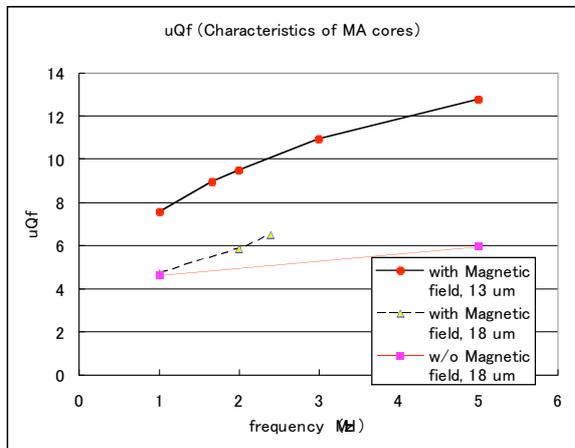


Fig. 2. Characteristics of MA cores. The  $\mu Qf$  product indicates the shunt impedance of MA cores. By applying a magnetic field during the annealing process of the cores, the impedance will be twice larger compared to ordinary MA cores.

### 3. UPGRADE SCENARIO OF MR

金属磁性体空洞の登場によりRCSの加速システムに必要な長さを減らし、加速器サイズを小型化することができたように、新しい高特性の金属磁性体コアはJ-PARC加速器の性能を更に向上させることにつながる。表1はMRのアップグレード案[10, 11]に基づ

き、より高い加速電圧を利用して繰り返しをあげることによるビーム強度増強を示している。この案では1) 線形加速器のエネルギーを400MeVにする2) 取り出しキッカーの立ち上がり時間を速くする3) MR電磁石の立ち上げ、立ち下がり時間を速くする4) 加速空洞の電圧向上が含まれている。加速電圧として550kVに加え、この半分の電圧の2次高調波空洞が必要となる。加速システムを設置できるスペースはメンテナンスを考えると放射化の少ない場所でなければならない。このため使用可能な場所は限られており現在の直線部に9カ所に加えて、入射の直線部の上流を考えているが、アップグレードに必要なスペックを満足するためには加速空洞の高勾配化が必要となる。

### 4. RF SYSTEM

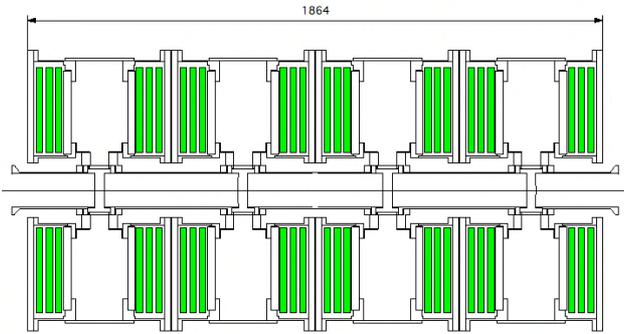
この優れた金属磁性体コアの開発を前提に、4ギャップの加速空洞の設計を行った(図3)。加速空洞全体の長さは現在のものにくらべ7cm長くなるが、現在のスペースにおさめることができる。コアの特性が向上するため、コアの厚さを現状の3.5cmから2cmに減らしたとしてもインピーダンスは今より14%増やすことができる。加速ギャップの数が増えるため、高周波増幅器からみた空洞のインピーダンスは14%減ることになる。また、ビームローディングの補正量はギャップの数が増える分増加するが陽極電源の余裕により吸収することができる。

Table 1: Upgrade scenario of MR

		Present	Upgrade
Energy	GeV	30	30
Linac Energy	MeV	181	400
Particles in bunch		2.5e13	4.1e13
Number of bunches		6	8
Kicker Rise time	$\mu$ s	~1.8	1
Total RF voltage	kV	160	550
Number of cavities (1 <sup>st</sup> )		4	8
Number of cavities (2 <sup>nd</sup> )		0	4
Voltage per cavity	kV	40	70
Cycle time	s	3.64	1.42
Acceleration time	s	1.9	0.63
Duty factor	%	56.9	56.3
Beam Power			4.88 倍

ギャップ電圧は現状の15kVから17.5kVに増加する。ギャップあたりの電力損失は68.5kWであり、長時間(1000H)試験[6, 9]の際の損失と同程度である。コア

内部での電力密度は40%増加するが、コアの厚さが減るためコア内部の温度上昇は変らない。この空洞が目標としている加速勾配を図1に示した。



4-Gap 70-kV Cavity

Fig. 3. RF cavity for upgrade.

単純な考え方として、現状の加速空洞のコアのみを改良されたものに置き換えることも考えられる。ただしこの場合、加速勾配を増やすとギャップ電圧が高くなり現在の陽極電源や共振周波数調整用の真空コンデンサなどの置き換えが必要となる。

## 5. CORE FOR RCS

RCSはMRとは違った形でこのコアの改良の恩恵を受けることになる。RCSの場合、MRと異なり加速周期の繰り返しをあげることは容易ではない。しかし、RCSのRFシステムは1MWのビーム加速(8x10<sup>13</sup> ppp)の為に最適化されているため、それ以上のバンチあたりのビーム強度をあげるためには陽極電源の容量が不足する。コアの改良により空洞のインピーダンスをあげることで、空洞での電力損失が減るため、その分をビーム加速にまわすことが可能となる。

RCSのビームはMLF実験施設で中性子とミュオンのユーザーへと供給されている。ミュオンを使った実験ではビームの強度だけでなく、より短いビームパルスが求められている。短バンチの形成にはより高い電圧を用いてバンチを圧縮する方法とバンチ回転による方法が考えられるが、どちらの場合も現状より高い電圧を用いることが効果的である。例えばRCSで取り出し時のRF電圧を300kVに維持した場合シミュレーション計算ではバンチ幅は90ns程度となる[15]。RCSに12台の改良したコアを用いた加速空洞を設置し、加速後半で840kVに電圧をあげることでよりバンチ幅は約50ns程度まで短縮できる。

## 6. FUTURE PLAN

磁場中の熱処理をより薄い金属磁性体リボンを使ったコアに適用することに特性が向上することは小型コアでは確認されており、次のステップとしてこの技術を大型コアに応用することが必要である。幸いKEKには大型のスペクトロメータに用いた電磁

石があり、この開口部(1.0 m X 1.4 m X 0.4 m)に熱処理用のオーブンを設置することにより、高い特性を持った大型コアの製造が可能である。将来の1MWを超えるJ-PARC加速器の性能向上にむけ、より高性能な加速システムに必要なコアの開発を進めることが求められている。

## 7. 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。また、ミュオンユーザーのための短バンチ形成などにも応用することができる。

## 参考文献

- [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] F. Tamura et al., "Beam Acceleration with Full-digital LLRF Control System in the J-PARC RCS" Proc. of EPAC08, p364.
- [4] M. Yamamoto et al., "Acceleration Voltage Pattern for J-PARC RCS", Proc. of EPAC08, p379.
- [5] C. Ohmori et al., "High Field Gradient Cavity loaded with MA for Synchrotrons", Proc. of PAC99, p413.
- [6] M. Yamamoto et al., "High Power Test of MA Cavity for J-PARC RCS", Proc. of PAC07, p1532.
- [7] A. Schnase et al., "MA Cavities for J-PARC with Controlled Q-value by External Inductor", Proc. of PAC07, p2131.
- [8] M. Yoshii et al., "New Cutting Scheme of Magnetic Alloy Cores for J-PARC Synchrotrons", Proc. of EPAC06, p1313.
- [9] M. Yoshii et al., "Present Status of J-PARC Ring RF Ring RF Systems", Proc. of PAC07, p1511.
- [10] Y. Yamazaki et al., JHF Accelerator Advisory Committee, 1998.
- [11] M. Tomizawa et al., "J-PARC Ring as a Neutrino Factory Proton Driver", The 2nd International Scoping Study Meeting of Neutrino Factory and Super-beam Facility
- [12] C. Fougeron et al., "Towards the Construction of an Ultra Short Cavity for Heavy Ions Synchrotron", Proc. of EPAC'90, p961.
- [13] R. Stassen et al., "The HESR RF-System and Tests in COSY", Proc. of EPAC08, p361.
- [14] R. Garoby et al., "The LEIR RF System", Proc. of PAC07, p1619.
- [15] M. Yamamoto et al., "LONGITUDINAL BEAM DYNAMICS ON 3 GEV PS IN JAERI-KEK JOINT PROJECT", EPAC02, p1073.