

## DEVELOPMENT OF RF CAVITY FOR FFAG ACCELERATOR AT KYUSHU UNIVERSITY

Hidehiko Arima<sup>A)</sup>, Hiroaki Ishikawa<sup>A)</sup>, Tomoki Suetake<sup>A)</sup>,  
Norio Daijo<sup>A)</sup>, Shunsuke Mochizuki<sup>A)</sup>, Takashi Matsunaga<sup>A)</sup>, Nobuo Ikeda<sup>A)</sup>,  
Akira Takagi<sup>B)</sup>, Hisayoshi Nakayama<sup>B)</sup>, Sadayoshi Fukumoto<sup>B)</sup>, Yoshitaka Kimura<sup>B)</sup>, Yoshiharu Mori<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Department of Applied Quantum Physics and Nuclear Engineering, Kyushu University  
744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka, 810-0395

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>C)</sup> Research Reactor Institute, Kyoto University

2-1010 Asashiro-nishi, Kumatori, Osaka, 590-0494

### Abstract

A new type of RF cavity with a high-efficiency cooling system has been developed for the 150 MeV FFAG (Fixed Field Alternating Gradient) accelerator in order to achieve the rapid cycling acceleration. The power test of the cavity was successfully demonstrated. The gap voltage has been measured to be more than 4 kV, which is enough to achieve the operation of 100 Hz with the two cavities. The one-dimensional longitudinal beam simulation was carried out taking into account the performance of the present cavity. 82% of the injected beam has been found to be survived at extraction energy.

## 九州大学 FFAG 加速器の高周波加速空洞の開発

### 1. はじめに

九州大学では、伊都キャンパスの移転を機に加速器・ビーム応用科学センターを新設し、本センターを拠点として、医療、核物理等、様々な分野のビーム応用研究を推進することを計画している。現在、センターの主加速器として、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で開発された固定磁場強集束 (Fixed Field Alternating Gradient, FFAG) 加速器<sup>[1]</sup>を本センターへ移設し、整備を行っている。

本センターのFFAG 加速器は、陽子を150 MeVまで加速する性能を有することから、150 MeV FFAG 加速器と呼ばれており、2006年に、KEKにおいて、取り出しエネルギー100 MeV、繰り返し100 Hz を達成した<sup>[2]</sup>。150 MeV FFAG 加速器の設計パラメータと概略図をそれぞれ表1、図1に示す。

FFAG 加速器は固定磁場であるため、加速ギャップ電圧を大きくすれば繰り返しを速くすることができ、大電流のビーム生成が可能である。FFAG 加速器で高繰り返しを実現するためには、高周波加速空洞に高い加速電場勾配が要求され、そのため高周波加速空洞で消費される電力は大きい。FFAG 加速器を安定に運転するには、加速空洞において、消費電力を抑え、かつ発生する熱を効率よく除去することが重要である。そこで高効率な冷却システムを有した高周波加速空洞を KEK と共同で開発した<sup>[3][4][5]</sup>。

表1: 150 MeV FFAG 加速器の設計パラメータ

|                |  |
|----------------|--|
| エネルギー          | 10 ~ 125 MeV (proton)                  |
| 電磁石            | Triplet radial (DFD)                   |
| セル数            | 12                                     |
| 平均半径           | 4.47 ~ 5.20 m                          |
| ベータトロン<br>チューン | 水平方向: 3.69 ~ 3.80<br>垂直方向: 1.14 ~ 1.30 |
| 最大磁場           | F磁極: 1.63 T/D磁極: 0.78 T                |
| 周回周波数          | 1.5 ~ 4.2 MHz                          |
| 繰り返し           | 100 Hz/2 cavities                      |
| ビーム電流          | 1.5 nA (In the first stage)            |

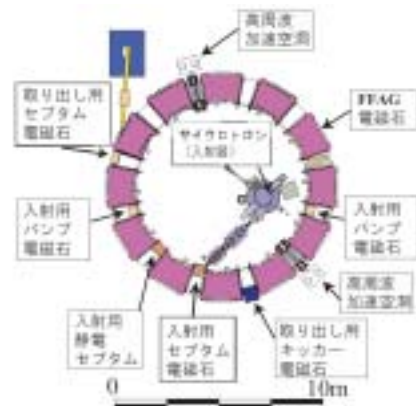


図1: 150 MeV FFAG 加速器の概略図

<sup>1</sup> E-mail: takase@nucl.kyushu-u.ac.jp

## 2. 高周波加速空洞の開発

150 MeV FFAG 加速器の高周波加速空洞に要求される性能として以下が挙げられる。まず、150 MeV FFAG 加速器では、短い加速器直線部で高い加速ギャップ電圧を発生させるため、24 kV/m 以上の高い電場勾配が必要である。また、約1 m の半径方向の軌道の変化に対応した口径を確保しなければならない。さらに、FFAG 加速器における高繰り返しを実現するためには、周波数変調を速く行う必要があるが、従来用いられてきたバイアス電流による周波数変調の速度には上限があるため、周波数同調が必要ない広帯域 (1.5 MHz ~ 4.2 MHz) なインピーダンスを持った加速空洞が必要である。

以上の条件を全て満たすものとして、高周波加速空洞のコアには磁性体合金 (Magnetic Alloy = MA)<sup>[6]</sup> コアを用いた。MA コアは、高インピーダンスを有することから、加速空洞に入力される電力に対して加速ギャップ電圧を大きくできる。またQ値が小さく、広帯域のインピーダンスを持つ。これにより、加速に伴う共振周波数の操作が必要なくなる。さらにMAコアはテープ状の磁性体を巻いて製作するため、比較的自由的な形状をとれる。

図2、図3に新たに開発したコアと高周波加速空洞の構造を各々示す。

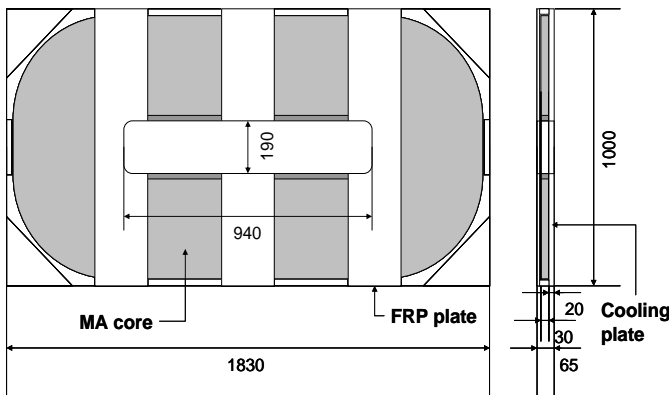


図2：FFAG 加速器用MA コア

MAコアはFRP板によってアルミ製の冷却板に取り付けられており、空洞は2枚のMAコアによって構成されている。コアの冷却には片面間接冷却法を用いている。冷却板とコアの間には厚さ1 mm の熱伝導シートを挟むことでコアと金属板間の接触面積を確保し、電氣的に絶縁している。冷却板は図4に示すように内部の約75%が冷却水の流路になっており、冷却性能の向上が図られている。冷却板の温度が一定に保たれていると仮定して熱伝導方程式による計算を行った結果、この冷却システムにより運転時のコアの最大表面温度は52 °C になった。したがって、加速空洞の安定運転は可能と考えられる。

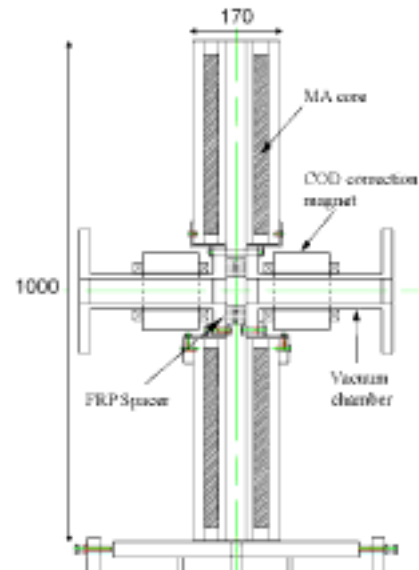


図3：高周波加速空洞の断面図

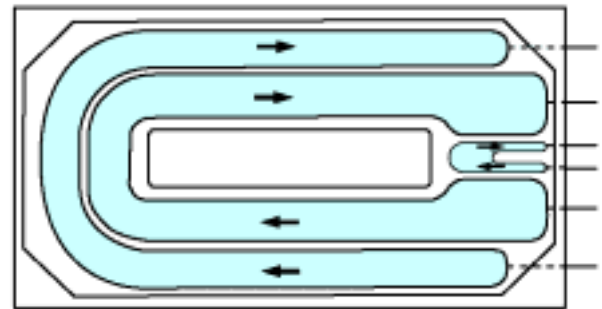


図4：MAコアの冷却板

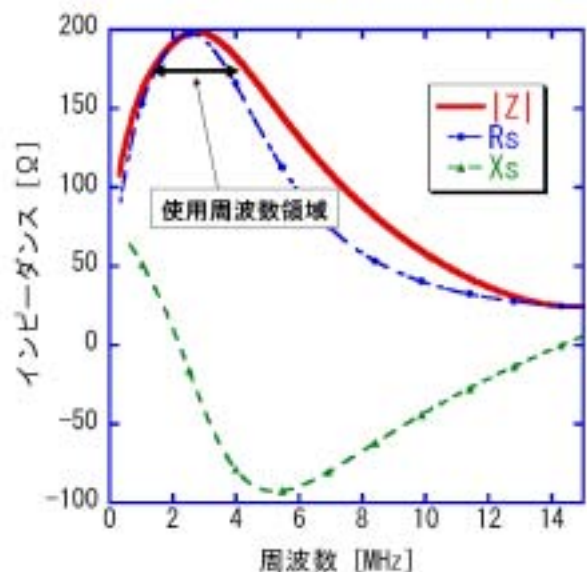


図5：高周波加速空洞のインピーダンス測定結果

製作した高周波加速空洞のインピーダンスをネットワークアナライザを用いて測定した。その測定結果を図5に示す。この結果、高周波加速空洞のインピーダンスの共振周波数は2.7 MHz、最大インピーダンスは200、Q値は0.43であった。これは、150 MeV FFAG 加速器の加速空洞としての要求性能を満たす値である。

次に、開発した高周波加速空洞が高繰り返し性のビーム加速に要求される性能を満たしているかを確認するため、KEKにおいて電力投入試験を行い、加速ギャップに発生する電圧を測定した。その結果、測定された加速ギャップ電圧は、繰り返し100 Hzに必要な4 kV 以上であることが確認された。

### 3. ビーム加速シミュレーション

150 MeV FFAG 加速器は入射器にサイクロトロンを使用しているため、入射ビームは位相方向に広く分布している。このようなビームを効率良く加速するためには、入射ビームを断熱捕獲する方法が有効と考えられる。しかし、速い繰り返し加速というFFAG 加速器の特徴を活かすためには、入射ビームの断熱捕獲に十分な時間をかけることができない。そこで、1次元の縦方向のビーム加速シミュレーションを行い、150 MeV FFAG 加速器において断熱捕獲の有効性を調べた。

本シミュレーションでは、入射ビームは加速電圧の位相- $\pi$ に相当する時間幅を持つと仮定した。また、入射ビーム量に対する取り出しビーム量の割合を加速効率と定義し、ビームの入射から取り出しまでの加速効率を計算した。この時、繰り返し100 Hz 運転に対応するため入射から取り出しまでの時間は10 msec、加速ギャップ電圧のピーク値を8 kV (4 kV/cavity  $\times$  2)、取り出しエネルギーを125 MeV、ビームを加速する際の同期位相30 $^\circ$ とした。

まず、断熱捕獲をせずに、入射時から加速を行う場合のシミュレーションを行った。その結果、125 MeV までの加速時間は9.35 msec、加速効率は52%となった。このことから、断熱捕獲に充てることのできる時間は、10 msec から加速時間9.35 msec を引いた残りの時間0.65 msec と決定された。入射ビームを断熱捕獲して再シミュレーションを行った結果、加速効率は87%まで上がった(図6)。断熱捕獲を行った時間は、ビームのシンクロトロン周期の約1.3倍程度であり、断熱捕獲を行う時間としては十分ではないが、150 MeV FFAG 加速器においても断熱捕獲は加速効率の上昇に非常に有効であると考えられる。

### 4. まとめ

FFAG 加速器を安定に運転するために、高インピーダンスで、高効率な冷却機能を有した高周波加速空洞を新たに開発した。パワー試験の結果、繰り返し100 Hz 運転を行うために必要な加速ギャップ電圧を得ることができた。さらに、その結果を基にした加速シミュレーションを行うことで、150 MeV FFAG 加速器における断熱捕獲の有効性が示された。

今後は、実際に高周波加速空洞をFFAG 加速器に組み、性能試験を行っていく予定である。

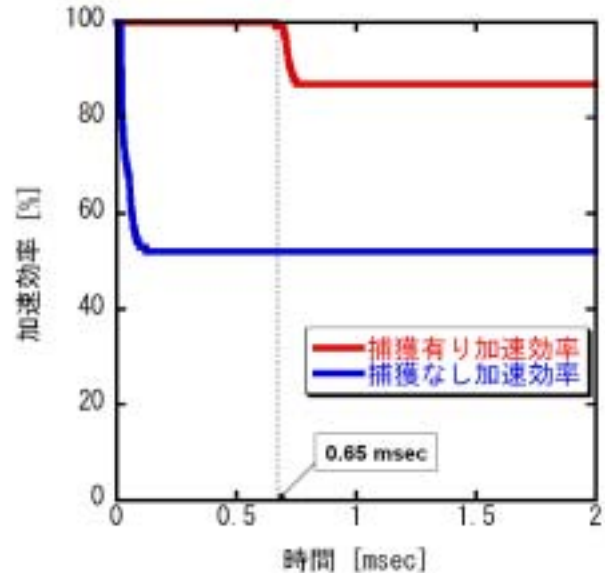


図6：断熱捕獲の有無による加速効率の比較

### 参考文献

- [1] K. R. Symon, et al., "Fixed-Field Alternating-Gradient Particle Accelerators", Physical Review, Vol.103, No.6, 1837, (1956)
- [2] M. Aiba, et al., "Beam extraction of 150 MeV FFAG", Proceedings of EPAC 06
- [3] Y. Yonemura, et al., "Development of RF acceleration system for 150 MeV FFAG accelerator", NIM, A 576, 294-300, (2007)
- [4] A. Takagi, et al., "Radio frequency acceleration system for 150 MeV FFAG", Proceedings of PAC 03
- [5] Y. Yonemura, et al., "Status of Center for Accelerator and Beam Applied Science of Kyushu University", Proceedings of EPAC 08
- [6] Y. Mori, et al., "A new type of rf cavity for high intensity proton synchrotron using high permeability magnetic alloy", Proceedings of EPAC 98