

## RF Development for PRISM-FFAG

Y. Kuriyama<sup>1,A)</sup>, M. Aoki<sup>A)</sup>, Y. Arimoto<sup>A)</sup>, Y. Kuno<sup>A)</sup>, A. Sato<sup>A)</sup>, M. Yoshida<sup>A)</sup>, C. Ohmori<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>Graduate School of Science, Osaka University, 1-1 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043, JAPAN

<sup>B)</sup>High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, JAPAN

### Abstract

PRISM is a project to produce a high quality, high purity and high intensity muon beam by the phase rotation technique in FFAG synchrotron using ultra-high field gradient RF systems. To achieve ultra-high field gradient, we construct a test RF system and we have done several tests with the system. And a research for the phase rotation with simulation is also being advanced and a construction of the FFAG ring has been started.

## PRISM-FFAGのためのRF開発

### 1. はじめに

我々は、PRISMプロジェクト<sup>[1]</sup>において、大強度、高輝度、高純度のミュオンビーム源の開発を目標としている。従来のミュオンビームの3、4桁以上の強度である毎秒 $10^{12}$ 個のミュオンを生成することを目指しており、さらに、FFAGリング内での位相空間回転技術を用いて、運動量の広がりを±2%以下に抑えることを目標としている。純度については、ミュオンはパイオンから生成することを考えているのだが、含まれるパイオンの数を $10^{-18}$ 個以下とすることを目標としている。図1にPRISMプロジェクトの概略図を示す。

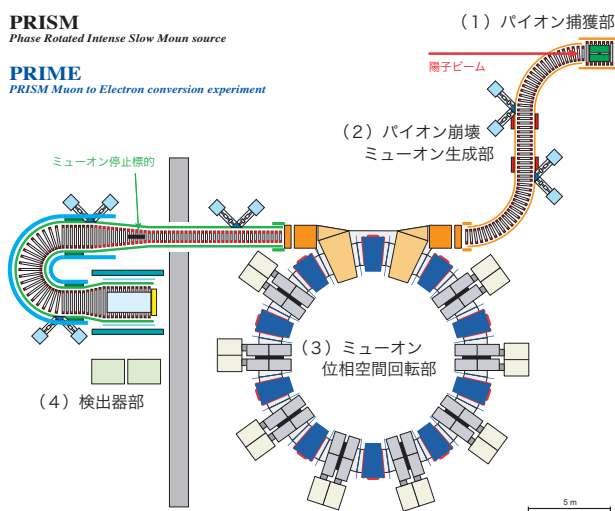


図1 PRISM概略図

PRISMは大きく分けて、4つのセクションから構成されており、ターゲットに陽子ビームを入射し、パイオンを生成する、(1)パイオン生成捕獲部、

そして、パイオンの崩壊からできるミュオンを輸送する、(2)パイオン崩壊ミュオン生成部、生成されたミュオンを入射し、エネルギーを揃えるためのFFAGリングである、(3)位相空間回転部、ミュオンビームを利用した実験を行うための(4)検出器部からなる。

現在、(3)の位相空間回転部の建設が始まっており、FFAGリングを構成する、電磁石、加速空洞などの製造と研究が行われている。

### 2. 位相空間回転とRF設計

PRISMでは、FFAGリング内において、位相空間回転を行うことで、ミュオンのエネルギーを揃えるが、位相空間回転は、エネルギーの高い粒子については、減速電場を感じるように、エネルギーの高い粒子については、加速電場を感じるように加速空洞でRF波形を調整することで実現される。

Power tube	D.C 33-37kV, 1.5kV (peak for 10 μs)
Field Gradient	200 kV/m
Gaps/Cavity	6 gaps/cavity
# of tube	2 tubes/gap
Length	33 cm/gap
# of cores	6 cores/gap
Impedance	1 kΩ/gap
Size of cores	1.7m x 1.0m (inner 1.0m x 0.30m)

表1 加速空洞パラメーター

<sup>1</sup> E-mail [kuriyama@kuno-g.phys.sci.osaka-u.ac.jp](mailto:kuriyama@kuno-g.phys.sci.osaka-u.ac.jp)

PRISMで使用するFFAGリングには、静止寿命  $2.2 \mu s$  であるミューオンを入射する。そのため、位相空間回転は可能な限り短時間で終了することが求められる。現在の設計では、 $200 \text{ kV/m}$  程度という非常に高い加速勾配が空洞に要求されている。そのため、加速空洞の設計について表 1 にまとめた。

### 3. PRISM加速空洞

昨年度にPRISM用に加速空洞を設計し、その製作を行った。この空洞の写真を図 2 に載せる。この空洞は、1gap分の空洞となっており、6枚のMA (magnetic alloy) コアを組み込む設計となっている。この空洞を構築したRF試験システムに組み込み、RFシステム全体での試験が予定されている。

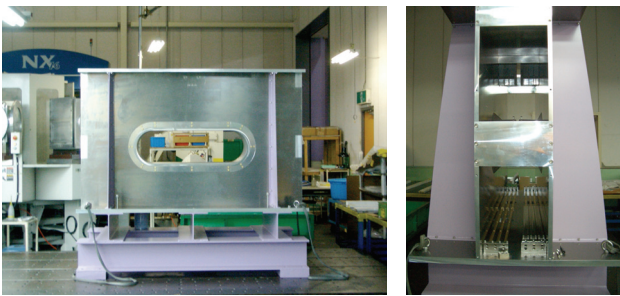


図 2 PRISM加速空洞

### 3. 位相空間回転シミュレーション

#### 3.1 背景

インピーダンスが  $714 \Omega$  であるテスト用空洞とPRISM用アンプを組み合わせた試験を通して、 $43 \text{ kV/gap}$  の加速電圧を得ることに成功している[2]。この試験結果から、PRISM用空洞 (インピーダンス:  $0.9 \text{ k}\Omega$ ) と組み合わせた場合には、 $55 \text{ kV/gap}$  の加速電圧を得られることが予想される。この結果は、加速勾配としては  $165 \text{ kV/m}$  に相当する。

この結果をもとに加速電圧を決定し、位相空間回転シミュレーションを行い、RF波形の最適化を行った。

#### 3.2 シミュレーション条件

FFAGリング入射までに、 $10 \text{ m}$  のラインを仮定している。そのため、入射する粒子には、初期状態として、エネルギーごとにTOFに応じた時間的な広がりを持つことになる。

また、評価には位相空間回転後のそれぞれの入射粒子の運動量  $P_i$  と設定したターゲット運動量  $P$  との差の2乗を足し合わせたものである  $\sum (P - P_i)^2$  の値を使用した。この値が小さいほど、運動量の広がりを抑えることに成功していると言える。

入力RF波形は、 $h=1, 2, 3$  の正弦波を重ね合わせて実現されるノコギリ形状波となっている。これまでの研究で、 $h=1$  の正弦波のみを使用した場合と比較して、のこぎり形状波が位相空間回転に適しているという研究結果が得られている。

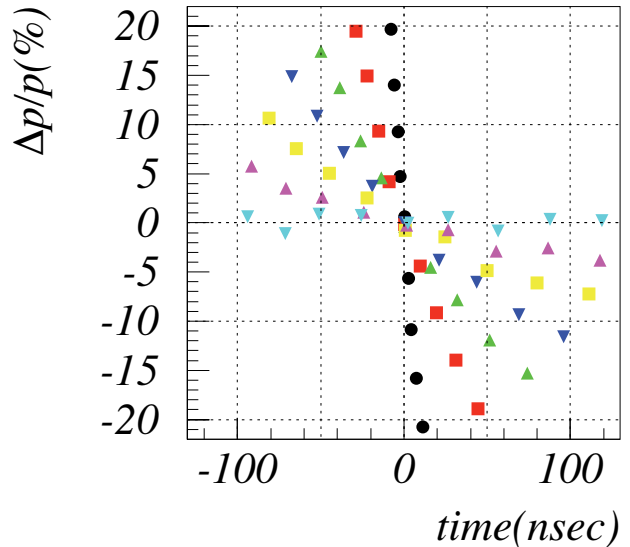
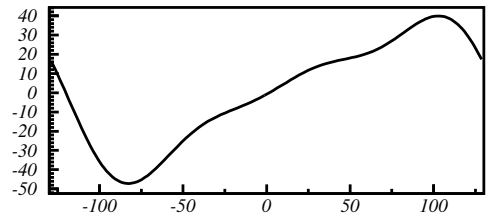


図 3  $h=1, 2, 3$  の 3 つの周波数成分の合成である入力 RF 波形と位相空間回転シミュレーション結果

#### 3.3 結果 1

図 3 に 1gap に相当する RF 波形とシミュレーションの結果を示す。

図 3 下のプロットは、シミュレーション結果を示している。中心運動量が  $68 \text{ MeV/c}$  で、 $\pm 20\%$  の運動量の範囲内で 9 つの粒子を入射し、シミュレーションを行った。黒色の点は、初期状態の粒子の位相空間上での場所を示している。各色は FFAG リング内でのターン数を表しており、赤色は、1 ターン後の状態、緑色は、2 ターン後の状態を示している。

この結果からは、6 ターン後に  $\pm 2\%$  以下に各粒子の運動量の広がりが抑えられており、位相空間回転が終了していることがわかる。このときの  $\sum (P - P_i)^2$  値は、 $1.67$  となっている。この結果から現在進めている RF の設計で PRISM の要求を満たすことが可能であることが確かめられた。

#### 3.3 結果 2

また、1 ターン目から粒子が最大電圧を感じるように、電圧の立ち上がりが変動していくノコギリ形状波を、整数倍でないハーモニクスである、 $h=1, 1.9, 2.1$  の 3 つの周波数成分から合成した。この RF 波形によるシミュレーション結果を図 4 に示す。

図 3 での結果と比較すると、図 3 では、位相空間回転の終了までに 6 ターンかかっていたところが、5 ターンで終了しており、また、位相空間回転後の粒子の時間的な広がりが、図 3 の結果では、 $200 \text{ ns}$  以上であるのに対して、 $150 \text{ ns}$  程度である。

位相空間回転に必要なターン数の減少は、約10%程度のミュオンの個数の増加につながり、また、時間的広がり減少は、キッカーマグネットへの要求性能を下げることに繋がるため、非常に重要である。

## 参考文献

- [1] Y.Kuno et al., "Letter of Intent to the J-PARC 50GeV Proton Synchrotron Experiments (LoI-24,26)"
- [2] Y.Kuriyama et al., "Development of RF for PRISM-FFAG", Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, URL: <http://www.kasokuki.com/lam29/index.html>.

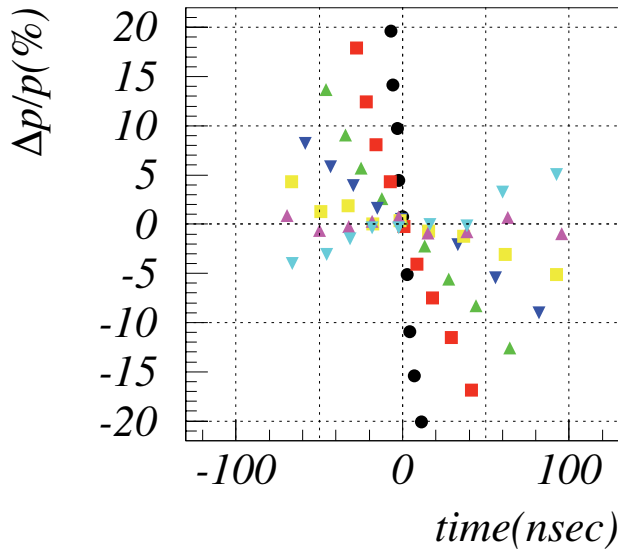
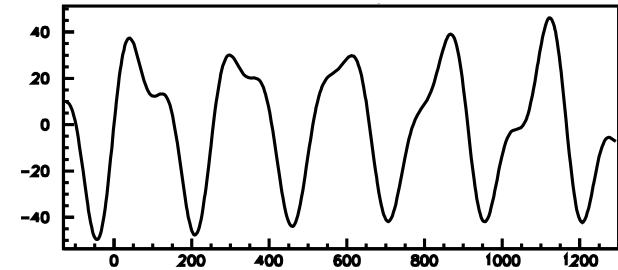


図4 h=1, 1.9, 2.1の正弦波の合成から得られるノコギリ形状波と位相空間回転シミュレーション結果

## 4. 今後の展望

今後のRF開発では、ハード面では、新しく製造したPRISM加速空洞をテストRFシステムに組み込み、性能試験を行うことが予定されている。位相空間回転シミュレーションを通して、RF波形の最適化を行ったが、その際に、h=3という高次成分を利用している。性能試験を通して、そのような高次成分を含むRF波形が実現可能であるかどうかの見極めをすすめることが必要となってくる。