

DEVELOPMENT OF PRISM-FFAG

Y.Arimoto^{*A)}, M.Aoki^{A)}, Y.Kuno^{A)}, Y.Kuriyama^{A)}, T.Matsushima^{A)}, K.Nakahara^{A)}, S.Nakaoka^{A)},
A.Sato^{A)}, M.Yoshida^{A)}, S.Ninomiya^{B)}, Y.Iwashita^{C)},

M.Aiba^{D)}, S.Machida^{D)}, Y.Mori^{D)}, C.Ohmori^{D)}, T.Yokoi^{D)}, M.Yoshimoto^{D)}, K.Yoshimura^{D)},

A) Graduate School of Science, Osaka University, 1-1 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 563-0043

B) Research Center for Nuclear Physics, Osaka University
1-10 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

C) Advanced Research Center for Beam Science, Institute for Chemical Research, Kyoto University,
Gokanoshō, Uji, Kyoto 611-011

D) High Energy Accelerator Research Organization, 1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

Abstract

PRISM (Phase Rotated Intense Slow Muon source) is a project to produce a pure and high brightness muon beam at low energy by using a phase rotation technique. An FFAG synchrotron is used as the phase rotator for PRISM. A program to construct the PRISM-FFAG ring has been started.

PRISM-FFAG の開発

1. はじめに

PRISM(Phase Rotated Intense Slow Muon beam)とは位相空間回転を利用してエネルギー幅の狭い大強度のミュオンビームをつくり出す計画のことである^[1]。PRISMでは荷電レプトン数非保存過程である、 μ -e変換過程の探索を行ない標準理論を越える新しい物理を開拓することを目的としている。我々は現在得られている値より4桁以上大きい、 10^{11} - 10^{12} μ /secのミュオン強度を目指している。

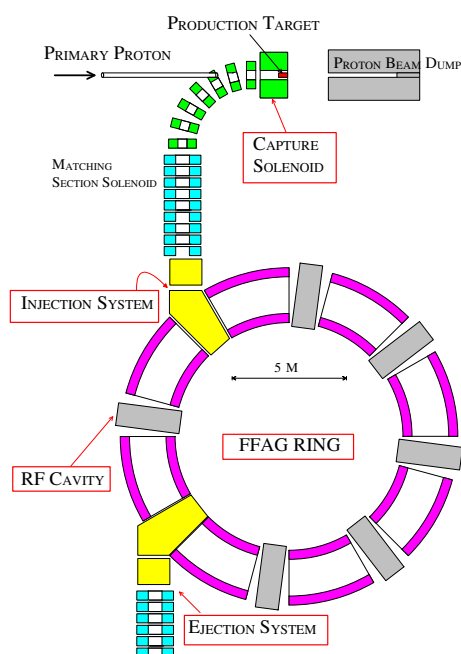


図 1: PRISM 全体図

Fig. 1にPRISMの全体図を示す。PRISMは主に1) 捕獲部：10 Tのソレノイド電磁石内にターゲット上で生成されたパイオンを捕獲する、2) 崩壊部：10 mの長さのある超電導ソレノイド電磁石内でパイオンをミュオンに崩壊させる、3) 位相空間回転部：位相空間回転によりミュオンビームのエネルギー幅を揃える、と言う3つの部分から構成されている。

我々は位相空間回転器としてFFAGシンクロトロンを採用した。それはFFAGは非常に大きなエネルギー範囲に対して軌道が存在し、しかも強集束の集束系を用いその横方向のアクセプタンスも非常に大きいという特徴を持っており、このことはエネルギー分布の大きな2次粒子であるミュオンビームの位相空間回転に必要であるためである。PRISM-FFAGでは、中心エネルギー20 MeVに対して運動量で $\pm 20\%$ の幅を持ったミュオンビームを位相空間回転によって $\pm 6\%$ 以下に狭めることを目指す。

昨年度からミュオンの位相空間回転の原理を検証するためのPRISM-FFAGの開発が始まった。現在、PRISM-FFAGに用いる高勾配RFシステム、大口径電磁石の設計、製作が行なわれている。ここではPRISM-FFAGの開発状況について述べる。

2. ラティス

PRISM-FFAGではストレートセクションを長くとるために電磁石 θ 方向の開き角がギャップ間隔に比べて小さくなっており、このためビームダイナミクスをスタディするためにはフリッジ磁場の影響を無視することが出来ない。フリッジ磁場は3次元磁場計算ソフトで計算出来るが1つの磁場マップを作成するのに時間がかかる。このため、我々は2次元磁場計算ソフト、POISSONを用いて r の異なる複数の z - θ 平面の磁場を計算し、それらを r 方向について補間することで近似的な3次元磁場マップを作成した^[2]。この磁場マップを使ってビームトラッキングを行な

* E-mail: arimoto@kuno-g.phys.sci.osaka-u.ac.jp

い最適なラティスを求めた。

この方法によって決定された PRISM-FFAG のパラメーター及び PRIS-FFAG リングの平面図をそれぞれ表 1、図 2 に示す。セル数は 10 cell であり、10 のストレートセクションのうち 2 つのストレートセクションはビームの入射・取り出しに用いる。残りの 8 つのストレートセクションには RF 空洞が設置される。

表 1: PRISM-FFAG のパラメーター

No. of sectors	10
Magnet type	Radial sector DFD triplet C-shaped
Field index (k -value)	4.6
F/D ratio	8.0
Opening angle	F/2 : 2.2deg. D : 2.2deg.
Half gap	17cm
Maximum field	Focus. : 0.24 Tesla Defocus. : 0.026 Tesla
Average radius	6.5m for 68MeV/c
Tune	horizontal : 2.69 vertical : 1.30

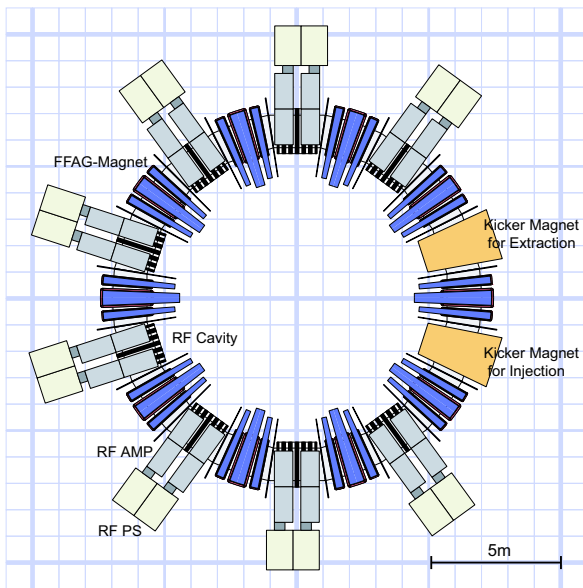


図 2: PRISM-FFAG リング平面図

3. 電磁石

図 3 に電磁石の外観図を示す。電磁石は DFD Radial Sector 型のトリプレット型である。また入射・取り出し時のビーム経路を確保するために電磁石のヨーク形状はリング外側に開いた C 型になっている。PRISM-FFAG に必要な磁場勾配を生成するために、ポールギャップ間隔はリング中心からの半径 r が大きくなる

につれてギャップ間隔が狭くなるような形状となっている。 θ 方向のフリンジ磁場分布を一樣にするために中間磁極 (右図 Inter-pole) と呼ばれる異方性の平板をメインポールとの間に挿入し、ギャップ間隔が r に依らず一定となるようにした^[3]。この中間磁極は θ 方向と z 方向の透磁率は鉄と同じであるが、メインのポールで生成した r 方向に対する磁場勾配が崩れないように r 方向の透磁率は空気の透磁率の約 2 倍と他の方向に比べて非常に小さくなっている。この中間磁極を挿入することによりフリンジ磁場が一樣になることが期待される。電磁石の有効開口は水平方向で ± 50 cm, 鉛直方向で ± 15 cm とした。また、据え付け誤差等から生じる COD を補正するために中間磁極の上にはトリムコイルを設置する。

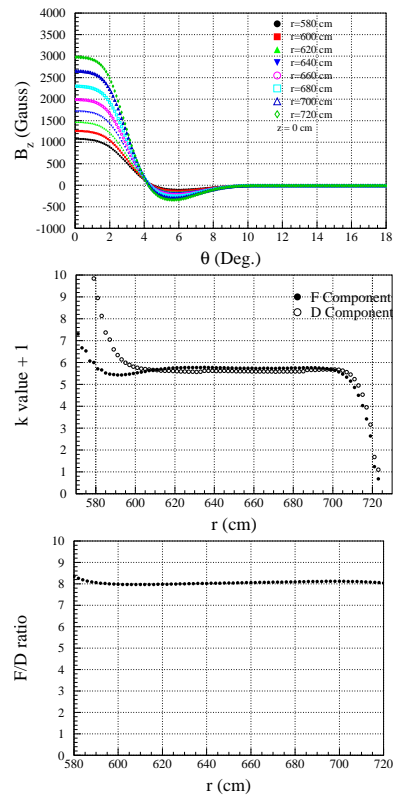


図 4: 磁場分布の計算値; 上段: θ を関数として鉛直方向の磁束密度、 B_z をプロットしたもの。それぞれのマークは r が異なっている (図中凡例参照)。中段: r を関数として $B_z L$ 積の k 値をプロットしたもの。は磁場の値が正の部分だけ積分したもの、は負の成分だけを積分したもの。下段: r を関数として $B_z L$ 積の F/D 比をプロットしたもの。

電磁石の設計は 3 次元磁場解析コード、TOSCA (Vector Field 社) を用いて行なった。メディアン平面上で $B_z L$ 積の k 値と F/D 比が $600 < r < 700$ の範囲で一定となる磁場分布が得られるようにポール形状を調整した。磁場分布の計算結果を図 4 に示す。この磁場分布を用いたトラッキングシュミレーションにより、水平方向のアクセプタンスとして約 $30,000 \pi$ mm mrad, 鉛直方向のアクセプタンスとして約 2,000

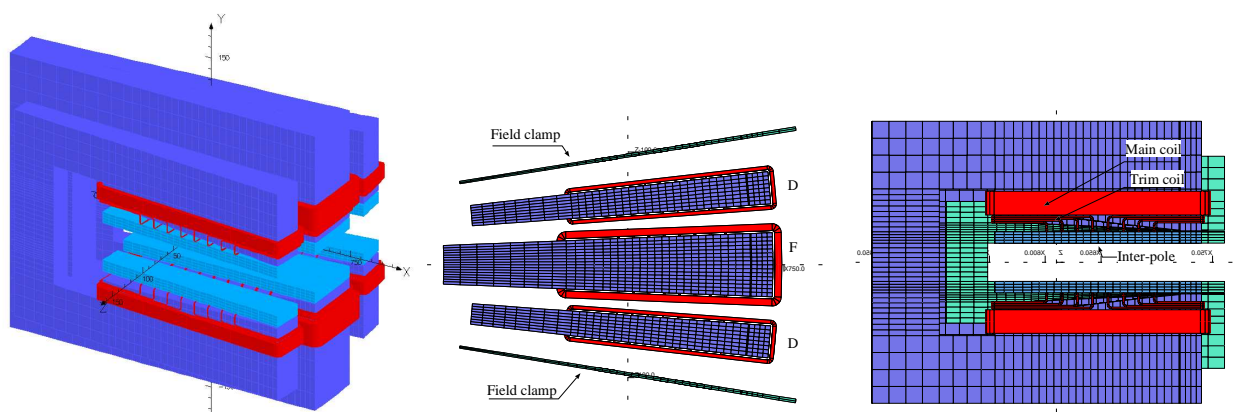


図 3: PRISM-FFAG 電磁石外観図; 左: 立体図、中央: 平面図、右: 側面図

π mm mrad が得られた。図 5 にトラッキングによって得られたミュオンの位相空間分布を示す。

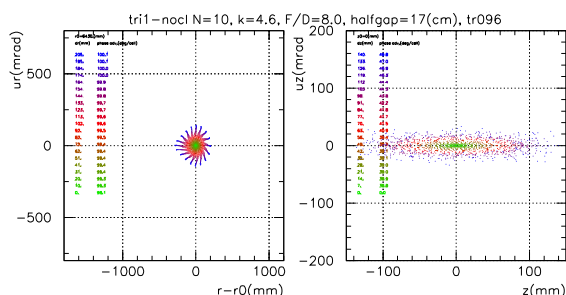


図 5: TOSCA による 3次元磁場マップを用いたトラッキングによって得られたミュオンビームの位相空間分布。左図: 水平方向の位相空間分布、右図: 鉛直方向の位相空間分布

4. RF システム

位相空間回転はミュオンが $2.2 \mu\text{sec}$ で崩壊するまでに終わらなければならない。そのためには共振周波数、5 MHz の帯域において 200 kV/m の RF 電場勾配が必要となる。これを実現するために高い RF 磁場領域での磁気特性の優れた Magnetic Alloy (MA) コアを導入した^[4]。PRISM で使用する MA コアサイズは幅 1.4 m 高さ 1.0 m 厚さ 3.5 cm のレーストラック型となっており、カットコアの形状となっている。1 ギャップは 6 枚の MA コアで構成されており、PRISM-FFAG の 1 ストレートセクションに 5 ギャップ挿入する。5 ギャップ分の RF 空洞の長さは 1.75 m であり電場勾配は最大で 200 kV/m である。ギャップ電圧は 4 極真空管を用いた RF アンプシステムにより生成される。このアンプシステムはプレート電圧として 30-40 kV (最大 RF 電流 60 A) を発生することが出来る。

昨年度に 2 ギャップ分の RF アンプシステムが完成し、大阪大学核物理研究センターにおいて、テスト用の MA 空洞を用いたアンプのテストを行なってい

る。共振周波数 5 MHz でのインピーダンスが 730Ω の RF 空洞に対し peak to peak で 86 kV のギャップ間電圧が得られている。

MA コアは既に 4 枚が納品されており、今年度中にさらに 2 枚製作し、1 ギャップ分の空洞を製作する予定である。(詳しくは参考文献^[5]を参照)

5. まとめ

PRISM-FFAG のラティス設計、電磁石設計はほぼ終わっており、今年度中に 1 セル分の電磁石を製作する。現在、テスト用の RF 空洞を用いて RF アンプの試験を行なっている。今年度中に、PRISM-FFAG 用の RF 空洞を製作し、性能試験を行なう予定である。RF システムの開発、電磁石の製作、磁場測定は 2004 年度から 2005 年度にかけて行ない、FFAG リングの建設を 2005 年度末に完了させる。2006 年度からコミショニングを行ない、位相空間回転、ミュオン加速、ミュオンイオン化冷却を行なう予定となっている。

参考文献

- [1] "The PRISM Project - A Muon Source of the World-Highest Brightness by Phase Rotation-", LOI for Nuclear and Particle Physics Experiments at the J-PARC (2003)
- [2] A.Sato et al. "FFAG as Phase Rotator for the PRISM Project", Proceedings of the European Accelerator Conference (2004)
- [3] Y.Iwashita et al. "Magnetic Field Distribution Controlled by Anisotropic Inter-Pole and Reduction of Fringing Field", Proceedings of the 1st Accelerator Meeting in Japan (2004)
- [4] C.Ohmori et al., "Ultra-High Field Gradient RF System for PRISM-Muon Bunch Rotation", Proceedings of Symposium on the 14th Accelerator Science and Technology, Japan (2003)
- [5] Y.Kuriyama et al., "Development of RF for PRISM-FFAG", Proceedings of the 1st Accelerator Meeting in Japan (2004)