

# 京都大学 150MeV FFAG 加速器主リングを改造した パイオン生成リングの設計

## REMODELING OF 150 MeV FFAG MAIN RING AT KURNS TO PION PRODUCTION RING

菅啓大<sup>#,A)</sup>, 石禎浩<sup>A)</sup>, 上杉智教<sup>A)</sup>, 栗山靖敏<sup>A)</sup>, 森義治<sup>A)</sup>, 沖田英史<sup>A)</sup>, 不破康裕<sup>B)</sup>  
Keita Suga<sup>#,A)</sup>, Yoshihiro Ishi<sup>A)</sup>, Tomonori Uesugi<sup>A)</sup>, Yasutoshi Kuriyama<sup>A)</sup>,  
Yoshiharu Mori<sup>A)</sup>, Hidefumi Okita<sup>A)</sup>, Yasuhiro Fuwa<sup>B)</sup>  
<sup>A)</sup>Kyoto University

<sup>B)</sup> Accelerator Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

### Abstract

A possibility of remodeling main ring of 150 MeV FFAG accelerator at Kyoto University, Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science (KURNS) to Pion Production Ring (PPR) for muon transmutation study has been discussed. Design was made on the assumption that 400 MeV deuteron beams circulate and hit a target in the ring to generate pions. Optimizations of lattice parameters and 3D magnet modeling are reported.

### 1. はじめに

原子炉から生じる高レベル放射性廃棄物の低減化、再資源化を目的として、長寿命核分裂生成物を安定核、短寿命核に核変換する研究が行われている。その核変換の一つの方法として、負ミューオンによる核変換が検討され始めている。Figure 1 に示す京都大学複合原子力科学研究所(KURNS)の 150 MeV FFAG 加速器主リングは、加速器駆動未臨界システム(ADS)基礎実験の終了に伴い、負ミューオン核変換実験のためのパイオン生成リング(PPR)に改造することが議論されている[1]。

負ミューオン核変換実験には、大強度で高効率の負ミューオンビーム源が必要である。既存の負ミューオンビーム源としては、大阪大学核物理研究センター(RCNP)の MuSIC や、J-PARC センターの MUSE がある[2, 3]。これらの施設では、サイクロトロンまたはシンクロトロンで加速した陽子ビームを取り出し、リングの外に設置した標的に当てて負パイオンを生成し、負パイオンが飛行中に崩壊することで負ミューオンビームを生成している。一方、PPR では ERIT または MERIT 方式を使い、負ミューオンビームを生成する [4, 5]。この方式では、薄い標的をリング内部に設置し、周回する陽子ビームが標的を通過して一部が負パイオンを生成し、負パイオンを生成せずにエネルギーを失ったビームは RF 加速空洞で失った分のエネルギーを回復するという過程を繰り返す。この方式を使うことによって、大強度で高効率の負ミューオンビームの生成が期待される。PPR は、この新しい方式を使った負ミューオンビーム生成を目的とした原理実証機となる。

PPR の設計は、当初 400 MeV 重陽子ビームが周回し、内部標的に当たり負パイオンを生成するという仮定のもと進められたが、400 MeV 陽子ビームに変

更した。



Figure 1: Photograph of main ring of 150 MeV FFAG accelerator at KURNS.

### 2. パイオン生成リングの設計

#### 2.1 ビーム光学設計

光学設計によって PPR の基本設計パラメータを決定した。Table 1 に改造前と改造後の設計パラメータを示す[6]。まず、リング移送先のスペースの観点から、直径約 12 m のリングが直径 9 m 以内に収まるよう、電磁石を半径内側へ移動した。また、周回するビームのエネルギーを 150 MeV から 400 MeV にするため、最大磁場を上げ、ビームを正方向に曲げる収束(F)電磁石のみを使い、ビームを逆方向に曲げる発散(D)電磁石は撤去した。電磁石形状はヨークフリー型から C 型にした。水平方向の収束力は F 磁石によって、垂直方向の収束力はエッジフォーカスによって得ている[7]。磁場勾配の大きさを表す  $k$  値は、光学的安定条件を満たし、且つ蛇行加速の利用を考え、 $k = 1.0$  と決定した[8]。このとき、チューンは 2 次の共鳴線上にあるが、実際には端部の漏れ磁場でエッジフォーカスによる垂直チューンが変わること

<sup>#</sup> suga.keita.77x@st.kyoto-u.ac.jp

を考慮している。Figure 2 に電磁石の配置を、Figure 3 に 1 セル分の  $\beta$  関数と磁場を示す。

Table 1: Basic Design Parameters Before and After Remodeling

	150 MeV FFAG Main Ring	PPR
ビーム粒子	陽子	陽子
ビームエネルギー [MeV]	11 - 150	300 - 400
$k$ 値	7.8	1.0
軌道半径 [m]	4.41 - 5.40	3.80 - 4.13
最大磁場 [T]	1.6	1.78
水平チューン	3.85	1.43
垂直チューン	1.2	0.57
セル数	12	12
基本セル	DFD トリプレット F シングレット	

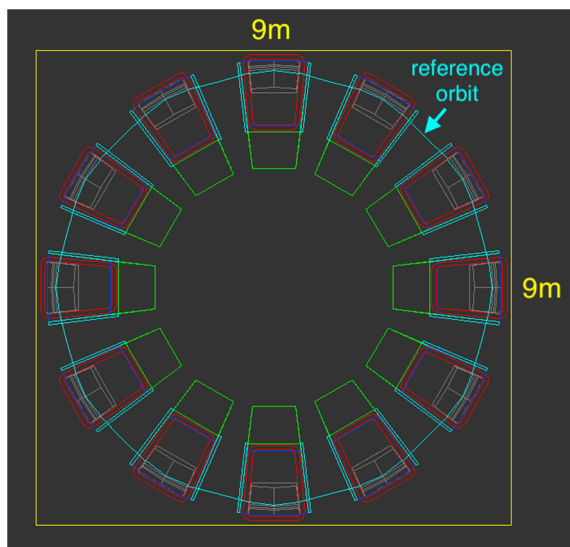


Figure 2: Arrangement of the electromagnets of PPR.

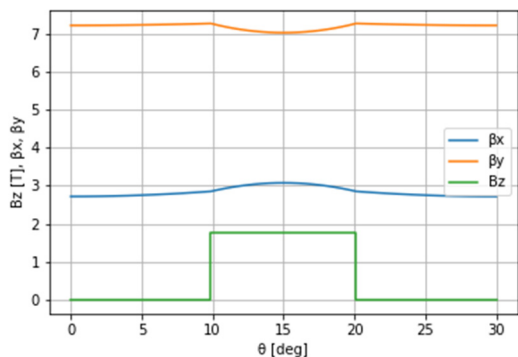


Figure 3: Beta functions and  $B_z$  of PPR.

## 2.2 リニアエッジ磁場による検討

Figure 4 に示すような、磁極端部の漏れ磁場をリニアに表現した磁場を作成し、3次元トラッキングを行うことで、チューンとダイナミックアパーチャーを計算した。

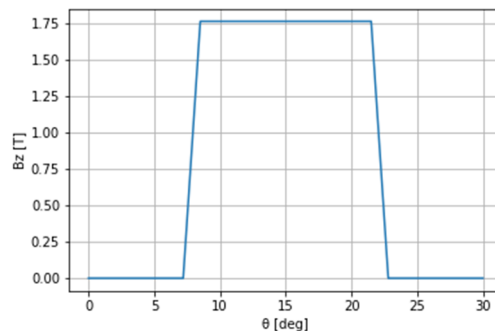


Figure 4:  $B_z$  of Liner edge magnetic field of PPR.

チューンは、光学設計では  $(\nu_x, \nu_y) = (1.43, 0.57)$  であったのに対し、リニアエッジ磁場では  $(\nu_x, \nu_y) = (1.43, 0.35)$  となった。また、漏れ磁場によって式(1)で表される BL 積が光学設計の場合よりも大きくなり、軌道半径は 300MeV で 3.63m、400MeV で 3.94m となった。400MeV でのダイナミックアパーチャーは、Figure 5, 6 のようになった。

$$B_l(r) = \int_{cell} B_z(r, \theta) r d\theta \quad (1)$$

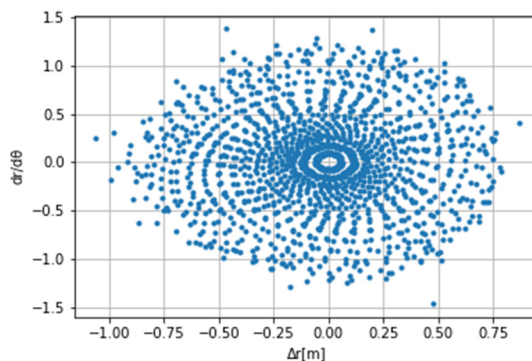


Figure 5: Horizontal dynamic aperture.

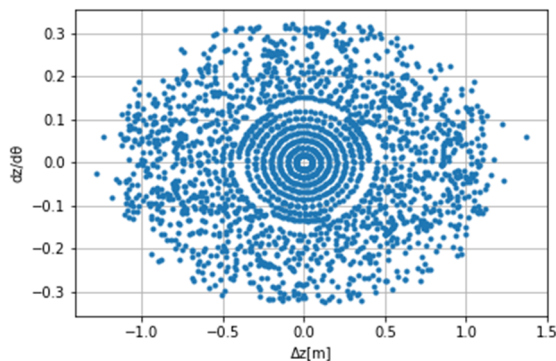


Figure 6: Vertical dynamic aperture.

### 2.3 2次元磁場設計

ビーム光学設計による計算から、基準半径 $r_0 = 4.13$  mで、基準磁場 $B_{z0} = 1.78$  Tの、式(2)で表される磁場が、半径 $3.80$  m  $\leq r \leq 4.15$  mの範囲で得られるように、2次元磁場計算ソフト POISSON を用いて2次元磁場設計を行った。F磁極幅は $3.70$  m  $\leq r \leq 4.30$  mとした。式(3)で表される2次元的な磁場勾配 $k_{local\_2D}$ が、半径 $3.80$  m  $\leq r \leq 4.15$  mの範囲で $k = 1.0$ 付近になるよう磁極形状の修正を繰り返した[9]。Figure 7に $k_{local\_2D}$ のグラフを示す。

$$B_z = B_{z0} \left( \frac{r}{r_0} \right)^k \quad (2)$$

$$k_{local\_2D}(r) = \frac{(B_z(r + dr) - B_z(r))}{dr} \frac{r}{B_z(r)} \quad (3)$$

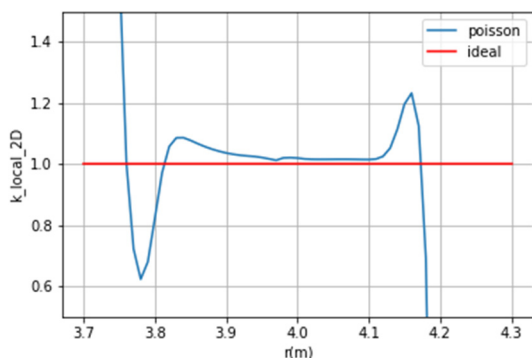


Figure 7:  $k_{local\_2D}$  as a function of radius.

### 2.4 3次元磁場設計

2次元磁場計算によって決定した磁極形状をもとに、Figure 8に示すように電磁石の3次元モデルを作り、3次元磁場計算ソフト OPERA-3D TOSCA を用いて3次元磁場設計を行った。

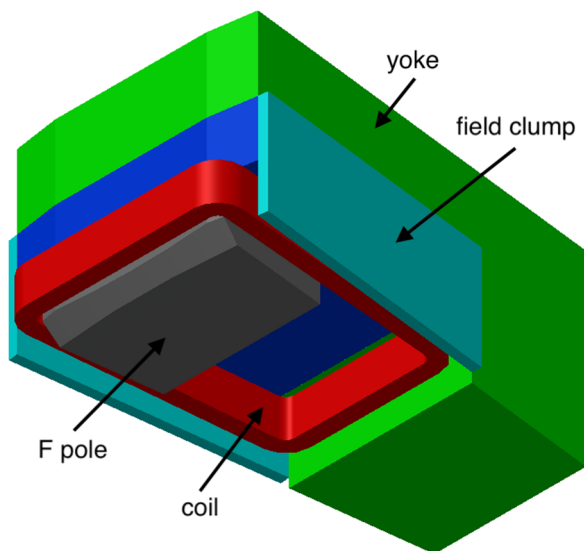


Figure 8: 3D model of the electromagnet of PPR.

青色で示したヨーク、コイル、F磁極を再利用し、緑色で示したヨーク、水色で示したフィールドクランプを追加した。C型であるため、F磁極は半径方向の幅を削っている。

TOSCAでの計算の結果、式(4)で表される3次元的な磁場勾配 $k_{local\_3D}$ はFigure 9のようになった。また、半径内側で $k_{local\_3D}$ が $k = 1$ より大きくなっていることにより光学安定条件を満たさないこと、漏れ磁場によりBL積が光学設計よりも大きくなっていることから、安定に周回し、チューンを求めることができたのは370 MeVから420 MeVの範囲だった。Figure 10にそのときのチューンダイアグラムを示す。

$$k_{local\_3D}(r) = \frac{r}{B_l(r)} \frac{dB_l(r)}{dr} - 1 \quad (4)$$

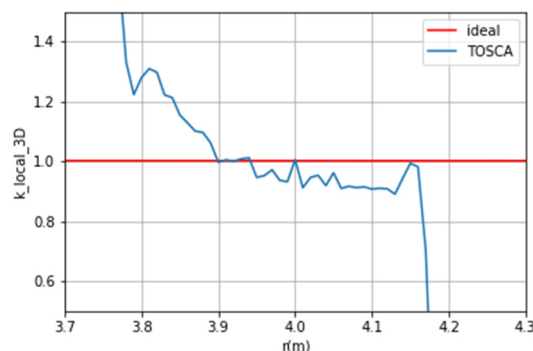


Figure 9:  $k_{local\_3D}$  as a function of radius.

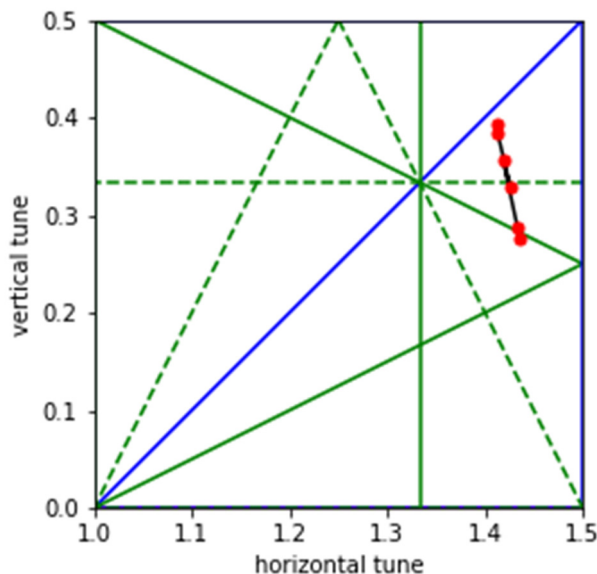


Figure 10: Tune diagram of PPR.

400 MeVのときの軌道半径は4.03 m、チューンは $(\nu_x, \nu_y) = (1.43, 0.33)$ であった。300 MeVから400 MeVまでの陽子ビームを安定かつ零色収差で周回させるため、磁極やクランプの形状などの修正を行っていく必要がある。

### 3. まとめ

KURNS の 150 MeV FFAG 加速器主リングを改造した PPR の設計について報告した。設計は、ビーム光学設計、リニアエッジ磁場による検討、2次元磁場設計、3次元磁場設計の順に行った。今後は、磁極やクランプの形状の修正により陽子ビームを安定に周回させること、そしてビームと標的との反応や負パイオン生成量の評価を行っていききたい。

### 参考文献

- [1] C. H. Pyeon *et al.*, “First Injection of Spallation Neutrons Generated by High-Energy Protons into the Kyoto University Critical Assembly”, *J. Nucl. Sci. Technol.* Vol. 46 (2009), No. 12 pp. 1091-1093.
- [2] Sato, Akira, Adachi, Taihei, & Ogitsu, Toru (2011), “The first muon beam measurement at the MuSIC”. Proceedings of the 8th annual meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (p. 1377), Japan.
- [3] Y.Miyake *et al.*, “J-PARC Muon Facility, MUSE”. Proceedings of the 14th International Conference on Muon Spin Rotation, Relaxation and Resonance ( $\mu$ SR2017); <https://journal.s.jps.jp/doi/abs/10.7566/JPSCP.21.011054>
- [4] Y.Mori *et al.*, “Intense Negative Muon Facility with MERIT ring for Nuclear Transmutation”. Proceedings of the 14th International Conference on Muon Spin Rotation, Relaxation and Resonance ( $\mu$ SR2017); <https://journal.s.jps.jp/doi/abs/10.7566/JPSCP.21.011063>
- [5] Y. Mori *et al.*, “Neutron Source with Emittance Recovery Internal Target”, in Proc. 23rd Particle Accelerator Conf. (PAC'09), Vancouver, Canada, May 2009, paper TH4GAC04, pp. 3145-3147.
- [6] Ishi, Yoshihiro, Uesugi, Tomonori, Kuriyama, Yasutoshi, Sakamoto, Masaaki, Muto, Masayuki, Mori, Yoshiharu, Abe, Yuma, Ishii, Kiwamu, & Masaki, Ryo (2015), “Status report of FFAG accelerator complex at KURRI”. Proceedings of the 12th annual meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (p. 1419), Japan.
- [7] Y. Ishi *et al.*, “Future Plans of ADS Proton Drivers at Kyoto University Research Reactor Institute”, in Proc. 8th International Particle Accelerator Conf. (IPAC'17), Copenhagen, Denmark, May 2017, paper THPVA100, pp. 4695-4697.
- [8] Yamakawa, Emi & Lagrange, J-B & Nakano, R & Planche, Thomas & Ishi, Y & Uesugi, Tatsuya & Kuriyama, Yasutoshi & Qin, Bin & Mori, Y. (2011). Serpentine acceleration in scaling FFAG. IPAC 2012 - International Particle Accelerator Conference 2012.
- [9] M. Yoshimoto, T. Ogitsu, M. Aiba, T. Obana, S. Machida and Y. Mori, "The magnet design study for the FFAG accelerator," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 14, no. 2, pp. 397-401, June 2004.