

ハイブリッド型エネルギー回収内部ターゲットリングの概念設計

CONCEPTUAL DESIGN OF HYBRID ENERGY RECOVERY INTERNAL TARGET RING

小塚公貴^{#,A)}, 石禎浩^{B)}, 上杉智教^{B)}, 栗山靖敏^{B)}, 森義治^{B)}

Koki Kozuka^{#,A)}, Yoshihiro Ishi^{B)}, Tomonori Uesugi^{B)}, Yasutoshi Kuriyama^{B)}, Yoshiharu Mori^{B)}

^{A)} Kyoto University

^{B)} KURNS

Abstract

The concept of an Energy Recovery Internal target (ERIT) was proposed for highly efficient secondary particle generation at Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University (KURNS). And the energy recovery mechanism was demonstrated in principle using actual equipment. On the other hand, the generation of secondary particles such as pions requires acceleration to higher energies, and a low k value indicating the magnetic field gradient suitable for the ERIT mechanism causes a problem of large orbital displacement due to acceleration. Therefore, we propose a hybrid ERIT (HYERIT), which has two different k -values in one ring. The HYERIT scheme aims to achieve high intensity secondary particle production in a compact ring by changing the k -value in the radial direction from high k -value for acceleration to low k -value for ERIT scheme. The conceptual design of HYERIT will be reported.

1. はじめに

原子力発電に伴い発生する使用済み燃料は再処理過程で高レベル放射性廃棄物が再処理できないものとして残る。この高レベル放射性廃棄物の最終処理方法として長寿命核分裂生成物(LLFP:Long Lived Fission Products)を安定核、短寿命核に核変換する研究が行われており、核変換の一つの方法として負ミューオン核変換が検討されている。負ミューオン核変換によるLLFP処理の実現には大強度の負ミューオンビームを効率よく生成することが必要である。

大強度の負ミューオン生成法としてエネルギー回復内部標的(ERIT:Energy Recovery Internal target)方式が検討されている [1, 2]。負ミューオンは負 π 中間子の崩壊から得られるが、その生成には、より高いエネルギーまでの加速が必要となり、ERIT 機構に適した低い k 値では加速による軌道変位が大きくなってしまふ問題がある。そこで我々は一つのリング内で二つの異なる k 値を取るハイブリッド ERIT(HYERIT)を提案する。この k 値とは磁場勾配の大きさを表す。HYERIT では、 k 値をリング内の半径方向に加速の為の高い値から ERIT スキームの為の低い値に急峻に変化させることで、コンパクトなリングで大強度の二次粒子生成を実現することを目指す。

2. HYERIT リングの設計

2.1 要求される磁場

HYERIT リングの設計のため、要求される磁場の詳細を決定した。Table 1 に磁場のパラメータを、Fig. 1 に磁場分布を示す。本研究で注目する粒子のエネルギー範囲は 100 MeV - 130 MeV であり、加速ターンで 100 MeV から加速を始め、130 MeV で蓄積ターンに移るとした。 k 値は、京都大学複合原子力科学研究所

(KURNS)の 150 MeV FFAG 加速器リングを参考にし、加速ターンで 7.5、蓄積ターンで 0.2964 と決定した。蓄積ターンの k 値はスリッページファクター $\eta = 0$ となる値である。各ターンの Closed orbit (CO)が重ならないよう基準半径・基準磁場を設定し、電磁石を通過する CO の半径方向の範囲から、各 k 値の有効磁場範囲を決定した。

Table 1: Required Magnetic Field Parameter

	加速領域	蓄積領域
k 値	7.5	0.2964
F 磁石の有効磁場範囲 [cm]	510 - 530	540 - 558
D 磁石の有効磁場範囲 [cm]	500 - 520	530 - 545
F 磁石の基準磁場 [T] at 基準半径 [cm]	1.45 at 530	1.40 at 530
D 磁石の基準磁場 [T] at 基準半径 [cm]	-0.85 at 530	-0.80 at 530

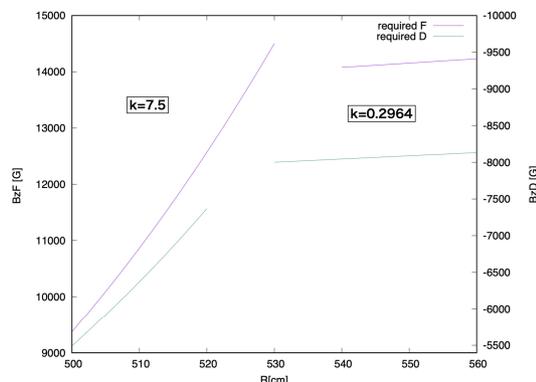


Figure 1: Required Magnetic Fields as functions of radius.

[#] kozuka.koki.76v@st.kyoto-u.ac.jp

2.2 二次元磁場設計

有効磁場範囲においてEquation (1)で表される理想的な磁場が得られるように、二次元磁場計算ソフトPOISSON ver 7.17 を用いて二次元磁場設計を行った。F 磁極幅は $502 \text{ cm} \leq r \leq 568 \text{ cm}$ 、D 磁極幅は $492 \text{ cm} \leq r \leq 560 \text{ cm}$ 、とした。Equation (2)で表される二次元的な磁場勾配 k_{local_2D} が、各ターンの有効磁場範囲で理想の k 値付近になるように磁極形状の修正を繰り返した。

$$B_z = B_{z0} \left(\frac{r}{r_0} \right)^k \quad (1)$$

$$k_{local_2D}(r) = \frac{(B_z(r + dr) - B_z(r))}{dr} \frac{r}{B_z(r)} \quad (2)$$

2.3 磁極形状の最適化

F 磁極において k 値ジャンプする磁極間隙のつなぎ目にコブを形成することで k 値の急峻な変化を実現した。コブを作成することでつなぎ目の磁場に三次多項式の様な磁場を作ることが出来る。この多項式の極大値と極小値の位置と値を制御することで、加速領域から蓄積領域の磁場を滑らかにつなぐことを目指した。磁極形状の最適化にあたり、以下三つの条件を満たすコブの形状を調べた。

- 極大値の値が 530 cm における要求される磁場の値(14500 G)より大きい。
- 極小値の値が 540 cm における要求される磁場(14080 G)の値より小さい。
- 極大値と極小値の位置がどちらも 530 - 540 cm の間にある。

コブの形状はコブの頂点の位置、コブの高さ、溝の深さの三つのパラメータを半径 $r = 530, 532, 534, 536, 538, 540 \text{ cm}$ の高さで制御することで決定した。

三つのパラメータそれぞれの比較結果を Table 2, Table 3, Table 4 に示す。比較結果から、

- コブの頂点の位置に極大値をとる。
- 頂点の位置 + 10 (± 1) cm の位置に極小値をとる。
- 頂点が外側にあるほど極大値と極小値は大きくなる。
- コブの高さと極大値の値は正の相関を持つ。
- コブの高さと極小値の値は負の相関を持つ。
- 溝を深くするほど、極小値の位置は内側に行く。

以上のことが分かった。この結果からF磁極のコブ形状をコブの頂点位置を 5.32 - 5.34 cm、コブの高さを 0.44 cm、溝の深さを 0.63 cm と決定した。

Table 2: Bump Top

	極大値 (R_{max} [cm], B_{zmax} [G])	極小値 (R_{min} [cm], B_{zmin} [G])
532 - 534 [cm]	(533, 14920)	(543, 13900)
534 - 536 [cm]	(535, 15247)	(545, 14187)
536 - 538 [cm]	(533, 15431)	(548, 14360)

Table 3: Bump Height

	極大値 (R_{max} [cm], B_{zmax} [G])	極小値 (R_{min} [cm], B_{zmin} [G])
0.24 [cm]	(533, 14691)	(543, 14242)
0.44 [cm]	(535, 14800)	(545, 14093)
0.64 [cm]	(533, 14920)	(542, 13900)
0.84 [cm]	(533, 15046)	(545, 13693)
1.04 [cm]	(533, 15190)	(543, 13452)

Table 4: Groove Depth

	極大値 (R_{max} [cm], B_{zmax} [G])	極小値 (R_{min} [cm], B_{zmin} [G])
0.13 [cm]	(532, 14777)	(542, 14093)
0.43 [cm]	(532, 14720)	(541, 14084)
0.63 [cm]	(532, 14704)	(540, 14056)

2.4 磁場計算結果

作成した磁極の形状を Fig. 2 に示し、Fig. 2 内で赤丸に囲われたコブの拡大図を Fig. 3 に示す。二次元磁場計算により求めた磁場分布と k 値分布、そして設定値とのずれは Fig. 4, Fig. 5 のようになった。

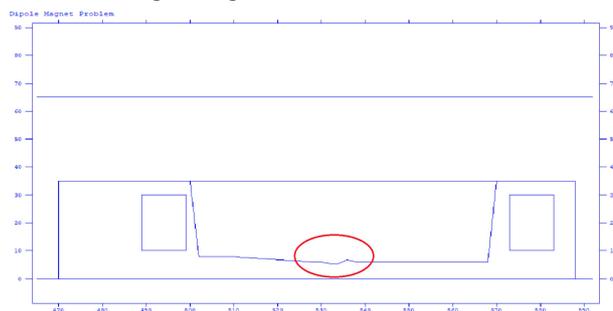


Figure 2: Electromagnet shape.

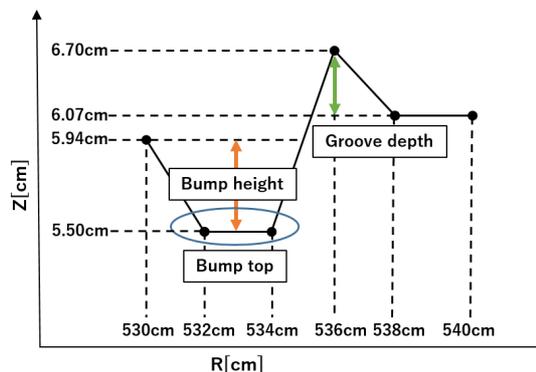


Figure 3: Bump shape.

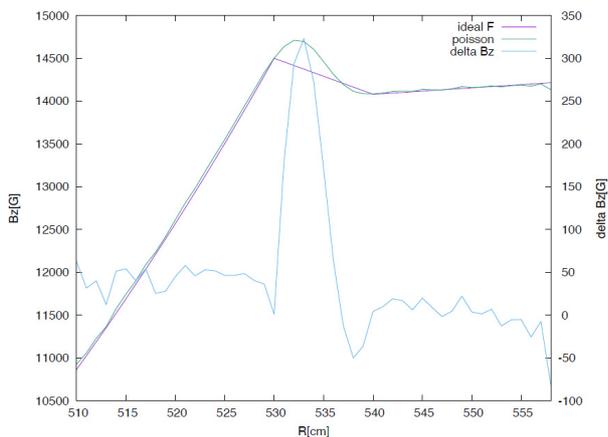


Figure 4: Bz and ΔBz as a function of radius.

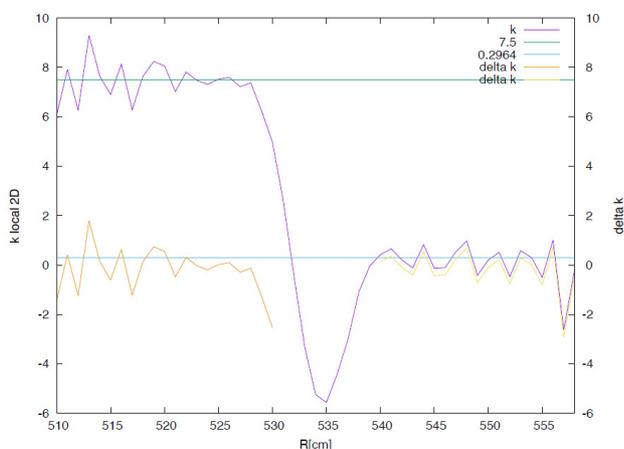


Figure 5: $k_{\text{local_2D}}$ and Δk as a function of radius.

3. 設計の妥当性の検証

四変数(r, pr, z, pz)を設定し、ビーム軌道計算を二次元磁場計算によって得られた磁場をもとに四次の Runge-

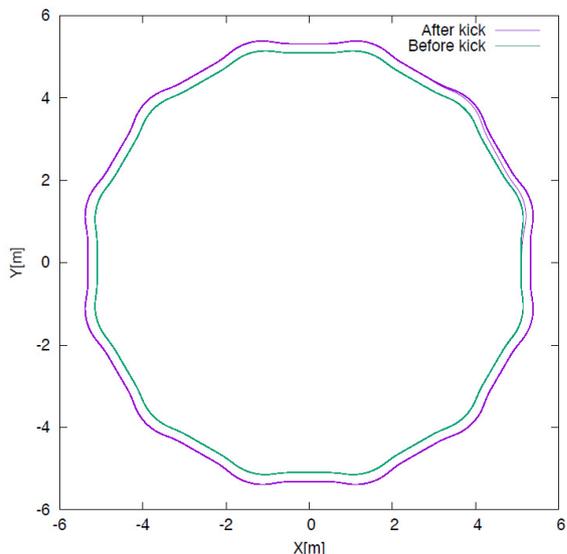


Figure 6: Beam Orbits before and after the kick.

Kutta 法を用いて行った。キックにより加速ターンの CO から蓄積ターンの CO へ遷移するビーム軌道を Fig. 6 に示す。加速ターンの終了後のロングストレートセクションで、一様に約 -0.1166 T の磁場を与えることで蹴り出し、キック後二、三セル目の間のロングストレートセクションで一様に約 0.0774 T の磁場を与えることで蹴り戻しを行った。キック後の蓄積ターンの位相空間(r, Pr)を Fig. 7 に、加速ターンと蓄積ターンのベータ関数を Fig. 8 に示す。

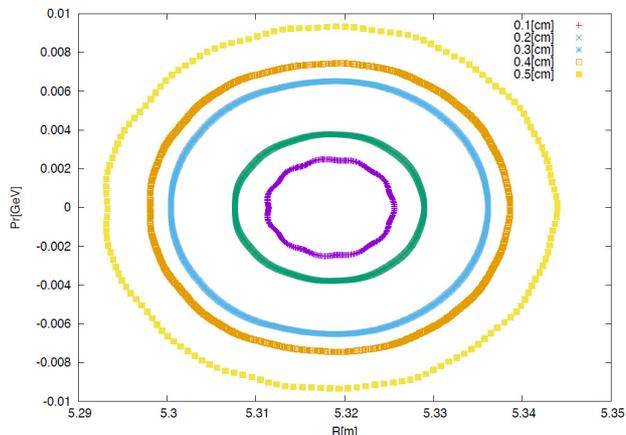


Figure 7: Phase space structure in the storage region.

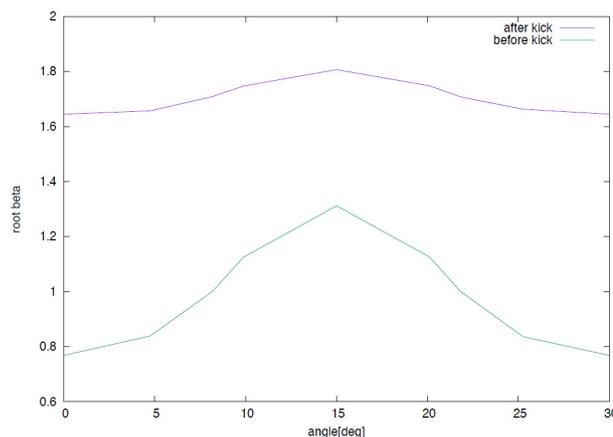


Figure 8: Beta functions before and after the kick.

4. まとめ

一つのリング内で二つの異なる k 値を取る HYERIT リングの概念設計について報告した。設計は要求される磁場設定、二次元磁場計算、設計の妥当性の検討の順に行った。今後は二次元磁場計算によって決定した磁極形状をもとに三次元磁場設計を行い、陽子ビームの安定的な周回、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たい。

参考文献

[1] 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 ($\mu\text{SR}2017$); <https://journals.jps.jp/doi/abs/10.7566/JPSCP.21.011063>

PASJ2022 FRP005

- [2] 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.