

磁極長テーパによる四極電磁石の磁場補正

永井 良治¹、羽島 良一、西森 信行、菊澤 信宏、沢村 勝、峰原 英介

日本原子力研究所 光量子科学研究センター

自由電子レーザー研究グループ

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

概要

磁極端部から円錐形を切り落として磁極にテーパを付けるように磁極端部の形状を修正し四極電磁石の磁場の精度を改善した。その円錐形の高さを、三次元計算を基にして最適化した。磁場の精度はビーム軸に沿って磁場勾配積分の平坦度により評価した。その結果、その値の径方向のばらつきは 0.05 % 以下になった。

1. 緒言

近年の加速器においては、精度の高い四極電磁石が求められるようになってきた。特に高効率・高出力型の自由電子レーザーでは非常に高い精度の四極電磁石が求められる。ビーム輸送系での電子ビームの劣化は直接自由電子レーザーの電子ビームから光へのエネルギー変換効率に影響を及ぼす。また、エネルギー回収型の自由電子レーザーでは、アンジュレータ内で相互作用をし、エネルギー広がりが大きくなった電子ビームを効率よく回収するために実効的開口の大きい高精度の四極電磁石が必要である。

四極電磁石磁場の高精度化のために様々な方法による磁場分布の補正がこれまでになされた。その磁場補正の方法のひとつが、三次元的な漏れ磁場を考慮し、磁極端部の形状を修正することにより磁場の高精度化を図るものである。Kumada ら^[1]は単純な四角錐の形状を磁極端部から切り落とすことにより磁場の補正を行い、その形状の最適化を行った。Itano ら^[2]は end-shim を用いて磁極端部の形状を最適化し、ビーム軸に沿った磁場勾配積分を計測しその最適化について評価している。一方、磁極の断面形状の修正のみによる磁場の補正もなされている。Yoshino ら^[3]は三次元計算を基にして断面形状の最適化を行った。しかし、この方法では断面形状のみの修正により磁場の補正を行っているので複雑な形状の磁極になっている。

原研自由電子レーザー^[4]のような比較的低エネルギーの自由電子レーザーでは短い四極電磁石が多数使われ、短い四極電磁石では磁極端部での漏れ磁場は磁場精度の大半を決めているので、磁極端部の形状を修正することに磁場の補正を行う。これまでの磁極端部の修正による補正^[1,2]では、四分の一対称になる形で端部を切り落としていたが、ここではより対称性のよいビーム軸を対称軸とする軸対称な形状

で、磁極端部を切り落とすことにより磁場を補正する。

2. 方法

四極電磁石の磁極端部には三次元的な漏れ磁場があり、このために実効的な磁極長が径方向で変化し磁場精度の劣化につながる。外周部では内周部よりも磁極の間隔が狭いため、漏れ磁場が少なくなり実効的な磁極長が内周部より短くなる。このために、外周部ほどレンズの厚みが薄くなり、その集束力は内周部より弱くなってしまい収差を生じる。このような収差は四極電磁石の長さが径と同程度の短い四極電磁石で特に問題となる。このような三次元的な漏れ磁場に対する補正としては実効的な磁極長を考慮して磁極端部の形状を修正することが有効である。

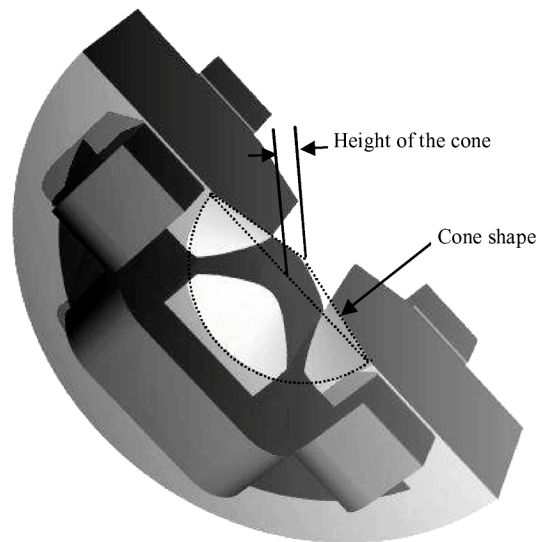


図1：磁極端部の形状

実効的な磁極長を平坦にするには、漏れ磁場によって変化している分を機械的な磁極長に変更を加えて修正すればよい。漏れ磁場のために外周部ほど実効的な磁極長が短くなっているため、その分内周部の磁極長を短くする。外周ほど機械的な磁極長が長くなるように磁極長にテーパを設ける。すなわち、ビーム軸に対して軸対称な形状で磁極端部を切り落とす。

¹ E-mail: r_nagai@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

ここでは、図1に示すように、ビーム軸に対して軸対称な形状の中で最も単純な形状である円錐形で磁極端部を切り落とすことにより磁場の補正を行う。

この形状の最適化のパラメータとしては円錐の底面の半径と高さがあるが、ここでは高さのみを変えることにより最適化した。磁極断面形状の様な他のパラメータも固定して最適化を行った。表1にまとめたような四極電磁石について、*ELF/magic*^[5]を用いて三次元計算を基にした円錐形の高さの最適化により磁場補正を行った。

表1：四極電磁石の主要なパラメータ

磁極長	100 mm
ボア直径	60 mm
磁極幅	83.7 mm
磁場強度	2 T/m
磁極断面形状	双曲線形状
磁極及びヨーク材質	JIS SS41
円錐形底面の半径	80 mm

3. 結果

四極電磁石の磁場の精度は次の式で定義されるビーム軸に沿っての磁場勾配積分 $GL(x)$ の平坦度により評価した。

$$GL(x) = \int G(x, z) dz \quad (1)$$

ここで、 $G(x, z)$ は磁場勾配、 x は径方向の位置、 z はビーム軸方向の位置である。補正の結果、図2に示すように、その値の径方向のばらつきは円錐形の高さが10 mmで0.05%以下になった。

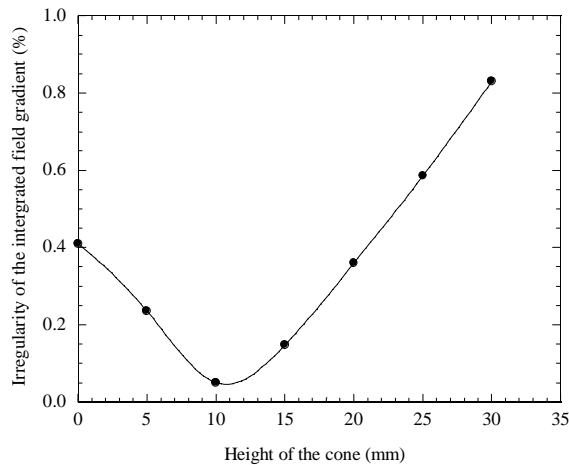


図2：円錐形の高さによる磁場精度の変化

円錐形の高さを変えたときの、磁場勾配積分 $GL(x)$ と実効的磁極長 $L_{eff}(x)$ の径方向での分布の様子を図3に示す。ただし、実効的磁極長 $L_{eff}(x)$ は次式で定義する。

$$L_{eff}(x) = GL(x) / G_0(x) \quad (2)$$

ここで、 $G_0(x)$ はビーム軸方向での四極電磁石の中心での磁場勾配である。この図から円錐形の高さの最適化により実効的磁極長が平坦になった結果、磁場勾配積分の分布が平坦になっている様子が分る。

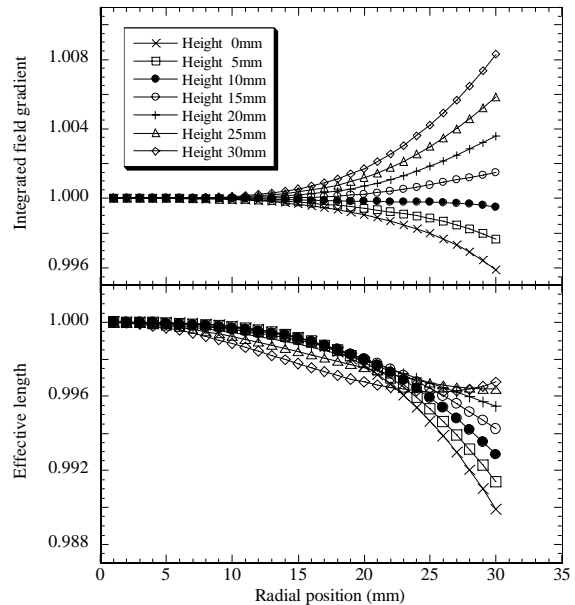


図3：磁場勾配積分と実効磁極長の分布

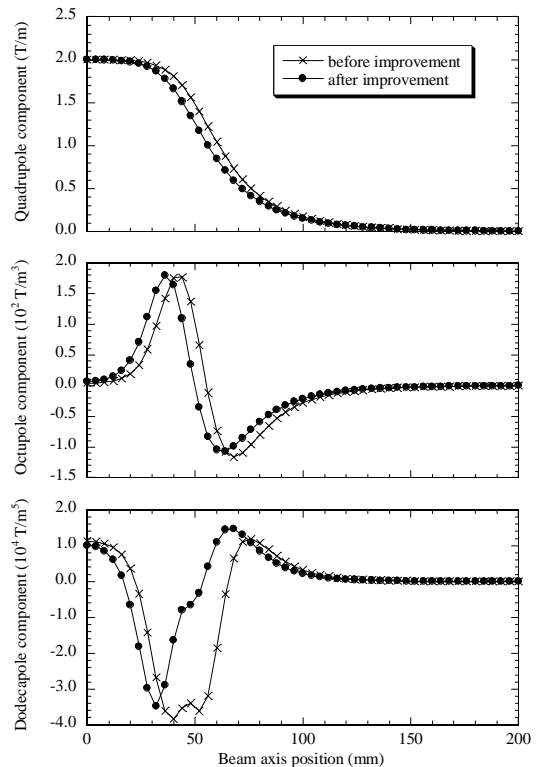


図4：多極成分のビーム軸方向分布

高次の多極成分を低減することにより、四極電磁石の磁場精度は改善されるので、磁場精度について議論するとき高次の多極成分は重要な量である。四

極、八極、十二極成分のビーム軸方向の分布を図4に示す。それぞれの高次多極成分の四極成分に対する比率を次のように定義する。

$$R_m = \left| \frac{\int C_m \cdot R_b^{m/2-1} dz}{\int C_4 \cdot R_b dz} \right| \quad (3)$$

ここで、 C_m は多極成分、 m は極数、 R_b はボア半径である。八極と十二極の成分の比率は 3.8×10^{-4} と 3.4×10^{-3} であったのが 3.9×10^{-5} と 2.7×10^{-4} にそれぞれ低減された。このように高次の多極成分が十分に低減されていることから、円錐形を磁極端部から切り取ることによる補正は非常に有効であると言える。

4. 結論

四極電磁石の磁極端部を円錐形で切り取ることにより、三次元的な漏れ磁場に対する補正を行った。その結果、磁場勾配積分のばらつきに関しては

0.05%以下、高次の多極成分に関しては十分の一程度に低減できた。このような磁極端部を円錐形で切り取ることによる四極電磁石の磁場補正は非常に有用であることが分かった。

参考文献

- [1] M. Kumada, et al.: Nucl. Instr. and Methods, 211, 283-286 (1983)
- [2] A. Itano, et al.: Proc. of the 9th Symposium on Accelerator Science and Technology, 273-275 (1993).
- [3] K. Yoshino, et al.: Proc. of the 9th Symposium on Accelerator Science and Technology, 282-284 (1993).
- [4] E. Minehara, et al.: Nucl. Instr. and Meth. A 429, 9-11 (1999).
- [5] ELF corporation: "ELF/magic reference manual" (1995)