

ILC ダンピングリングにおける永久磁石を用いた偏向磁石の設計 DESIGN STUDY OF MAIN DIPOLE MAGNET USING PERMANENT MAGNET FOR ILC DAMPING RING

八子丈生 *^{A)}、岩下芳久 ^{A)}、照沼信浩 ^{B)}、頓宮拓 ^{A)}、片山領 ^{A)}、竹内佑甫 ^{A)}、阿部賢 ^{A)}、不破康裕 ^{C)}
Tomoki Yako^{A)}, Yoshihisa Iwashita^{A)}, Nobuhiko Terunuma^{B)}, Hiromu Tongu^{A)},
Ryo Katayama^{A)}, Yusuke Takeuchi^{A)}, Masashi Abe^{A)}, Yasuhiro Fuwa^{C)}
^{A)}Kyoto ICR, ^{B)}KEK, ^{C)}KURNS

Abstract

In the Technical Design Report (TDR) of International Linear Collider (ILC), electromagnets are assumed for the dipole magnets in the damping ring. However, the costs such as the electricity for coil excitations and cooling water pumps have to be paid, and accidents such as power supply breakdowns and water leaks would be anticipated. When we use permanent magnets instead of electromagnets, reductions of the operation and maintenance costs are expected together with less system failures. This paper reports the results of 3D magnetic field simulation of main dipole magnet with ferrite permanent magnets.

1. はじめに

国際リニアコライダー (ILC) 計画の TDR では、ダンピングリングの偏向磁石には電磁石を用いることになっている。[1] しかし電磁石を用いるためには、ケーブルの敷設や磁場を発生させるための電力、電磁石の冷却に必要な水などの様々なコストが掛かる。また、電源の故障や冷却水漏れ等の事故が発生したり、それらの修復やメンテナンスにも費用が掛かる。偏向磁石に永久磁石を用いれば、電力を供給するためのケーブルや電源、冷却水が必要なくなる。そのため、それらのコストが削減でき、故障やトラブルもなくなるため、メンテナンスがしやすくなったりそれに掛かる費用を抑えたりすることが期待できる。さらに最近ではダンピングリングでの、エミッタンスを良くするために偏向磁石の磁場を 0.13[T] と低く設定することが検討されているため、永久磁石の材料に安価なフェライトが使用出来る。したがって、ネオジム磁石やサマリウムコバルト磁石の様な高価な希土類系磁石を使用する必要がなく、比較的 low コストで製作が可能になる。以上よりダンピングリングの偏向磁石にフェライト永久磁石を用いることは、コストの面からも運用の面からも有効な手段と言える。

偏向磁石はビームを曲げるための磁石であるが、ビーム軌道を設計上のそれに合わせるため、磁場強度を調整する必要がある。これについての大雑把な形状や 2 次元のシミュレーション結果については、先行研究ですでに報告されている。(Fig.1) [2] ここでは 15mm のギャップを持たせた二つ割りの円柱状のローターを回転させることで磁気回路中の磁気抵抗を調節し、ビーム軌道上の磁場強度を変化させている。本発表ではこれらの形状を元に、フェライト永久磁石を用いた設計での 3 次元磁場シミュレーションを行い、軌道平面内の磁場分布を調べることを試みたので、その結果について報告する。

2. 磁場シミュレーション

Figure 1 の形状を元に CST PARTICLE STUDIO(CST Studio Suite) [3] で形状を作成した。Solver は Magneto-

static を使った。ビーム軌道平面を XZ 平面に取り、ビーム軌道を z 方向に取った。実際には偏向磁石は長手方向に 1000mm であるが、対称性より Fig.2 の様な、長手方向とビーム軌道平面で半分の全体の 1/4 の大きさの形状を作成した。今回使用するフェライト永久磁石は Y30H-1 を仮定し、残留磁化は 0.38~0.40[T] の幅があるため 0.38[T] を採用した。ローターはギャップがビー

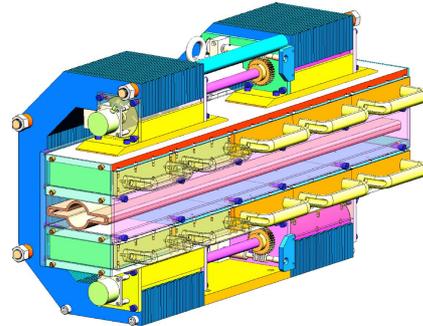


Figure 1: Overview of possible design of PM dipole for ILC damping ring.(from [2], Fig.3)

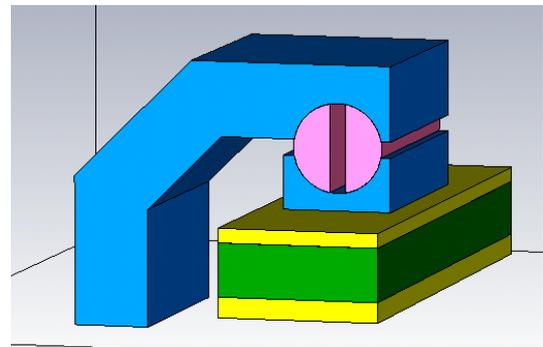


Figure 2: Sample geometry of main dipole magnet in CST PARTICLE STUDIO(CST Studio Suite). Ferrite permanent magnet is green, rotor is pink, return yoke is light blue, and pole plate is yellow.

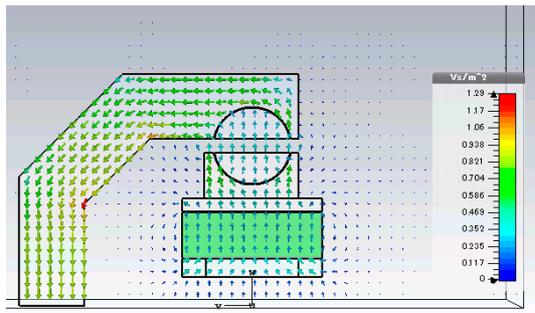


Figure 3: Magnetic flux density at center of sample.

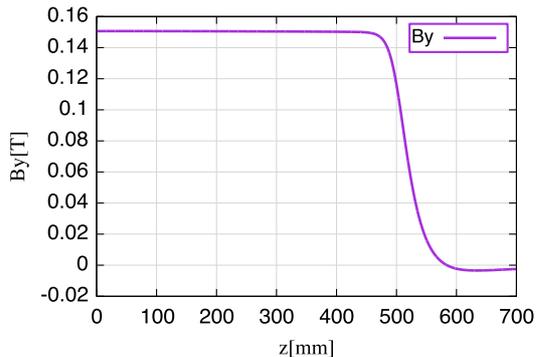


Figure 4: Y-component of magnetic field at rotor angle 90°.

ム軌道平面に対して垂直な時 (Fig.2) を Rotor angle 0° としている。この形状を用いて離散化を行った。なお今回は 3次元コードの扱いからスタートしているため、磁極の入出射部のチャンファや、六極成分を抑え込むためのシムの導入などは行っていない。

次に磁場分布の計算を行った。その結果、磁石断面の磁束密度は Fig.3 のようになった。上下の非対称性は課していないので、磁化方向を上向きに取り計算した。3次元計算も 2次元計算と同様な結果となった。磁石の長さ 500mm と磁石端部から磁石間のギャップの約 3 倍の長さの 200mm を合わせた全長 700mm の直線をビームの中心軌道上で定義し、その直線上で磁場の y 成分を調べた。中心軌道上の計算結果を Fig.4 に表す。Figure 4 から永久磁石は磁極全体をカバーしていないが、磁石内では概ね磁場の強さが一定であることがわかる。発生磁場が小さいため、磁極鉄中の動作点に余裕があり、透磁率が大きく保たれている結果であろう。ビームの進行方向については、わずかな磁場の不均一性についてはビーム光学に大きな影響を与えないので、予想通りの結果であり、モデル化等計算自身に大きな間違いがないことが確認できた。

中心軌道上の BL 積は 155[T mm] で、近似の精度が低い計算においても同様な結果を得ることが出来た。また、その計算の BL 積のローター角依存性は Fig.5 のようになった。15mm のギャップ幅を持つ二つ割りローターの回転で約 25% の可変範囲を持つ事が出来た。磁極間ギャップ 60mm、総磁石厚さ 100mm の磁気回路でギャップ間隔を 90mm に広げることに対応する。発生磁場の絶対値として 2次元計算より大きめの値が得られているが、モデル化の精度などに改善の余地がある可能性

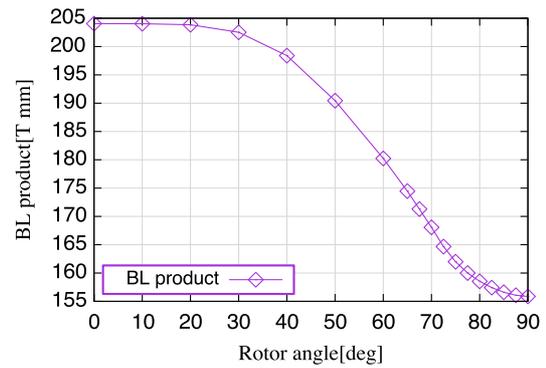


Figure 5: Rotor angle dependence of BL product.

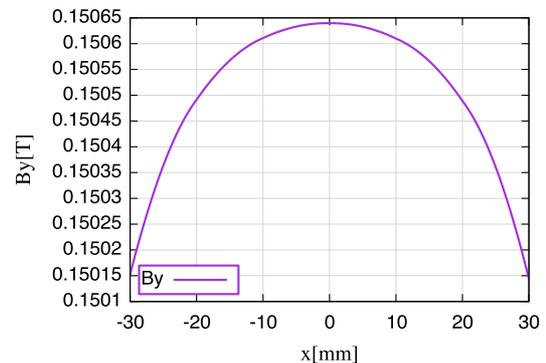


Figure 6: Magnetic field at z=0.

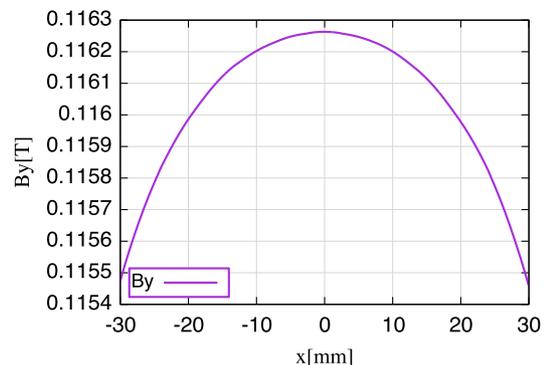


Figure 7: Magnetic field at z=500.

がある。

次に、磁石の z 方向に対して中心部分 ($z = 0$) と端部 ($z = 500$) の $x = \pm 30$ の磁場分布を調べた。結果は Fig.6,7 のようになった。この範囲での磁場の最大値を B_{Max} 、最小値を B_{min} とすると平坦度 $(B_{Max} - B_{min})/By(0)$ は現状で 6.9×10^{-3} となった。 $z = 0$ の平坦度は 3.3×10^{-3} であり、磁石端部に磁場の六極成分が多く現れてくる事がわかる。

次に磁場の y 成分の x 依存性の計算値から、5次多項式で fitting をして、各次数の係数をいくつかの z 座標で評価した。この係数は $x = \pm 30$ における磁場の y 成分の多極成分を表しており、この係数が小さければ小さいほど、BL 積が位置によらず均一、つまりビームは通る位置によらず均一な力を受ける事が出来る。それらの多極成分 (四極と六極) の z 依存性を Fig. 8,9 に表す。四

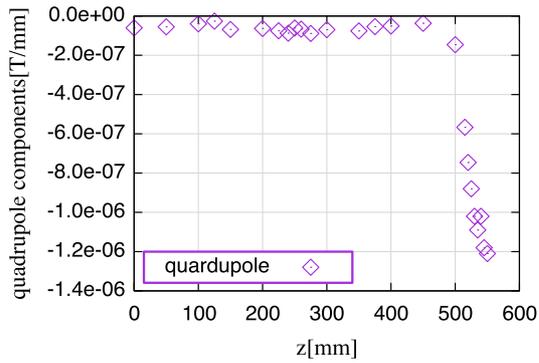


Figure 8: z dependence of quadrupole components.

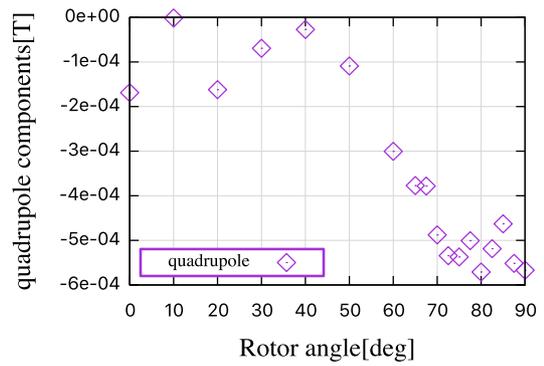


Figure 11: Rotor angle dependence of quadrupole components.

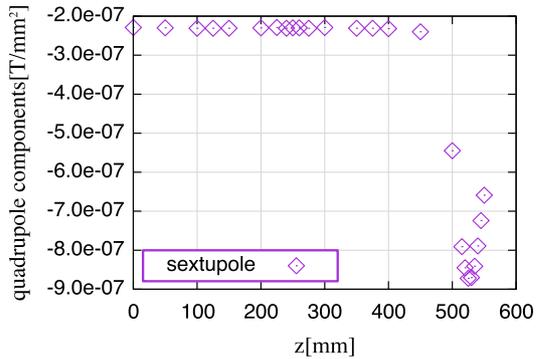


Figure 9: z dependence of sextupole components.

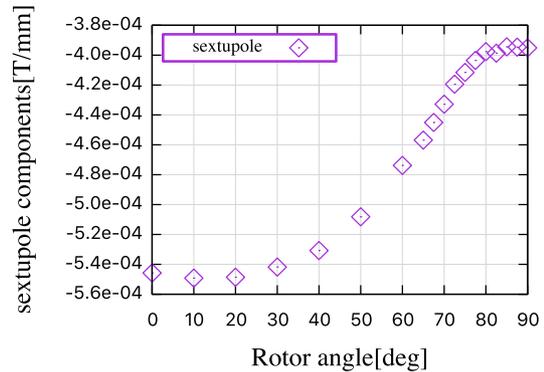


Figure 12: Rotor angle dependence of sextupole components.

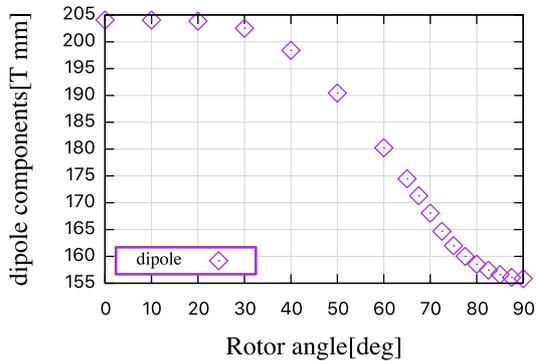


Figure 10: Rotor angle dependence of dipole components.

極、六極どちらも磁石端部やその外側に多く現れた。四極成分は形状の非対称性から現れるため、ヨーク付近での四極成分の z 依存性の評価を試みたが、まだ誤差が大きく、計算精度を上げる必要がある。まだ計算精度が十分でないが、多極成分などが評価できるところまで計算が出来るようになった。BL 積の多項式フィットを行って、各次数の係数を求め、多極成分の評価を行った暫定結果を Fig. 10,11,12 に示す。多極高次成分もローター角度依存性を持つため、低減方法については要検討である。

3. まとめ

永久磁石を用いた偏向磁石の 3 次元磁場シミュレーションを行い、ローターを持つ構造の計算評価をはじめた。四極成分は非対称性から現れることは 2 次元計算でも現れることがわかっており、計算精度向上の後、磁極

と永久磁石の隙間でのシム微調整等で対処できると考えている。また、六極成分に関しては、シムを入れることにより改善することがわかっているが、今回はローター回転角の依存性の検証可能性を確認することに注力したため、細かい調整は行わなかった。今後は計算精度を高めて高次成分の影響の調査や、シムの導入や形状の改良などで四極、六極成分を減らしていくことで、永久磁石を用いた偏向磁石としての精度を高めるなど磁場分布の改善を行っていききたい。フェライトの放射線減磁についての情報が十分ではないため、磁石素材についても評価検討を計画している。

参考文献

- [1] ILC Technical Design Report; <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [2] Y. Iwashita, N. Terunuma, "DESIGN OF PM DIPOLE FOR ILC DAMPING RING", Proceedings of The 9th International Particle Accelerator Conference, Vancouver, Canada, April 29 to May 4, 2018.
- [3] DASSAULT SYSTEMES, CST PARTICLE STUDIO 2016, Velizy-Villacoublay.