

## MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION CONTROLLED BY ANISOTROPIC INTER-POLE AND REDUCTION OF FRINGING FIELD

Y. Iwashita<sup>1,A)</sup>, A. Sato<sup>B)</sup>, Y. Arimoto<sup>B)</sup>

A) Advanced Research Center for Beam Science, Institute for Chemical Research, Kyoto University, Gokanoshō, Uji, Kyoto 611-0011

B) Graduate School of Science, Osaka University, 1-1 Machikaneyamacho, Toyonaka, Osaka 560-0043

### Abstract

A novel method to generate a gradient field in a constant gapped magnet is devised with use of inter-pole made of anisotropic magnet material. This magnet can have not only constant gap but also smaller fringing field compared with a conventional one. This technique should widen the recipe to design a magnet with a complex magnetic field distribution.

## 異方性中間磁極による磁場分布の制御と漏れ磁場の抑制

### はじめに

機能結合型シンクロトロン[1,2]やFFAG[3]などでは大きな勾配をもつ磁場を広い空間で発生する必要がある。鉄を使った磁石の場合、単一起磁力で、磁極間距離（磁気抵抗）を場所によって変える方法と、磁極間距離を固定しトリムコイルを用いて、起磁力を変える方法が知られている。ここでは、磁極間隔を一定に保つ事の出来る、複合異方性材料を中間磁極として用いる新たな方法について紹介する。

### 中間磁極による勾配磁場の制御

一般に、Fig. 1のような磁石において鉄の透磁率が十分大きい場合、磁束に沿った積分線路上でアンペールの法則を適用することにより磁極間磁場 $B$ は $\mu_0 I/g$ となる。従って、磁極間隔 $g$ を変化させることにより磁場勾配が出来る。しかし、大きな磁場勾配が必要な場合、磁極間隔がビームの入射位置によって大きく異なるため、実効磁極長が場所の関数となる。また、磁場分布中小さい磁場が要求される場合、磁極間隔が広がるため漏れ磁場が大きくなり、他のリング構成要素、高周波空洞やQ磁石などに大きな影響を与える。これを避けるため、磁極をFig. 2のように上下分割し、入れ替えてやるとビーム軌道面付近は磁極間隔を一定と出来る。しかし、磁極が

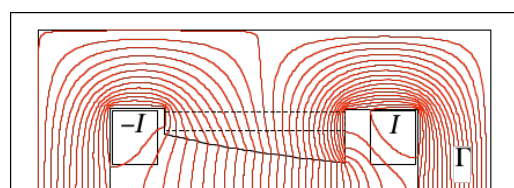


Fig. 1 A magnet with gradient field.

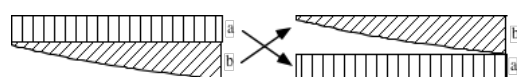


Fig. 2 Divided magnet pole parts are switched.

等方性の高透磁率磁性体で出来ている場合、それぞれの磁極面が等磁位面になるので、中間磁極間では磁場分布は一様になる (Fig. 3参照)。

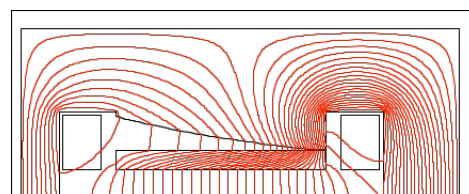


Fig. 3 A magnet with inter-pole made of bulk iron.

これは中間磁極表面が等磁位面にならないようにすればよく、水平方向の透磁率を下げ、一方、鉛直方向には磁気抵抗を下げるため透磁率が高い異方性素材を使えば解決できる。具体的には磁性体の板（珪素鋼板など）を隙間を空けて重ねていけばよい (Fig. 4参照)。面に法線方向の等価透磁率 $\mu_e$ は packing factorを $p$ 、磁性体の透磁率 $\mu_n$ を十分大きいとして、 $\mu_e = 1/(1-p)$ と書ける。 $p=0.667$ のとき $\mu_e$ は3となり、他の2方向の透磁率は大きく保たれる。これを使うと磁場分布はFig. 5のようになる。中間磁

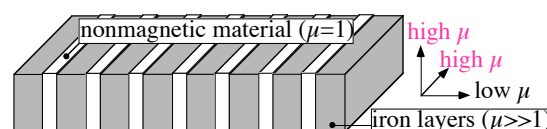


Fig. 4 Composed anisotropic material.

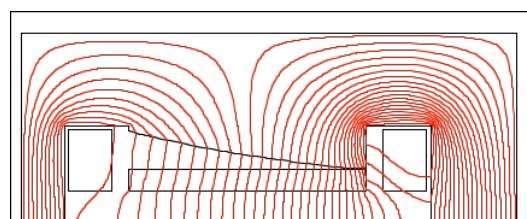


Fig. 5 Flux plot of a magnet with a set of inter-poles made of anisotropic magnet material that has low permeability ( $\mu \sim 3$ ) in horizontal direction.

<sup>1</sup> E-mail: iwashita@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

極の水平方向透磁率は1より大きいため、元のFig. 1に示す形状のものよりは磁場勾配は若干小さくなる。またこの複合材料の欠点としてpacking factorが低いことによる飽和磁束密度の低下が挙げられる。

### 磁石の実効長

中間磁極を使った場合の磁石の実効長の磁場強度依存性を比較するため、Fig. 6の様な二次元の体系で磁場分布を計算を行った。磁極間隔が 20,40cmに等価な中間磁極を持った形状(左図、G40及びG20)と持たない形状(右図、G40C及びG20C)を比較している。Fig. 7にそれぞれの場合の磁場強度と等価ギャップ間隔が違うもの同士との比の分布を示す。磁極端近傍のため、比は2倍よりも大きくなっている。中間磁極を使った場合の磁場の比(G20/G40)は通常のそれ(G20C/G40C)と比べて、広い範囲で一定になるのがわかる。それぞれの磁石の実効長比を以下のように計算すると中間磁極を使ったものは磁場の強度にかかわらずその比が1に極めて近く保たれることがわかる。

$$\frac{\int B_z^{40C} ds}{B_z^{40C} @ \max} \bigg/ \frac{\int B_z^{20C} ds}{B_z^{20C} @ \max} = 0.971,$$

$$\frac{\int B_z^{40} ds}{B_z^{40} @ \max} \bigg/ \frac{\int B_z^{20} ds}{B_z^{20} @ \max} = 1.003.$$

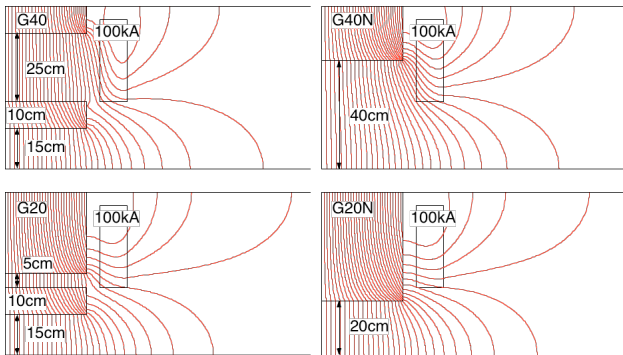


Fig. 6 Magnet configurations to evaluate the effective lengths: the magnets with inter-poles (left) and the conventional ones (right). The upper and bottom figures represent weaker and stronger configurations, respectively.

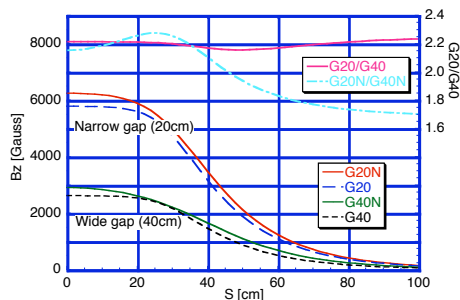


Fig. 7 The magnetic field distributions of large and small gapped magnets. When the inter-poles are used the ratio is kept fairly constant until the absolute values become less significant.

### ポール形状とトリムコイル

前述したように磁場の傾斜方向の等価透磁率 $\mu_e$ は低いと言っても1ではない。例えば $\mu_e=3$ の時、高さ10cmの中間磁極は高さ(上下)方向の磁場変化に対してはおおよそ30cm相当の間隔が空いていることに相当する。そのため、少々の磁場のアパレは中間磁極間では見えなくなることになり、一種のローパスフィルターのように振る舞う。このため、主磁極の磁極表面の加工精度はかなり緩和される。Fig. 8は極端な例として $n=3.5$ となる磁場分布を近似するように磁極形状を階段形状で最適化したものであるが、これでも中心軌道面上では磁場のずれとして千分の一程度のふらつきに収まっている(Fig. 9参照)。局所的な磁場勾配としては $n=3.5 \pm 0.1$ 程度に収まっている。Fig. 8ではさらに傾きを調整するために主コイルの割程度の電流を流す4つのトリムコイルが示してある。これらの位置と各電流は、まず電流を左右対称にして計六つのパラメータで $n=4.5$ を出すように最適化し、さらに、これらのコイル位置を用いて $n=2.5$ になるよう、トリムコイルの電流を四つ独立に変えて最適化した(電源は4セット必要)。一般にトリムコイルの位置が軌道面に近いとその局所的な影響により磁場やその傾きに凹凸が出やすいが、先に述べた理由によりこの影響も軽減されている。

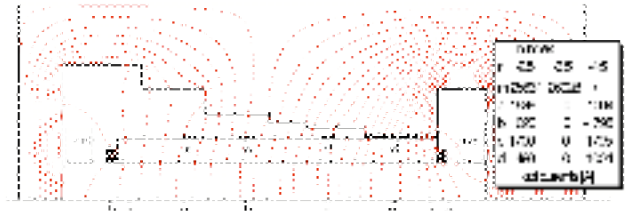


Fig. 8 A magnet with inter-pole that has stepwise approximated iron surface. This example has also trim coils to change the field index. After the step pole shape was optimized for  $n=3.5$  without trim coils, the positions of four coils together with the currents of the two groups are adjusted to raise the gradient to  $n=4.5$ . Finally, all six currents are adjusted to flatten it to  $n=2.5$ .

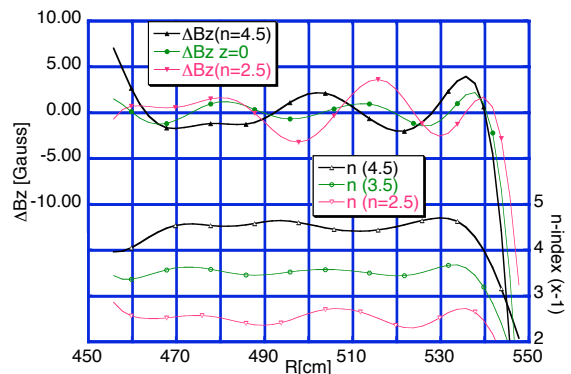


Fig. 9 Field distributions with currents on trim coils. The field index is raised to 4.5 or reduced down to 2.5 from the original value 3.5.

## 単方向高透磁率材

板状の磁性体を積層した複合材では透磁率が高いのは二方向となるが、磁束が通るには一方向だけに高透磁率があれば十分である。これにはFig. 10のように非磁性の格子の間に磁性体を埋め込んだものを組み上げれば構成できる。これを用いると不要な方向に磁束が流れないように出来、フリンジフィールドの絶対値も抑さえ込むことが出来る。

これを評価するため、Fig. 11のような体系を使った。ここで、ビーム軌道は図の水平方向を想定して、磁場勾配はあるとしても紙面の法線方向であり、左の体系はFig. 6のものと同じである。中央は中間磁極を全て異方性としたもので、単方向高透磁率材を用いれば紙面方向にも勾配を持たすことができる。この場合、磁場分布はフリンジフィールドは下がっているものの、中間磁極の表面が等磁位面にならないため、磁石内部での一様性が損なわれる (Fig. 12参照)。そこで端部だけ異方性にしたものが右図である。内部での一様性およびフリンジフィールドの低減が確認できる。

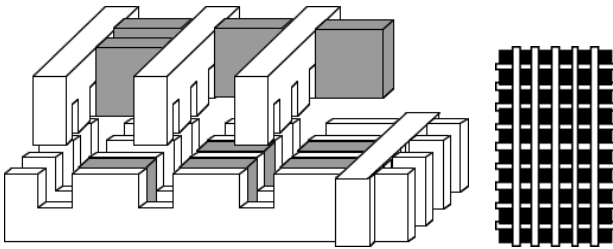


Fig. 10 One directional high  $\mu$  material can be composed from magnetic material inserted in nonmagnetic separators. Left figure shows top view.

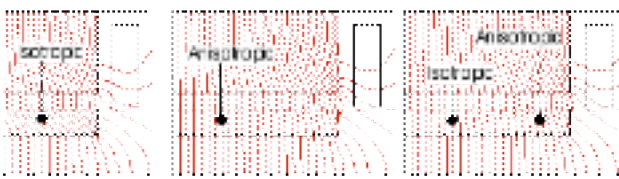


Fig. 11 Geometries to compare absolute values of the fringing field, which show the effects of the anisotropies.

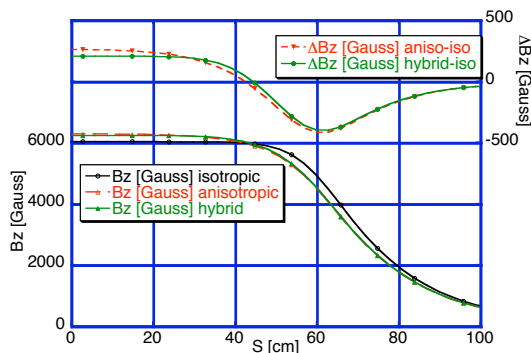


Fig. 12 Fringing fields with different anisotropies. Magnified differences from the isotropic (in the paper plane) inter-pole are also shown.

## 高磁場対応

packing factorが低いと磁気飽和が無視できなくなり、高磁場が必要な場合には欠点となる。しかし一般に磁場が最大になる部分は勾配も小さいので、packing factorを場所の関数とし、磁束密度が大きく勾配の小さくなる部分のpacking factorをあげるか、いっそのことバルクのものに替えることにより改善できる。Fig. 13はギャップ間隔が $n=3.5$ に対応するようなポール形状にしておき、中間磁極の特性を段階的に変えたものである。飽和の影響を見るため、発生磁場を高め取っている。等価透磁率 $\mu_e$ が1より大きいため、実質の $n$ 値は $\sim 3.2$ 程度になっている (Fig. 14参照)。右側の磁場の高い領域では端部である影響が大きい、すべて均一な素材で中間磁極を構成したものと比べると飽和の影響が見え、改善されているのが判る。

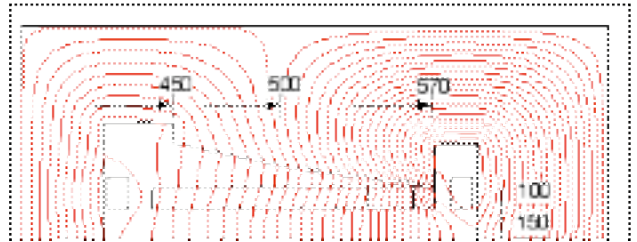


Fig. 13 The packing factor is increased towards the right edge to hold higher magnetic flux density. The  $\mu_e$ 's of the parts of the inter-pole are 3, 5 and 10, from left to right. The corresponding packing factors are 0.677, 0.2 and 0.9, respectively.

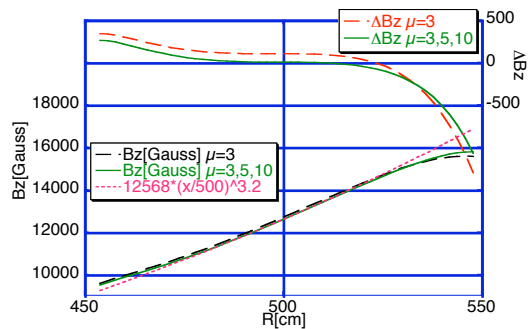


Fig. 14 Magnetic field distributions and their deviations from a power function.

## 参考文献

- [1] Morita A, Iwashita Y, Noda A, et al. Design and measurement of a combined function magnet intended for a cancer therapy accelerator, PHYS REV SPEC TOP-AC 4 (12): art. no. 122401 Part 2 DEC 2001,
- [2] Morita A, et al.: A Compact Proton Synchrotron With Combined-Function Lattice Dedicated For Cancer Therapy, Proc of the 1999 Particle Accelerator Conference, 2528-2530 (1999)
- [3] A. Sato: The PRISM Project at the High-Intensity Proton Machine Project, Nucl.Phys.A721:1083-1086, 2003