

DEVELOPMENT OF COMPACT HYBRID SEXTUPOLE MAGNET FOR CHROMATICITY CORRECTION IN THE STB RING AT LNS

T. Tanaka^{1,A)}, A. Miyamoto^{A)}, F. Hinode^{A)}, K. Shinto^{A)}, N. Matsumoto^{B)}, N. Suzuki^{C)}, H. Hama^{A)}

^{A)} Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University
1-2-1 Mikamine, Taihaku-ku, Sendai, Japan 982-0826

^{B)} TOKIN MACHINERY CORPORATION
6-7-1 Koriyama, Taihaku-ku, Sendai, 982-8510

^{C)} NEC TOKIN Corporation
6-7-1 Koriyama, Taihaku-ku, Sendai, 982-8510

Abstract

Compact Hybrid Sextupole (CHS) magnet has been developed to correct the chromaticity of the STretcher-Booster (STB) ring at Laboratory of Nuclear Science (LNS), Tohoku University. The CHS magnet is designed using a 3-D magnetic field solver RADIA. A prototype of the CHS magnet is fabricated and the magnetic field is measured. Result of the measurement is in good agreement with that of the calculation. By changing the coil current of the poles or back-leg of the CHS magnet, the sextupole field component is able to be varied keeping the dipole component at zero.

核理研STBリングのクロマティシティ補正のための 小型ハイブリッド6極磁石の開発

1. 序

東北大核理研の電子シンクロトロンSTBリング [1]には空間的余裕が無く、クロマティシティ補正用の6極電磁石を設置することが難しい。またエネルギー分散部でのベータ関数が非常に小さいので、強い6極磁石が必要となる。そこで、小型でありながらも強力な6極磁場を発生できる、永久磁石を用いたCompact Hybrid Sextupole (CHS) magnetを考案し設計と製作を行った。設計段階では2次元と3次元のそれぞれの磁場計算コードPOISSONとRADIA [2]による磁場計算を行い、CHSの形状を決定した。設計を元にCHSのプロトタイプを製作し、磁場測定をして、6極磁石としての性能評価を行った。

2. CHSの設置場所と必要な強さ

STBリングの1セルのラティス関数と6極磁石の設置可能な場所を図1に示す。図1で示した6極磁石設置可能領域ではベータ関数が水平、垂直方向ともに非常に小さい。6極磁石の磁極長は実際に設置可能な長さを考えて50 mmとする。合計4箇所のエネルギー分散部に6極磁石を設置して、200 MeVのビームのクロマティシティを0に補正する場合の6極磁場の必要な強さと設置場所でのラティス関数を表1に示す。表1のように、必要な6極磁場は非常に強いことが分かる。

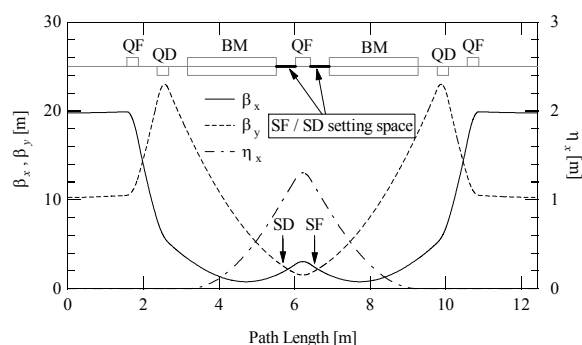


図1：STBリング1セルのラティスと6極磁石設置可能領域

表1：必要な6極磁場の強さ @ 200 MeV

磁石	強さ [T/m ²]	$\beta_{x,y}$ [m]	η_x [m]
SF	308.93	(2.4, 2.0)	1.2
SD	-357.57	(1.9, 2.6)	1.0

3. CHS magnet

3.1 CHSの設計

2極磁場を周期的に並べたウィグラー磁石のビーム軸に沿った鉛直方向の磁場分布は三角関数で近似できる。ウィグラー磁石の1周期分の磁石を図2の左図のようにビーム軸方向ではなく水平方向に配置すると、(x, z)面内の原点近傍で鉛直磁場成分 $B_z(x, z)$

¹ E-mail: takumi@lns.tohoku.ac.jp

の水平方向の分布 $B_z(x, 0)$ を2次関数に近似できる。これは余弦関数を原点近傍でテイラー展開した式を考えれば明らかである。

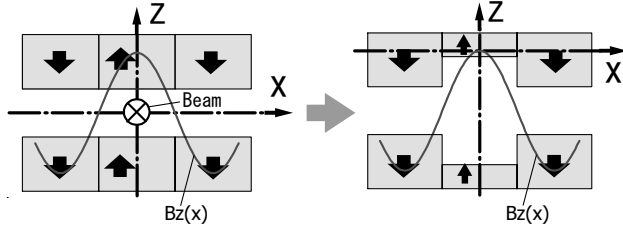


図2：ウィグラー磁石の1周期の磁場分布とその応用例

図2の右図のように中央の2極磁石の磁場強度を小さくすると、磁場分布： $B_z(x, 0)$ は鉛直方向に近似的に平行移動すると予想される。実際にPOISSONで図2の磁場を計算すると確かに予想通りの傾向を示した。以上の磁場の性質を考慮すると、図2の原点近傍での磁場分布 $B_z(x, 0)$ は6極磁場として利用できる可能性がある。実際に磁場計算を行った結果では原点近傍の磁場 $B_z(x, 0)$ は強力な6極磁場成分を持つことが分かった。

以上のことから、STBリングに必要な強さの6極磁場も生成できる可能性があることが分かったので、実際に設置可能な6極磁石：CHSの設計を行った。設計では、2次元磁場計算コード：POISSONで各部分の長さや形状を決定してから3次元磁場計算コード：RADIAで調整を行った。磁極長は50 mmと短いので、ビーム軸方向への漏れ磁場の影響を十分注意した。永久磁石にはSm-Coを採用し、減磁を抑えるために上下から鉄磁極で挟み込んだ。リターンヨークを付けて磁気回路上の磁気抵抗を下げることによって、6極磁場をより強力なものにした。形状を単純にするために各部分は全て直方体の形状で構成した。磁極をビームダクトに出来る限り近づけられるように磁極間幅を調整した。6極磁場の有効磁場領域はCHS設置場所のエネルギー分散関数の大きさが約1 mであることを考慮してエネルギー誤差 $\pm 2\%$ の粒子を許容できるように、半径20 mmを目標値とした。CHSのプロトタイプとして最終的に設計した磁石の断面形状と計算結果の鉛直方向の磁場分布を図3に示す。

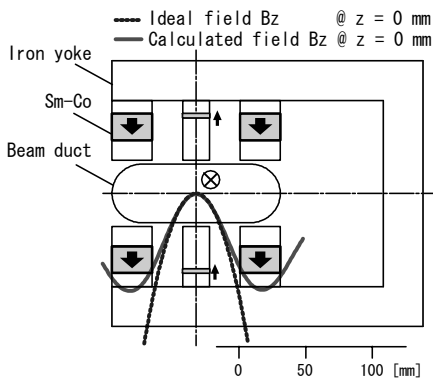


図3：CHSの断面と磁場分布

CHSに使用する永久磁石の強さに誤差がある場合、主に2極磁場成分に影響を与えることが磁場計算結果から分かった。2極成分はCODを生じさせるので、補正できるようにリターンヨークにバックレグコイルを巻いた。さらに、6極磁場成分の大きさも変化させられるように、4つの磁極に磁極コイルを巻いた。ただし、コイルを巻いたCHSがSTBリングに設置できるように巻き数を調整した。コイルを巻いたときのCHSの形状を図4に示す。

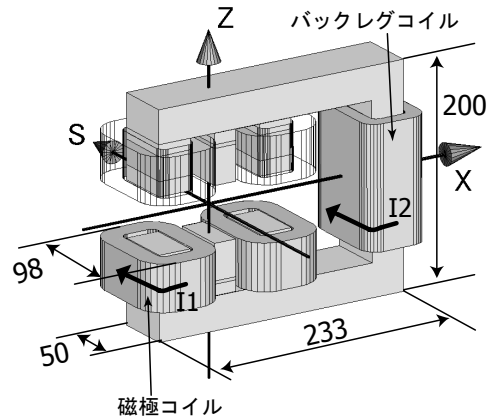


図4：2種類のコイルを巻いたCHSの概観

3.2 CHSの磁場測定

実際にCHSのプロトタイプを製作し磁場測定を行った。測定方法はホール素子を用いて図4の $z = 0$ の平面内の磁場分布 $B_z(x, s, z = 0)$ と $B_x(x, s, z = 0)$ を測定した。測定範囲は $-20 \leq x \leq +20$ mm、 $-300 \leq s \leq +300$ mmとした。コイルの電流設定に関しては3種類の測定を行った。まず、2種類のコイル電流を0 Aで測定、次に磁極コイルのみを通电して測定、最後にバックレグコイルのみを通电して測定した。コイル電流0 Aで測定した磁場分布 $B_z(x, s, z = 0)$ をビーム軸方向に積分し、x軸上の積分磁場分布としてプロットしたものを図5に示す。図5にはRADIAでの磁場計算結果もプロットした。磁場分布 $B_x(x)$ の測定はCHSには存在しないskew磁場成分の大きさを確認するための測定であり、測定誤差の範囲で存在しなかったため以降では扱わない。

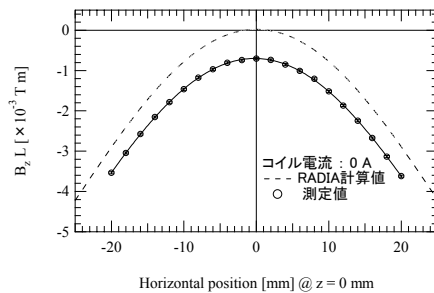


図5：ビーム軸方向に積分した磁場分布 $B_z(x)$

図5の測定結果と磁場計算結果を比較すると実際に製作したCHSは原点での磁場が0でないで2極成分が存在することが分かる。図5の結果から磁場の多極成分を以下の式を用いて導出する。

$$B_z(x, s, z = 0) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{(n-1)!} x^{n-1} \quad (1)$$

(1)式の係数 a_n はある点 s における (x, z) 面内での $2n$ 極磁場のnormal成分を表す係数である。CHSには高い次数の磁場成分はほとんど含まれないと仮定して、(1)式の4次までの多項式で図5の磁場分布をあてはめることで2極から10極までの磁場成分を求めた。4極成分は小さいので無視し、8極、10極成分についても考えないことにする。求めた2極、6極成分の大きさを表2に示す。

表2: CHSの磁場成分: ビーム軸方向積分値
@ コイル電流0 A

	2極 [T・m]	6極 [T/m ² ・m]
設計値	2.3×10^{-5}	16.45
測定値	7.67×10^{-4} $\pm 0.11 \times 10^{-4}$	15.98 ± 0.31

表2のように6極磁場は設計値と測定値で約3%の誤差で一致したが、2極磁場の測定値は設計値と大きく異なっていることが分かる。

磁極コイルとバックレグコイルを励磁したときの電流と2極、6極磁場成分の関係を測定した結果をそれぞれ図6(a-1), (a-2), (b-1), (b-2)に示す。

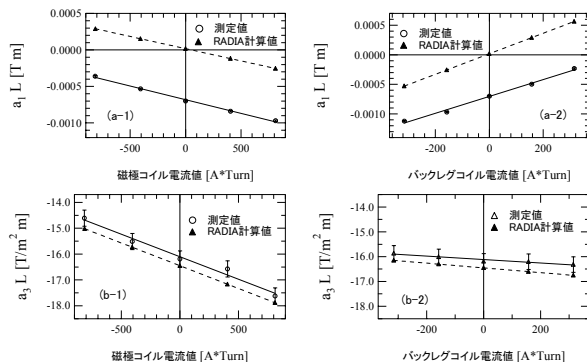


図6: 各種コイル電流と2、6極磁場の関係

図6から、各種コイルの電流と2極、6極磁場成分は線形の関係にあることが分かる。この関係を利用して、2極成分を打ち消しながら6極磁場の大きさを変化させることができる。磁極コイルの温度が上昇して永久磁石が減磁しない範囲として50℃以下で動作させるときに、磁極コイルの最大電流密度は約2 A/mm²となる。このときに、2種類のコイルを用いて2極、6極磁場がどの程度変化させられるかを図7に示す。

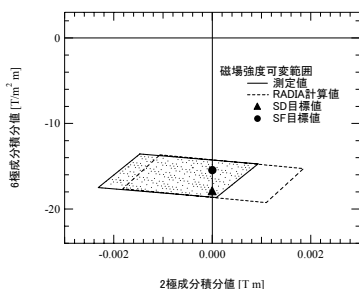


図7: 2極、6極磁場の可変範囲

図7より6極成分の可変範囲は設計値とほぼ一致していることが分かる。2極成分は設計値と大きく異なっているが、コイルを励磁することで打ち消すことができる。6極成分の可変範囲は $-18.6 \sim -14.3 \pm 0.3$ T/m²・mとなっており、中心値に対して約26%の全幅であることが分かった。この可変範囲は表1のSF, SDの強さを1種類のCHSで発生させることを可能にする大きさである。

CHSをSDの強さに設定した時の6極磁場成分のビーム軸方向に沿った分布を図8に示す。

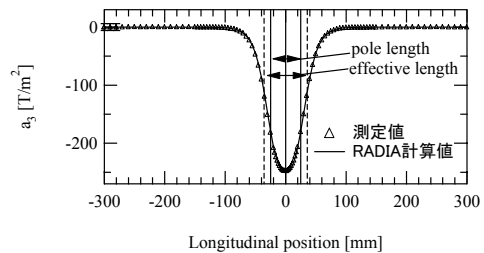


図8: CHSの6極磁場成分のビーム軸方向の分布

図8において、CHSの6極磁場の有効長は測定値が 72 ± 2 mm、設計値が71.5 mmとなっており、測定誤差の範囲で一致している。また、各測定点の6極磁場の大きさも3次元磁場計算と測定は誤差範囲で一致している。

磁場の有効領域に関しては測定した磁場分布から理想的な6極磁場分布を引いたときに残る磁場強度が原点から15 mm以内では 1.5×10^{-4} T・m以下で、目標とした20 mmの範囲では 5.0×10^{-4} T・m以下となった。発生するCODの大きさを考慮すると有効磁場領域は原点から約15 mm以内と考えられる。

6. まとめ

STBリングに設置可能な小型で強力な6極磁石としてCHSの設計とプロトタイプを製作し、その磁場測定を行った。磁場測定の結果から、6極磁場のビーム軸方向の分布と積分磁場強度は設計値と測定誤差の範囲内でほぼ一致している。一方で2極磁場成分は設計値と大きく異なる結果となり、この原因を調査することは今後の課題である。しかし、2極磁場は2種類のコイルを用いて打ち消すことができる。6極磁場を変化させた場合、目標のSDとSFの両方の強さに設定できることが分かった。

参考文献

- [1] H. Hama et. al., Proceedings of the 18th International Conference on High Energy Accelerators, Tsukuba, Japan, 2001
- [2] P. Elleaume et. al., Proceedings of 1997 Particle Accelerator Conference, Vancouver, B.C., Canada, May 12-16, 1997, pp.3509-35