

核理研 STB リングのための小型ハイブリッド 6 極磁石の設計

田中拓海^{A)}、宮本 篤^{A)}、日出富士雄^{A)}、神藤勝啓^{A)}、
浜 広幸^{A)}、松本教之^{B)}、鈴木紀善^{C)}

^{A)} 東北大学大学院理学研究科附属原子核理学研究施設 〒982-0826 宮城県仙台市太白区三神峯 1-2-1

^{B)} (株) トーキンマシナリー 〒982-8510 宮城県仙台市太白区郡山 6-7-1

^{C)} NEC トーキン (株) 〒982-8510 宮城県仙台市太白区郡山 6-7-1

概要

東北大学理学研究科附属原子核理学研究施設 (核理研) の電子シンクロトロン (STB リング) には 6 極電磁石が設置されていないために、クロマチシティの補正が出来ない。STB リングではエネルギー分散部のベータ関数が小さいため、クロマチシティを補正するには強力な 6 極磁石を設置する必要があるが、6 極磁石設置のための空間的余裕が存在しない。

そこで、永久磁石を用いた強力な小型ハイブリッド 6 極磁石を考案し、3 次元磁場計算コード RADIA を用いて、必要な磁場を生成する 6 極磁石を設計した。この 6 極磁石の磁場特性と STB リングへの設置によるビームへの影響を調べた。

1 序

STB リング[1]には入射電子ビームを最大 1.2 GeV まで加速して蓄積する蓄積モードの運転がある。しかし、クロマチシティ補正用の 6 極電磁石が設置されていないのでビームのエネルギー広がり依存したベータatronチューンシフトが起こり、共鳴条件を満たしたビームは損失する。エネルギー分散部のベータ関数は小さく、6 極磁石を設置できる空間もほとんど無い。必要とする 6 極磁場の強さは第 3 世代放射光リングで用いられるほどの強いものとなることが分かっている。

STB リングの蓄積モードに関する主なパラメータを表 1 に示す。

表 1: STB リングの蓄積モードの主なパラメータ

ラティス	Chasman-Green 型
超周期数	4
周長	49.751 m
入射エネルギー	200 MeV (nominal)
最大加速エネルギー	1.2 GeV
RF 周波数	500.1 MHz
モーメントコンパクション ファクター	0.0378
ハーモニック数	83
ベータatronチューン	(3.27, 1.16)
自然クロマチシティ	(-5.79, -4.98)

2 6 極磁石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。

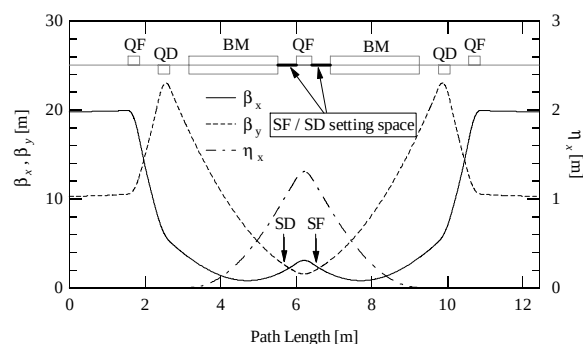


図 1: STB リング 1 セルのラティスと 6 極磁石設置可能領域

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。

具体的に 6 極磁石を設置できる場所に周囲の機器の配置も考えた上で、磁極長 50 mm の 6 極磁石を設置した状態を図 2 に示す。

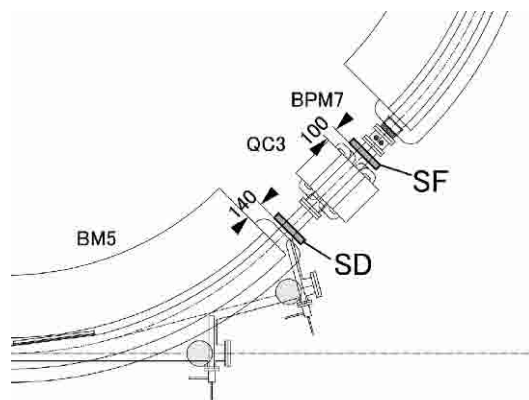


図 2: 6 極磁石の設置可能な場所

STB リングの全てのエネルギー分散部に図 2 のような 6 極磁石の SF, SD の組を設置して、合計 4 組の 6 極磁石を用いてクロマチシティを補正する。

STB リングで、ビームエネルギー 200 MeV の蓄積モード運転を行うとき、クロマチシティを 0 に補正するために必要な 6 極磁場の強さを計算した結果、及び 6 極磁石設置場所でのラティス関数を表 2 に示す。

表 2 : 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

表 2 のように、STB リングで必要な 6 極磁場は非常に強いことが分かる。

3 小型ハイブリッド 6 極磁石

3.1 小型ハイブリッド 6 極磁石の設計

STB リングに通常の形状の 6 極電磁石を設置するには設置場所の真空ダクトの形状がレーストラック型なので、ボア径が大きなものが必要となる。その上、必要な磁場を発生する強力な 6 極電磁石を設置できる空間的余裕はない。そこで、小さくて強力な永久磁石を利用して小型ハイブリッド 6 極磁石 Compact Hybrid Sextupole (CHS) magnet を設計することを考案した。

永久磁石を用いた磁石でよく用いられるドーナツ型の形状はダクト形状を考慮すると磁石が大きくなるので採用できない。6 極磁場の強さを確保するためにボア径を定義できる形状ではなく 2 極磁石の磁場の重ね合わせで 6 極磁場を近似的に再現するように 6 つの永久磁石を用いた。永久磁石は SmCo を採用した。永久磁石の減磁を抑えるために、上下に鉄磁極を挟み込み、直方体の組み合わせとなる磁極形状にした。磁極先端をレーストラック型のダクトにできるだけ近付けてダクトを挟むような形状にした。このような磁極から生成する磁場の等ポテンシャル面を導出するのは困難なので、鉄ヨーク中の磁場が飽和しないような大きさを確保しながら 2 極、6 極磁場成分が磁極形状の変化によってどのように変化するかを 3 次元磁場計算コード RADIA [2] を用いて調べて、主な形状パラメータを反復法で最適化させて必要な 6 極磁場を生成する形状を決定した。6 極磁場の有効磁場領域についてはエネルギー誤差 $\pm 2\%$ の粒子を許容できるように、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半径 20 mm を目標値とした。最終的に求められた 6 極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。

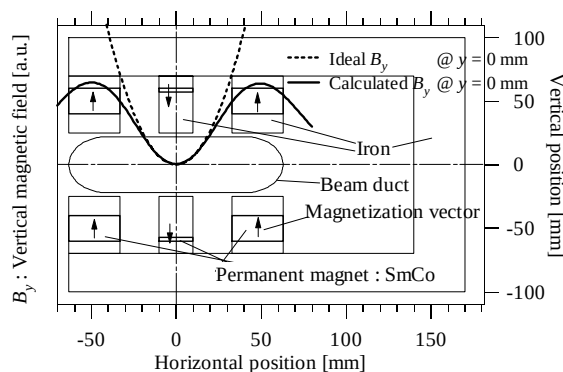


図 3 : CHS の断面と磁場分布

3.2 CHS の磁場特性

CHS は磁極長が 50 mm と短く、3 次元磁場計算で有効長を評価すると、約 70 mm であった。CHS の 6 極磁場成分のビーム軸方向に沿った分布を図 4 に示す。

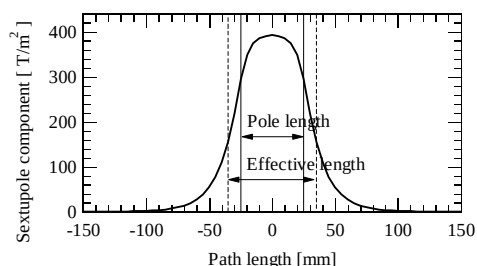


図 4 : CHS の 6 極磁場成分のビーム軸方向に沿った分布

図 4 で示したように CHS の磁極長は短いので、一定の大きさの磁場分布では無いことが分かった。これ以降の磁場特性の評価については CHS の 6 極磁場の強さを表 2 の値と比較するために、3 次元磁場計算で得られた磁場をビーム軸方向に積分して、磁極長 50 mm として平均化したものを使用する。

CHS は他の磁極成分も生じるが高次の磁極成分は 6 極成分に比べて小さい。さらに、6 極成分の大きさも変化させられるように、4 つの磁極にコイルを巻いた。6 極成分をコイルで変化させると 2 極成分が発生する。2 極成分はビームの 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。コイルを巻いた 6 極磁石の形状を図 5 に示す。

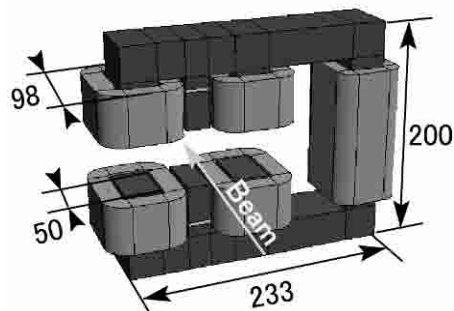


図 5 : CHS の外観

図 5 で示した CHS の設計形状は STB リングへの設置を可能にするような大きさである。コイルに電流を流したとき、各磁場成分がどのように変化するかを調べた。4 つの磁極に巻いたコイルの電流を変化させたとき、バックレグコイルの電流を変化させたときの 2 極、6 極磁場成分の変化の様子をそれぞれ図 6 (a), (b) に示す。

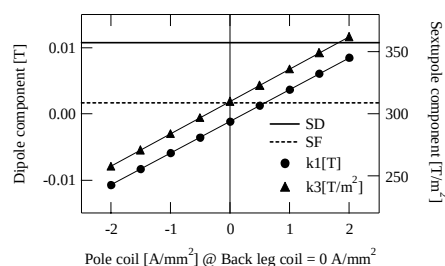


図 6 (a) : 磁極コイルの電流密度と 2 極、6 極成分の大きさの関係

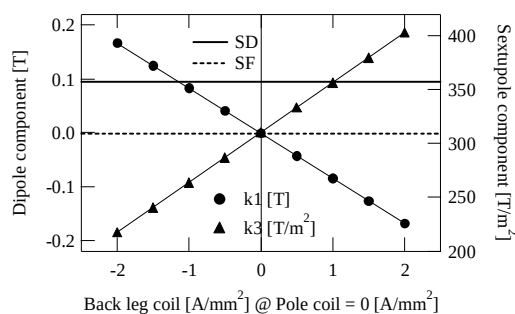


図 6 (b) : バックレグコイルの電流密度と 2 極、6 極成分の大きさの関係

図 6 (a), (b) から、各種コイルの電流の変化と 2 極、6 極磁場成分の変化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 極成分を発生させずに 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最大 2 A/mm^2 の電流を磁極コイルに流すことができるとしたとき、6 極成分の可変範囲は全幅で約 35% となることが分かった。この可変範囲は表 2 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 の有効磁場領域近傍での 6 極磁場の誤差を調べるために表 2 の SD の強さになるような各コイルの電流密度を求めて、その時の 3 次元磁場計算で得られた磁場分布と理想的な 6 極磁場との差を図 7 に示す。

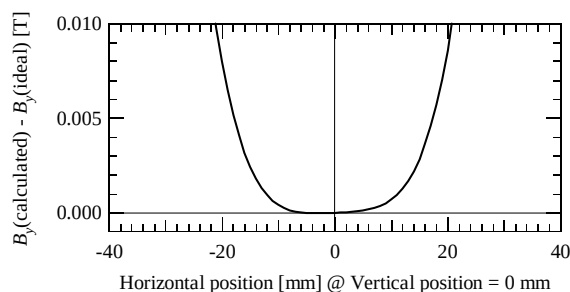


図 7 : CHS の有効磁場領域近傍での誤差磁場

図 7 より、有効磁場領域の大きさは磁場中心から 10 mm の範囲で 1 mT 以下となっており、15 mm の範囲で 3 mT 以下、目標とした 20 mm の範囲では 10 mT 以下となった。

4 CHS 設置によるビームへの影響

CHS が STB リングに設置された時に周回するビームに与える影響として 2 極成分の誤差磁場から生じる COD を見積もる。CHS の製作誤差、磁場測定誤差、磁極コイルとバックレグコイルの電流設定誤差が原因で生じる 2 極成分の中で磁場測定誤差が最も大きな誤差源だと仮定して COD に与える影響を見積もった。磁場測定の誤差は位置精度と絶対値精度を考慮して約 1 mT とする。各 CHS に独立な 2 極成分の誤差磁場を 1 mT をガウス分布の 1σ として正規乱数で与えて COD を多数回計算した結果、生じた COD は最大 $(x, y) = (1.0, 1.5) \text{ mm}$ と小さかった。そこで、誤差磁場を 3 mT として同様の計算を行った。それらの結果の一例を図 8 に示す。

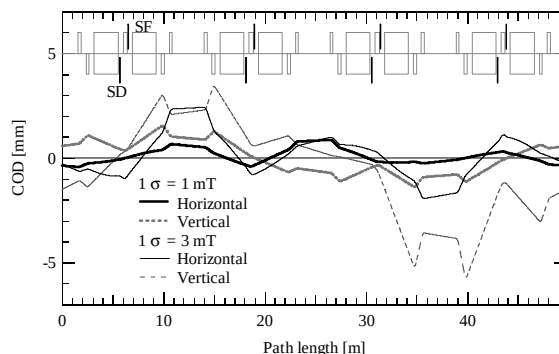


図 8 : CHS の 2 極誤差磁場から生じる COD

計算では COD は誤差磁場が 1 mT のとき最大 $(x, y) = (1.0, 1.5) \text{ mm}$ と小さく、3 mT のとき最大 $(x, y) = (2.5, 5.0) \text{ mm}$ となった。STB リングの力学的口径を考慮するとビーム損失が起きるほどの大きさの COD は生じることはないと考えられる。

5 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 の設計を行い、強さと設置条件の大きさを満たすものとなった。CHS に巻いたコイル電流を変化させることで、6 極磁場の大きさを変化させられることが分かり、電流による発熱の問題が無ければ、今回設計した CHS は STB リングに必要な SF, SD の強さを 1 種類の形状で発生させられることが分かった。

有効磁場領域での誤差磁場の大きさについては中心から 10 mm の範囲で 1 mT 以下となった。CHS 設置場所では 2 極成分の誤差磁場で生じる COD は小さいことが分かったので、CHS を通過するビームが有効磁場領域から外れるということは無いと考えられる。

今後は設計した CHS の製作を行い、その磁場特性を測定して、設計段階の計算と比較をする。そして、STB リングに設置して、クロマチシティの補正を行い、CHS 設置の効果を評価する予定である。

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.3509-3511