

永久磁石を用いた高磁場発生用セプタムマグネット

川久保 忠通^{A)}、中村 英滋^{A)}、青木 雅昭^{B)}、杉山 英二^{B)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

^{B)} 住友特殊金属株式会社 〒618-0013 大阪府三島郡島本町江川 2-15-17

概要

大強度加速器ではビームの形状もエネルギーも大きいので入射・取り出しに使用するセプタムマグネットのコイル電流は大きくなる。このコイルに直流電流を流せば、コイルの保持は困難でないがジュール熱による発熱が大きくなり冷却が大変である。パルス電流を流すと冷却は楽になるがコイルの支持が難しくなってくる。そこでもしこのマグネットが永久磁石で製作出来るなら、コイル板の固定と冷却という難問題が一挙に解決する。今回、実スケールの1/4モデルを試作して各部磁場の測定と計算機による値の比較を行った。このマグネットに使用する永久磁石の起磁力が放射線照射によって劣化しない事が確認出来れば実際の加速器に設置可能である。

1 永久磁石型セプタムマグネット製作上の問題点

(1) ハルバッハ型

この永久磁石型セプタムマグネットを製作するに当たり、最も順当な考えは磁化方向の異なった複数の永久磁石ユニットで構成されている左右対称なウィンドフレーム型のステアリングマグネット（以後「ハルバッハ型」と呼ぶ）を作る事であろう。（図1）に大強度加速器で使用するサイズに準じた例を示す。永久磁石内の太矢印は磁化の方向を示す。この場合、コアギャップ内部には強力な平坦な磁場を発生し、外部への磁場漏れはコアから少し離れた位置に鉄板を置いて遮蔽する。このマグネットの短所は通常のセプタムコイルに該当する場所にコアのヨークと磁場漏れを防ぐ鉄板が来るので等価的セプタム厚みが通常のセプタム部よりずっと厚くなってしまふ事である。

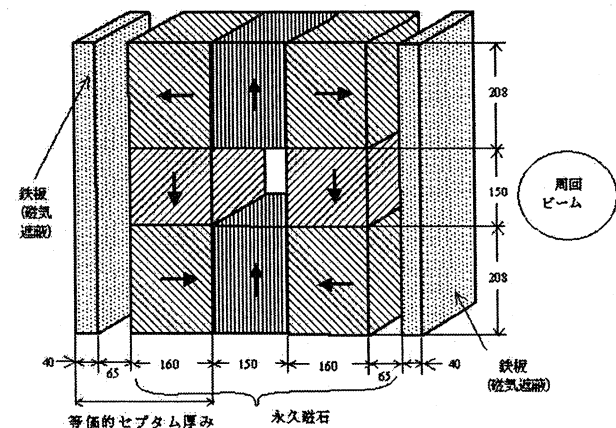


図1：ハルバッハ型セプタムマグネット外観 [単位：mm]

セプタムマグネットを引出ラインに何台も配置する場合、上流に配置したセプタムマグネットは周回ビームと引出ビームの間隔が狭いので上記のハルバッハ型は使用できないが、下流では両者のビーム間隔が広がるので使用出来る可能性がある。しかしこのマグネットには非常に本質的な短所がある。それはセプタム部（ヨーク部）に永久磁石ユニットが組み込まれている事である。このマグネットを真空チェンバー中に設置した場合はビームが直接セプタム部に衝突する可能性が強いし、真空ダクトの外側に設置した場合はダクトに衝突したビームによって生成された二次放射線がセプタムに照射される。これらの放射線照射を受けた永久磁石は起磁力低下の可能性があり、[1]

(2) C型

この短所を解決し、且つ、セプタム部の厚さを出来る限り減少させる為に、（図2）のように磁化方向の異なった複数のユニットで構成されているC型のヨークを製作し（以後「C型」と呼ぶ）、外部への磁場漏れを防ぐ為にセプタム部に鉄板を設置した。この場合左右が非対称であるのでヨークギャップ内の磁場分布の均一性が無くなり、これを解決する為にギャップの上下対称に鉄製のシムを入れる必要が生じる。

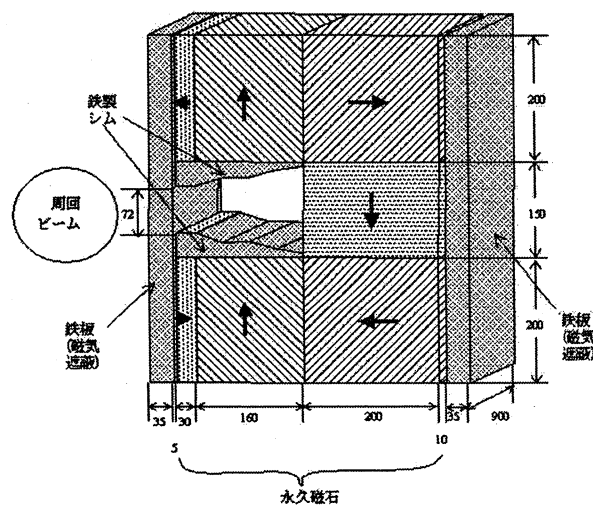


図2：C型セプタムマグネット外観 [単位：mm]

このマグネットの、ハルバッハ型と比較した時の短所と長所は以下の通りである。

(短所)

内部磁場が不均一になるのでシムを入れねばならず、垂直方向のアーチャーが狭くなる。逆にこのアーチャーを広げるにはギャップ高をハルバッハ型より大きくしなくてはならず、もっと大きな起磁力を必要とする。

(長所)

セプタム部は鉄だけとなり、永久磁石はビームと同じ高さでない位置か、同じ高さでもビームからかなり離れた場所に装着される。又、セプタム部分の厚みが薄くなる。但し一見したところ、磁気遮蔽用鉄板だけがセプタム部の厚みに見えるが、実際はコアギャップ内部でのセプタム部付近の(通常セプタムマグネットと比べて)ダラダラした磁場減少部分があるので(図5のX<320の範囲)、この部分も勘定に入れると実質的なセプタム部の厚みは大きくなる。(しかし後述するようにハルバツハ型に比べればかなり薄い。)

2 磁場分布の計算と測定結果

上記のハルバツハ型とC型に於ける磁場分布の3次元計算を行った。又、C型に於いては実機の1/4モデルを作り磁場測定を行った。この測定値は完全にスケールリング出来るから計算結果と比較する為に、測定位置は全て4倍した実機相当の値を用いている。永久磁石は(住友特殊金属KK製)NEOMAX-44H, 35EH, 39SHを用いた。

(1) ハルバツハ型

B_y のX軸方向分布

(図1)の形状でコアギャップ内の水平方向をX軸、垂直方向をY軸、ビーム方向をZ軸とする。Y軸とZ軸上のコアギャップ中央部(Y=0, Z=0)に於いてコアギャップ内部とセプタム外側のY方向磁場(B_y)のX軸依存性を計算した結果をそれぞれ(図3)、(図4)に示す。但しこれらのXの位置はコアギャップ内中央を0とする。(図1)よりX=75の位置がウィンドフレーム内壁境界となり、X=340の位置が、右側の鉄磁気遮蔽板の外壁境界となる。X>340の領域は周回ビームが回るフリースペースとなる。

コアギャップ中央点(X=0)に於けるギャップ内磁場は1.42[T]であり、ギャップ幅140mm(-70<X<70)の範囲での磁場均一度は4.2%である。セプタム外(X>340)の漏れ磁場の最大値は-12[G]であり、ギャップ内磁場の0.08%である。

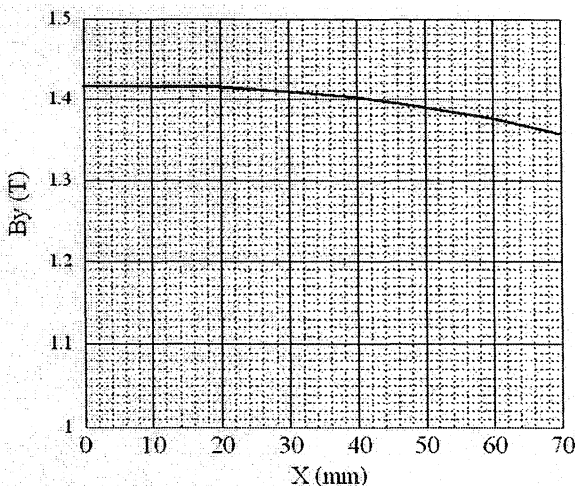
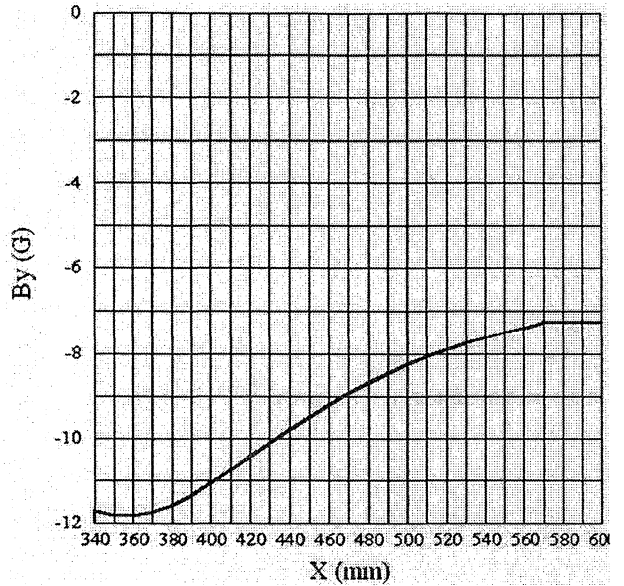


図3：コアギャップ内磁場(B_y)のX軸分布(計算値)
(Y方向, Z方向共マグネット中央部)
X=0の点：ギャップ中央位置
X=75の点：右側コアヨークとの境界



(図4)セプタム部(右側の鉄磁気遮蔽板)外側の漏れ磁場(B_y)のX軸分布
(Y方向, Z方向共マグネット中央部)
X=340の点：セプタム部との境界
X=600の点：計算したX方向の最大値

(2) C型

B_y のX軸方向分布

(図2)の形状でY軸とZ軸上のコア中央部に於いてコアギャップ内部とセプタム(左の鉄磁気遮蔽板)外側のY方向磁場(B_y)のX軸依存性を計算した結果をそれぞれ(図5)、(図6)に示す。

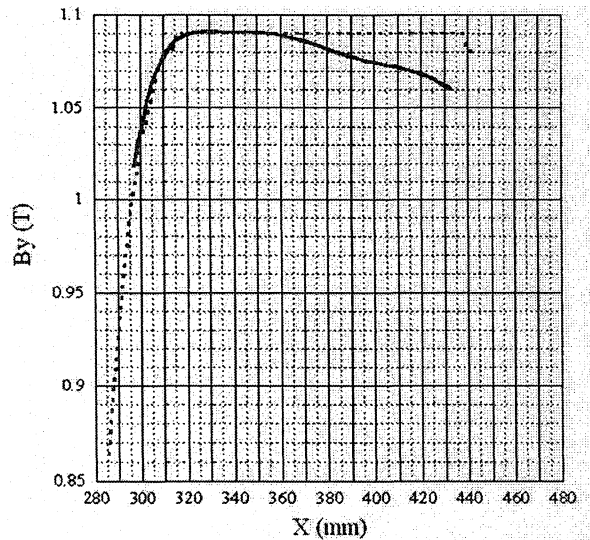


図5：コアギャップ内磁場(B_y)のX軸分布(計算値)
(Y方向, Z方向共マグネット中央部)
(実線：測定値、波線：計算値)
X=285の点：セプタム内壁との境界
(左の鉄磁気遮蔽板内側壁面)
X=480の点：コアヨーク部との境界

但し $0 < X < 250$ の領域が周回ビームが回るフリースペースであり、 $X=250$ の位置がセプタム外壁との境界 (図 2 左の鉄磁気遮蔽板外側壁面)、 $X=285$ がセプタム内壁との境界 (左の鉄磁気遮蔽板内側壁面) であり、 $285 < X < 480$ がコアギャップ内 (高磁場発生区域) である。

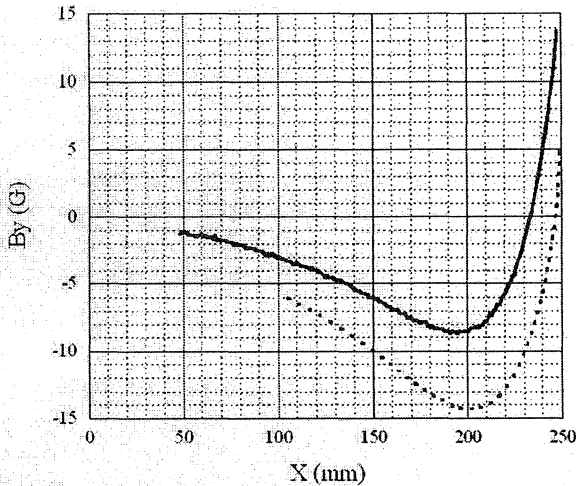


図 6: セプタム部外側の漏れ磁場(B_y) の X 軸分布 (Y 方向, Z 方向共マグネット中央部)
(実線: 測定値、波線: 計算値)
X=0 の点: 計算に用いた X 方向の最小値 (フリースペース区間の最外側)
X=250 の点: セプタム外壁との境界 (左の鉄磁気遮蔽板外側壁面)

測定値に於けるコアギャップ中央点($X=382.5$)付近でのギャップ内磁場は $1.09[\text{T}]$ であり、ギャップ幅 150mm ($305 < X < 455$) の範囲での磁場均一度は 3.7% である。セプタム部外 ($X < 250$) の漏れ磁場の最大値は $+15 [\text{G}]$ であり、ギャップ内磁場の 0.14% である。

ハルバツハ型のセプタム厚が 265mm であるのに対し (図 1 参照)、C 型の実質セプタム厚は 55mm ($=305\text{mm}-250\text{mm}$: 図 5, 6 参照) となり、非常に薄くなったと言える。

但し、この場合の垂直アパーチャーは $36\text{mm} \times 2 = 72\text{mm}$ (図 2 参照) しかなく、ハルバツハ型の 150mm に比して半減している。(但し、ビームが楕円形と仮定すると、セプタム部付近の垂直アパーチャーは小さくて済み、C 型の垂直アパーチャーは $50\text{mm} \times 2 = 100\text{mm}$ と増加する。)

(図 5) に於いて計算結果ではコアギャップ内磁場は $320 < X < 438$ の範囲で平坦であるのに対し、測定結果はヨーク付近 ($360 < X$) で急速に減少している。この原因はまだ不明であるがシムの鉄材の磁場飽和によるものかも知れない。セプタム外の漏れ磁場の計算値と測定値は良く合っているとと言える。

B_y の Z 軸方向分布

コアギャップ中央高さ ($Y=0$) の位置で、(図 2) のセプタム部 (左の鉄磁気遮蔽板内壁) からヨーク (右) 向きに水平 (X) 方向に 80mm の位置 ($X=365$: ほぼコアギャップ中央部) で Z 軸方向 (コアギャップ内中央位置が $Z=0$ 、コア端部が $Z=450$ となる) に取った磁場分布の計算結果と測定結果を (図 6) に示す。

通常の電流型マグネットのコアギャップ端部付近ではギャップ高の距離 (今の場合 150mm) 程度のギャップ内での磁場減少やギャップ外への磁場染み出しがあると考えられているが、今回の永久磁石型ではギャップ高の 3 倍 (450mm) まで及び、ギャップの中での磁場分布の平坦部が見られない。

このマグネットの実効長 (effective length) はコア長 (900mm) とほぼ等しい。

Z 軸分布の磁場計算結果と測定結果はきわめて良く一致している。

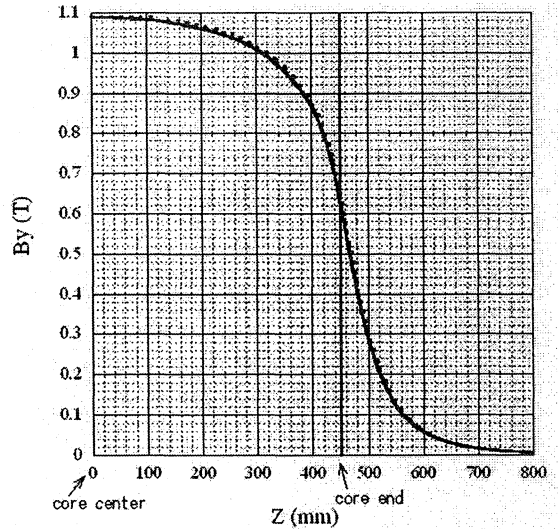


図 6: コアギャップ内磁場(B_y) の Z 軸分布 (Y 方向はギャップ高の中央, X 方向は磁気遮蔽板内側より 80mm 点でマグネットのほぼ中央部)
(実線: 測定値、波線: 計算値)
Z=0 の点: コアギャップ内中央部
Z=450 の点: コアの端部

参考文献

- [1] 川久保, 中村, 榎田, 青木, 杉山, 草野, 第 14 回加速器科学研究発表会予稿集, 「高い発生磁界を持つ永久磁石の放射線照射による劣化」

謝辞

我々に永久磁石がセプタムマグネット等の特殊マグネットに使用できる可能性を示唆されたのは KEK の高山健氏である。氏は Fermi 研究所の永久磁石型ランバートソンマグネットの図面を紹介され、今後の加速器に於いて如何に永久磁石の役割が大きくなって来るかを印象づけられた。氏の先見性のある示唆に深く感謝する。