

50 GeV 速い取り出し用両極性セプタム

新垣良次、酒井泉、富澤正人、町田慎二、森義治

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

概要

50GeV リングでは、速い取り出し用セプタム電磁石はニュートリノ実験の為にビームをリングの内側へ、アボートの為にリングの外側にけり出すことが要求される。今回考案したマグネットは一台で逆向きの磁場を発生させニュートリノ側とアボート側の両方にビームをけり出す両極性セプタムである。このセプタムの磁場計算や機械的強度計算等を行った。

1 はじめに

大強度陽子加速器 50 GeV リングでは、速い取り出しラインにおいて非常時の際加速の途中であってもビームをアボートすることが要求されている。その為、セプタムマグネットの励磁はメインリングのマグネットの立ち上がりと同期したパターン運転となる。セプタム電磁石はフェライトコアを使ったインバキューム用低磁場セプタム 4 台と高磁場セプタム 6 台の計 10 台から構成される。50 GeV リングの場合、空気の放射化を避ける為ビームはすべて真空中を通過する。今回、真空チャンバーが 3 股に分岐する所に使用されるセプタムとしてで 1 台で逆向きの磁場を発生させ取り出し側とアボート側にビームを蹴り出す両極性セプタムを考案した。以前の SM3-1 全長 2.3m のマグネットを分割して 3 台の対抗磁場セプタムにするシステム[1]と比較すると周回ビーム側の BL 積の調整が不要となる。この両極性セプタムはノーマルセプタムと比較しても周回ビーム側の漏れ磁場が小さく、電磁力はチャンバーやコアに吸収されマグネット自体の固定が容易になる。さらに真空チャンバーが上下のコアで拘束されることと力を受ける所の支点間距離が小さくなる為、そのチャンバーの撓みも小さくなる。この両極性セプタムについて有限要素法を用いた磁場解析と機械強度計算等を行った。また冷却やコイルの絶縁方法についても述べる。

2 セプタムマグネットの構成

図 1 に速い取り出し用セプタム電磁石の配置図を示す。電源は低磁場セプタム SM1 (2 台) SM2 (2 台) の 4 台が一つに、両極性セプタム SM30、ノーマルセプタム 6 台で合計 3 台の電源で励磁する。運転は立ち上がり 1.9 秒、フラットトップ 0.1 秒、立下り 0.8 秒、繰り返しは 3.64 秒である。当面はビームを 40GeV まで加速して取り出し実験に使われる。その後次期計画として 50GeV ビームを取り出す予定である。セプタムマグネットの緒言を表 1 に示す。MAD プログラムによるビームオプティクスの計算を行い決められた値である。リングの出口 (QFP0 磁極入り口) ではビームの位置と角度はそれぞれ $x=548.273\text{mm}$, $x_p=77.299\text{mrad}$ に固定した上で、エネルギーが 50 GeV、40 GeV、3 GeV のビームに対してセプタムに当たらないようにパラメータが決められた。

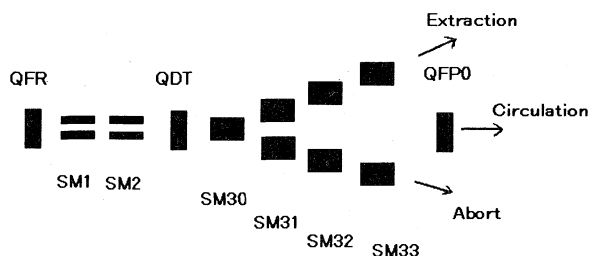


図 1：セプタム電磁石の配置図

表 1：セプタムマグネットの緒元

	セプタム厚 (mm)	マグネット長 (m)	Kick アングル (mrad)	磁場 (T)
SM1	5	2	4.4	0.374
SM2	5	2	4.4	0.374
SM30	30	1.225	9.93	1.38
SM31	40	1.66	16.3	1.66
SM32	>30	1.9	18.6	1.66
SM33	>30	1.9	18.6	1.66

3 両極性セプタム

両極性セプタムの原理図を図 2 に示す。取り出し側コイルとアボート側コイルの両方に図のような向きに同じ電流を流すと対向する逆向きの磁場が発生する。中心では取り出し側コイルとアボート側コイルが作り出す磁束がキャンセルする為磁場が発生しない。従ってその部分にビームを通して磁場による影響を受けない。セルフフィールドによる電磁力は図のようにリターンコイル側とセプタムコイル側で互いに反発するように働く。補強版を兼た真空チャンバーを中央に仕込むことによって両側から圧縮する力を吸収する。セプタム厚はセプタムコイルと真空チャンバーの厚みによって与えられるが電磁力による補強版の撓み大きい場合は、ビームから見たセプタムの実効厚は増える。この電磁石では補強版をボルトで留めるノーマルセプタムの方式に比べ電磁力を受ける所の支点間距離が短くなることと上下の電磁石コアによって強力に固定される為撓みが小さくなる。

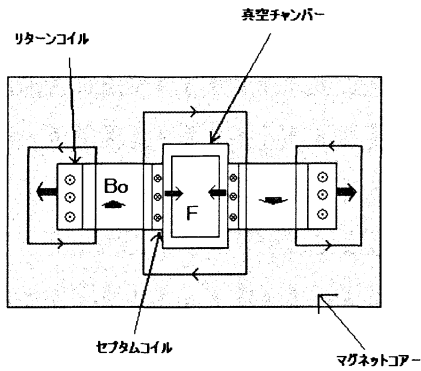


図2: 両極性セプタム

3.1 強度計算

両極性セプタム SM30 のセプタム厚は上流の低磁場セプタム電磁石の構造上あまり磁場の強さを上げられない為、セプタム厚は 30mm と制限される。その為 30mm の中でコイルのサイズと真空チャンバーの厚みを決めなければならない。真空チャンバーの厚さが大きくなるとその分コイルの断面積が減るのでパワーロスが増える。逆に厚みを減らすと電磁力による撓みや応力が大きくなるので機械的に耐えられなくなる。どの程度の厚みまで許容できるか強度計算が必要となる。有限要素法を用いた計算コード ANSYS を使って電磁力を受ける真空チャンバーの強度計算を行った。材質は SUS304 として磁場の強さは 1.4T として計算した。図3に計算結果を示す。マグネットギャップは 100mm、チャンバーの内寸は入射ビームのアクセプタンス 81π を確保して 100mmx60.5mm とした。真空チャンバーの厚み t を変えてチャンバーの撓み δ_{max} と応力 σ の計算を行った。このマグネットはパターン運転の為電磁力が周期的に加えられるので安全率3程度としてセプタム厚は 9 mm 程度となる。

3.2 設計

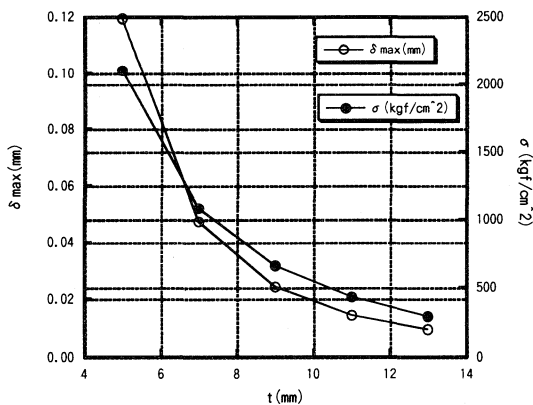


図3: 撓みと応力の計算

図4に両極性セプタムの構造図を示す。アポート側は 81π の周回ビームをすべてアポートできるようにギャップの大きさを定めた。真空チャンバーの厚みは周回ビーム側が 9mm, 取り出しアポート側が 2mm とした。セプタム電磁石の導体部分でビームが当たる可能性のある所は基本的には耐放射線性の良いセラミック等無機質の絶縁物を使用される[2]。パターン運転によってセプタムコイルは強い電磁力と同時に熱によるビーム軸方向の導体の伸びもある。セラミック溶射は線膨張係数が陶磁器に近いニッケルが導体にコーティングされてる為その部分で熱による導体の伸びを緩和する。厚さも 0.25mm から 0.3mm と薄い為、セプタム厚を薄くできる。リターンコイルの部分はパワーロスを抑える為銅の板をホロコンに溶接しセラミック溶射した後積み重ねる。その溶接の段階で導体が変形する可能性がある為摩擦撻拌接合(SFW)等の溶接技術も利用して精度よく作る必要がある。パターン運転を繰返した時コイル同士に隙間があるとコイル同士が擦れ合い磨耗による短絡の可能性もあるのでコイルの固定は重要である。図は楔状の金具で上下から閉めこむことで左右に板が開き真空チャンバーとリターン側コイルを押し付けコイルを固定する仕組みになっている。

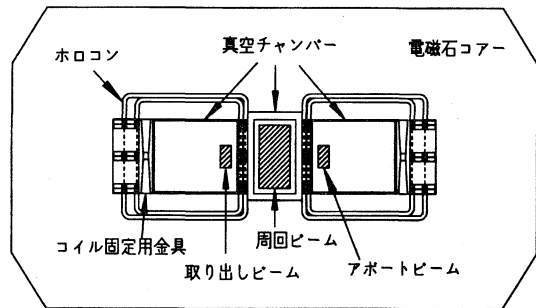


図4. 両極性セプタムの構造図

表2: 両極性セプタムの緒元

ビームエネルギー	50GeV
磁場	1.38T
ギャップ	97.2mm
ピーク電流	4447.6A
ピーク電圧	262.8V
抵抗	56mΩ
起磁力	106.7kAturn
ターン数	48
励磁方法	パターン
ホロコンサイズ	7.5x7.5 φ4.5
インダクタンス	2.6mH
ピーク電力	1.2MW
平均電力	303.8kW
冷却パス	48
冷却水量	274.8l/min
圧力損失	3.4kg/cm ²
流速	6m/sec
温度上昇	16℃

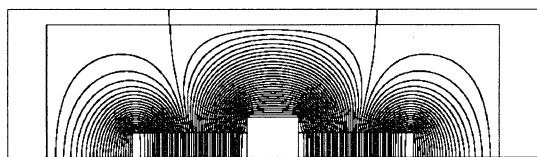
ホロコンの温度上昇は冷却水の流量と導体の発熱で与えられる。正方形のホロコンの一辺を固定して冷却チャンネルの直径を徐々に大きくしていくと流量は増え冷却しやすくなるがあまり大きくなりすぎると逆に導体部分の面積が減りすぎて発熱の方が大きくなる。丁度ホロコンの一辺と冷却チャンネルの直径の比が $(2/\pi)^{1/2}$ の時、温度上昇は最低となる。しかし実際は冷却水の流速にもよるがエロージョンの問題や機械的強度も考慮する必要があるので、あまり肉厚を薄くなり過ぎないように注意が必要である。表に 50GeV 対応にした両極性マグネットの主要緒元を示す。冷却チャンネルはすべてパラである。ピーク電力は 1 MW をこえる結果となった。

3.3 磁場計算

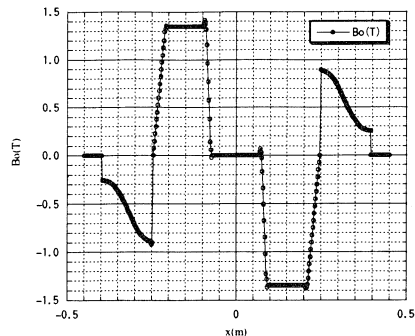
図5に計算コード POISSON による磁場計算の結果を示す。a)は磁束の流れを表す。中心部の磁束はチャンバーの外側を回り、この両極性マグネットではチャンバーの上下に位置するコアの部分でシールドの働きをして、ノーマルセパタムに比べて真空チャンバーの中の漏れ磁場は小さくなる。b)に磁場分布の計算結果を示す。取り出し側とアポート側で逆向きで同じ大きさの磁場ができ中心での磁場は零である。c)に真空チャンバーの中の漏れ磁場の計算結果を示す。漏れ磁場は磁場の対象性から主に4極成分からなる。従ってビームに対して中心近傍は弱い四極電磁石があるのと同じ効果をもたらす。よって軌道には影響及ぼさないとと言える。漏れ磁場の主な原因は絶縁をとる為にコイルとコアの上下両端の部分に隙間ができることによる。すなわちコイルの絶縁の厚みと緩衝材として使うカプトンの厚みによってその大きさが違って来る。2次元の計算で隙間の大きさ Δy を変えて漏れ磁場の大きさを計算した。実際はセラミック溶射を使った場合、コイル導体とコアの隙間は 0.5mm 程度と考えられるので漏れ磁場は中心磁場に対して 0.4%以下となる。次にエンド部の磁場のしみが周回ビームに影響を及ぼす可能性もあるので、3次元計算コード MAFIA を使ってエンド部の磁場分布を計算した。その結果を図6に示す。計算は 45/81 サイズで行っている。真空チャンバー内での BL 積は最大で 0.04Tm であった。中心磁場の大きさはデザイン値より 0.2%低い値になっている。取り出しアポート側の中心での BL 積はデザイン値に比べて 4%低い結果であった。

4 まとめ

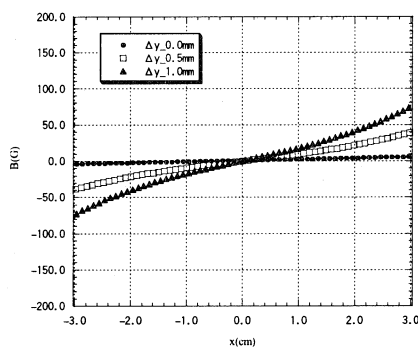
両極性セパタム電磁石の設計検討を行った。磁場解析を行い真空チャンバー内の漏れ磁場に関しては小さいことがわかった。今後絶縁の機械的強度試験と実際に製作可能かテスト機を作る予定である。



a) 磁束



b) 磁場分布



c) 漏れ磁場

図5：2D 磁場計算

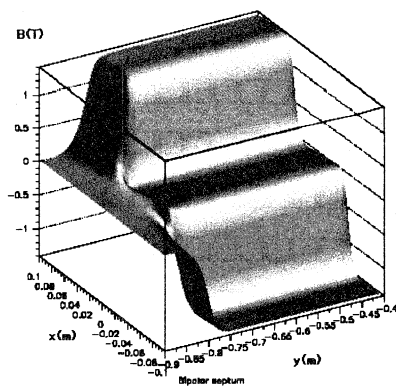


図6：電磁石端部の磁場

参考文献

- [1] ACCELERATOR TECHNICAL DESIGN REPORT FOR J-PARC. Accelerator Group JAERI/KEK Joint Project Team
- [2] Synchrotron Magnets for Designers. KEK Professional Training Course for Technical and Engineering Staff