

## R&D TEST FOR SLOW EXTRACTION SEPTA IN J-PARC MR

Yoshitsugu Arakaki<sup>1</sup>, Shuichi Tokumoto, Hiroshi Matsumoto, Izumi Sakai, Masahito Tomizawa, Hitoshi Kobayashi,  
Kouji Ishii, Mutou Ryoutarou, Akio Kiyomichi, Katsumi Marutsuka, Kuanjun Fan  
High Energy Accelerator Research Organization  
1-1 Ohho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

Designing and development of septum magnets for slow extraction in J-PARC MR has been performed in order to provide the beam into Hadron experimental hall. Slow extraction device consist of two electrostatic septa, two low field magnetic septa, four medium field magnetic septa and four sets of high field magnetic septa. Since the current density in low and medium field septa is very high, R&D test for thin-septum conductor was performed in order to check the stray field or deformation of the coil. As for medium field septum, The field measurement of the septum magnet with actual size was carried out, in result, homogeneity of field was 0.4%, and leakage field was ~5G.

## J-PARC MR 遅い取り出しセプタムのR&D試験

### 1. はじめに

J-PARC-MRにおいて、ハドロン実験施設へビームを供給する為の遅い取り出し機器の設計や開発が進行中である。遅い取り出しセプタムは、静電セプタム2台と真空中使用の低磁場セプタムが2台、中磁場セプタムが4台、大気中使用の高磁場セプタム4台から構成される。最上流に設けられる静電セプタムは必ずセプタムにビームが当たることになるのでそこでのビームロスの評価<sup>[1]</sup>が重要となる。ハードウェアとしてはレーザー変位計を用いたセプタム実効厚の測定や高電圧試験<sup>[2]</sup>などが行われてきた。セプタム電磁石の配置図を図1に示す。特に上流に位置する低中磁場セプタム電磁石は機械的強度、熱的特性、磁気的特性を考慮した上で静電セプタムと同様に可能な限りセプタム厚を薄く作ることが要求される。高磁場セプタムに関してはMR速い取り出しセプタムと基本構造がほぼ同じなので、ここでは中低磁場セプタムのセプタム導体に関する要素試験および中磁場用R & D機の磁場性能に関して報告する。

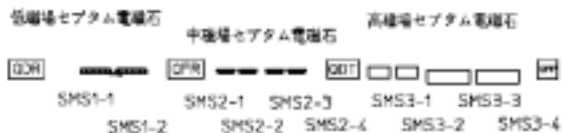


図1. 遅い取り出しセプタム電磁石の配置図

### 2. 低磁場セプタム電磁石

低磁場セプタムはコイル巻き数が1ターンの電磁石(SMS1-1)と2ターンの電磁石(SMS1-2)が一つの真空

槽に入り、電氣的にシリーズにつながる。SMS1-1とSMS1-2はターン数の違いだけで基本構造はほぼ同じである。SMS1-2の構造図を図2に示す。上下に冷却パイプが接合されたセプタム導体2枚は間に0.5mmの絶縁物を挟んでヨークに固定される。

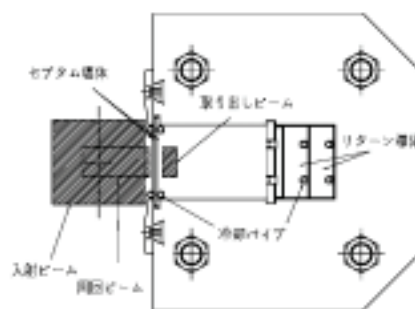


図2. SMS1-2の構造図

	SMS1-1	SMS1-2
偏向角(mrad)	0.6(1.0)	1.2(2.0)
最大磁場(T)	0.068(0.113)	0.136(0.226)
最大電流(A)	2967(4946)	2967(4946)
磁極長(m)	1.5	1.5
セプタム厚(mm)	1.5	3.5
垂直ギャップ(mm)	55	55
水平ギャップ(mm)	80	80
コイル巻き数(turn)	1	2
台数	1	1

※ ( )は50GeV相当

表1. 低磁場セプタムの緒元

<sup>1</sup> E-mail: arakaki@post.kek.jp

## 2.1 ムカデ型セプタム導体の試作

低磁場セプタム電磁石は30GeV時にはDC運転、50GeV時にはセプタム導体の発熱を抑える為にパターン運転となる。セプタム導体は薄い上に長くメカニカルな変形を受けやすい。セプタム厚が増えるとビームロスにつながるのでセプタム導体を試作してその真直度を測定した。製作されたムカデ型導体の写真を図3に示す。導体固定用のフィンには磁場精度を上げる為に2mmのスリットを設けてある。また固定部分の付け根は電磁力による応力が集中するので、それを緩和する為のRを取ってある。無酸素銅(C1020EH)に深さ0.5mmの切削し、φ4-t0.5mmのパイプ(SUS316L)をハンダ付け(SOL87)で接合した。真直度の測定は1軸移動機構にダイヤルゲージを付け測定した。結果は±0.1mmと良好な結果が得られた。

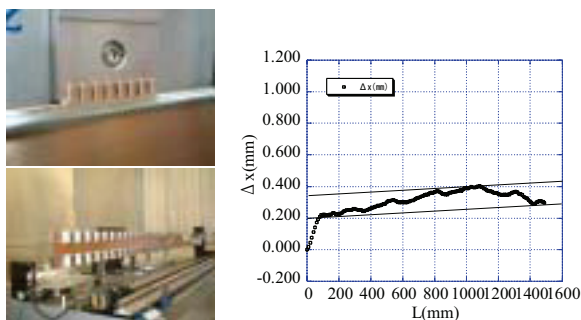


図3 ムカデ型セプタム導体及び高精度アライメント測定

## 2.2 大電流通電試験

製作されたセプタム導体に実際に電流を流して温度分布がどのようになるか測定した。図4に測定した導体表面温度分布を示す。測定点は上下固定部の中央をビーム軸に沿って測定した。入水側(左)から出水側(右)へとほぼ直線的に上昇している。温度は入水温度が21℃、流速5m/secで最大70℃程度である。図5はパターン運転した場合の結果である。測定点を図4で温度が最大なる所にセットし、表面温度の時間変化を測定した。電流は最大5000Aである。電流パターンは立ち上がり0.5秒、トップ0.5秒、立下り0.5秒で繰り返し3.64秒となっている。

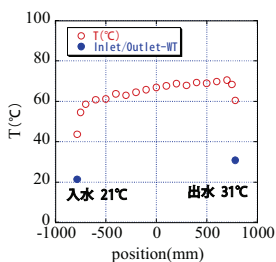


図4 DC3000A

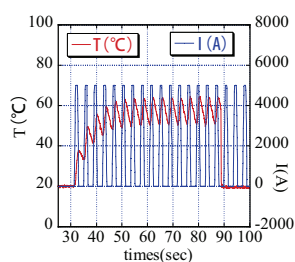


図5. PT5000A

測定は応答性の速い放射温度計を使っている。金属表面の測定点には黒体を塗り放射率を一定にして測定した。導体が全体として温まるのに15秒程度かかりその後は15度程度の熱変動を繰り返すことがわかる。

## 2.3 発熱による磁場への影響

図6にセプタム導体に電流が流れて両端で冷却した場合の発熱の計算結果を示す。この発熱の効果で磁場にどのような影響がでるか計算した。

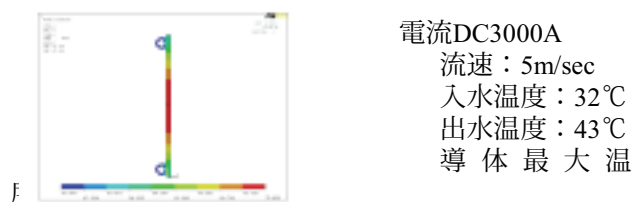


図6

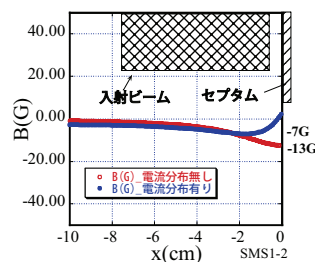


図7 漏れ磁場

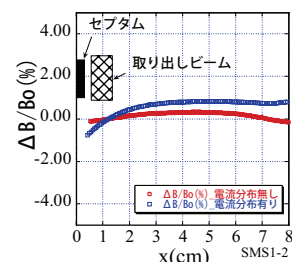


図8 磁場の均一性

図7に漏れ磁場を示す。電流分布が一様な場合はコアとコイルの間の隙間やコア本体から漏れが生じる。極性はセプタム電磁石コアの中の磁場に対して逆極性をもつ。発熱によって電流分布が変わると直接コイルを透過して磁場が漏れ、構造から決まる漏れ磁場とキャンセルして結果として小さくなる。したがって 図4で左から右に温度分布が変わるに従って漏れ磁場は小さくなる。磁場の均一性に関しては逆に電流分布が変わるに従って0.4%から1.6%まで悪くなる(図8)。

## 3. 中磁場セプタム電磁石

中磁場セプタムのR&D機の写真を図9に示す。コアの外寸は234mmx192mm、セプタム導体のサイズは5mmx11mmで4層縦に並んでいる。

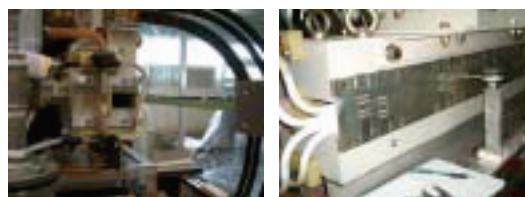


図9 中磁場セプタム電磁石R&D機

導体の周りは0.25mmのセラミック溶射（プラズマ）を施し、その周りをSUSバンドで縫う様にシールド板に固定する。リターン側はサイズ14mmx11mm φ7.2mmのホロコンを使用し、セプタム側と流量が同じになるようにφ2.4のオリフィスが取り付けられている。

	SMS2
偏向角(mrad)	1.6 (2.6)
最大磁場(T)	0.318(0.524)
最大電流(A)	3018(4972)
磁極長(m)	0.838
セプタム厚(mm)	7.7
垂直ギャップ(mm)	48
水平ギャップ(mm)	80
コイル巻き数(turn)	4
台数	4

※ ( )は50GeV相当

表2. 中磁場セプタムの緒元

### 3.1 セプタム導体の試作及び通電試験

セプタム導体は冷却水による壊食を避ける為に無酸素銅にSUS管が入ったものを使用する。セプタム導体の試作品を3種類作った。銅管とSUS管(t0.5)を一体にして引き抜きで製作したクラッド管a)、高温真空炉で銀ロウを流し込んでその後、削り出し加工で製作した導体b)及び拡散接合(HIP)で製作した導体c)に関して通電試験をしてその性能を確かめた。



a) クラッド管 b) 銀ロウ c) HIP

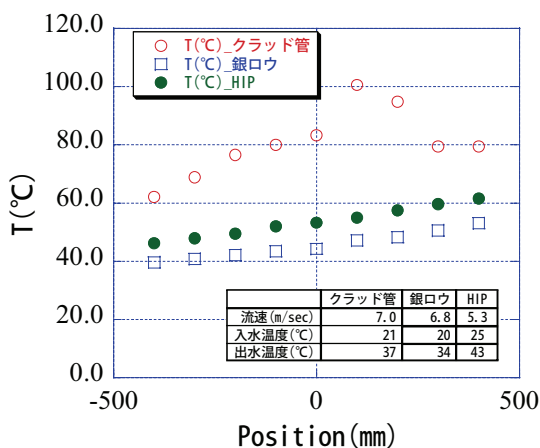


図10 セプタム導体表面温度分布

長さ約1mの導体に3000AのDC電流を流し、100mmピッチで表面温度を測定した。その結果を図10に示す。クラッド管は温度分布が所々まばらになっている。これは導体のサイズが小さくてダイスが入れられなかった為、熱接触が悪くなったと考えられる。銀ロウとHIPはほぼ同じ分布になっている。

### 3.2 磁場測定

中磁場セプタムR&D機の磁場測定を高精度ホール素子(Group3)と3軸移動架台を用いて行った。ビームの断面形状が四角である為、セプタムとビームのクリアランスをとれる様にコアとシールド板がいれこになる構造をとった。その為、コアの出っ張り部分が磁場に多少悪さをすることになる。またDC運転の為、周回ビームに影響が出ないように漏れ磁場も小さくしなければならない。このセプタムではコアとシールド板(SS400)の間に0.5mmの非磁性シート(SUS316L)を入れフラックスが直接シールド板に回らないように工夫されている。構造物を忠実に入力し磁場計算コードPOISSONを使って磁場計算を行った。計算と測定の結果を図11に示す。X=0の位置はシールド板の周回側端面である。磁場は磁極長の半分の所を水平方向に沿って測定した。磁場の均一性はかなり良い精度で一致しているのが分かる。漏れ磁場に関しては実測が0.16%程度と計算値に比べて悪くなっている。これはケーブルが発生する磁場の影響と考えられる。

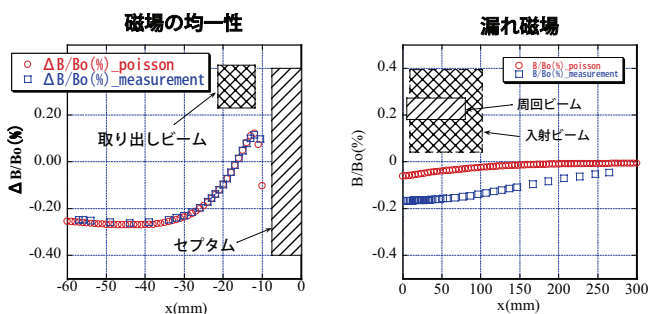


図11 磁場測定

## 4. まとめ

低磁場セプタムはセプタム導体を試作し高精度移動機構を用いてセプタムの厚み方向のアライメントを測定し±0.1mmの結果が得られた。中磁場セプタムは磁場測定の結果、漏れ磁場で最大5G程度、磁場の均一性で0.4%の結果が得られた。

## 参考文献

- [1] M. Tomizawa *et al.*, iDesign of Small Beam-Loss Slow Extraction in a High Intensity 50-GeV Proton Synchrotron, EPAC2000 Proceedings.
- [2] Y. Arakaki, *et al.*, i50GeVリング静電セプタムのR&D試験 "Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tosu Japan, Jul. 20-22, 2005