

Development of the magnetic septa for the slow beam extraction from the J-PARC Main Ring

Ryotaro Muto^{1,A)}, Yoshitsugu Arakaki^{B)}, Kuanjun Fan^{B)}, Koji Ishii^{B)}, Akio Kiyomichi^{A)}, Hitoshi Kobayashi^{B)}, Hiroshi Matsumoto^{B)}, Shigeru Murasugi^{B)}, Hidetoshi Nakagawa^{B)}, Jun-ichi Odagiri^{B)}, Katsuya Okamura^{B)}, Izumi Sakai^{C)}, Hikaru Sato^{B)}, Shin'ya Sawada^{A)}, Yoshihisa Shirakabe^{A)}, Kazuhiro Tanaka^{A)}, Shuichi Tokumoto^{B)}, Masahito Tomizawa^{B)}, Eiichi Yanaoka^{B)}

A) Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

B) Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

C) University of Fukui, 3-9-1 Bunkyo, Fukui City, Fukui, 910-8507

Abstract

The magnetic septa have been developed for the slow extraction from the J-PARC Main Ring (MR) to the Hadron Experimental Facility. They consist of two thin magnetic septa (SMS1), four medium thick septa (SMS2) and four thick septa (SMS3). The thinnest septum conductor is 1.5 mm thick. The typical operating current is DC 3000 A and the total kick angle with the 30 GeV proton beam is 77 mrad. The magnets of SMS1 and SMS2 are placed in the vacuum chambers with the diameter of 660 mm, and the chambers can be aligned remotely by stepping motors in the range of ± 5 mm, which enable us to minimize the beam loss by the magnetic septa. The septa were installed in the MR in December 2008, and were successfully operated in the beam time for the slow beam extraction in January and February 2009, which resulted in the first 30GeV beam delivery to the Hadron Experimental Facility.

J-PARC MRからの遅い取り出しのためのセプタム電磁石の開発

1. はじめに

J-PARC メインリング (以下MR)は3つの直線部を持つ陽子シンクロトロンであり、そのうちの1つの直線部において、ハドロン実験施設へのビームの遅い取り出しが行われる¹⁾。図1にMRとその遅い取り出し部の概観図を示す。

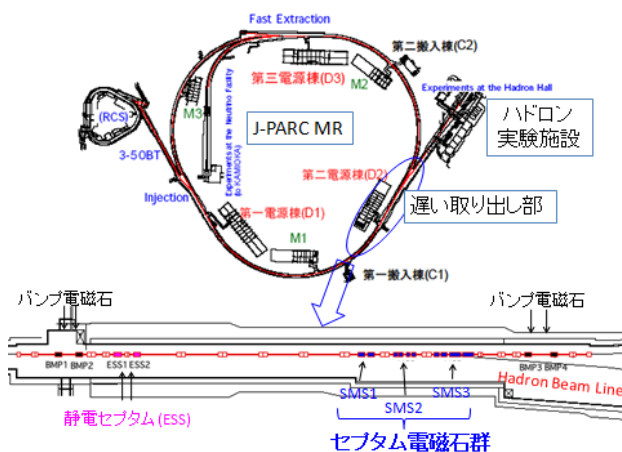


図1 : J-PARC MRと遅い取り出し部の概観図

遅い取り出し機器の製作は2007年度に開始され、KEKつくばキャンパスでの試験を経て、2008年12月にMRへインストールされた。そして2009年1月から2月のビームタイムにおける初めての遅いビーム取り出しへのチャレンジにおいて、無事ハドロン実験施設へのビーム供給に成功した。本論文では、この遅い取り出しのためのセプタム電磁石群の詳細と、運転結果について報告する。

遅い取り出し用のセプタム電磁石群は5種類・10台の磁極からなる。ビーム上流より、低磁場セプタム (SMS1_1, SMS1_2)、中磁場セプタム (SMS2_1 ~ SMS2_4)、高磁場セプタム (SMS3_1 ~ SMS3_4) である。静電セプタムにより削り出された取り出しビームを総計で77 mrad 偏向させ、ハドロン実験施設へとつづくスイッチヤードへビームを導くのが役割である。以下に、各セプタム電磁石についての詳細を述べる。

2. 低磁場セプタム (SMS1)

セプタム電磁石群の最上流部にあたる低磁場セプタムは2つの磁極 (上流より SMS1_1, SMS1_2) からなる。2つの磁極は直径660 mmの真空容器内におさまっている。表1に磁極の主要な仕様を示す。

¹ E-mail: ryotaro.muto@kek.jp

	セプタム厚	定格磁場	定格電流
SMS1_1	1.5 mm	0.071 T	3000 A
SMS1_2	3.5 mm	0.142 T	3000 A
	ターン数	コア長	ギャップ
SMS1_1	1	1.5 m	55 mm
SMS1_2	2	1.5 m	55 mm

表 1：低磁場セプタムの主要な仕様

低磁場セプタムの最上流部において、周回ビームと取り出しビームとの間の間隔は最上流部において約6 mmと非常に狭いため、SMS1_1はセプタム導体として1.5mm厚の無酸素銅材を用いた1 turnの構造になっている。SMS1_1の磁極の断面図を図2に示す。

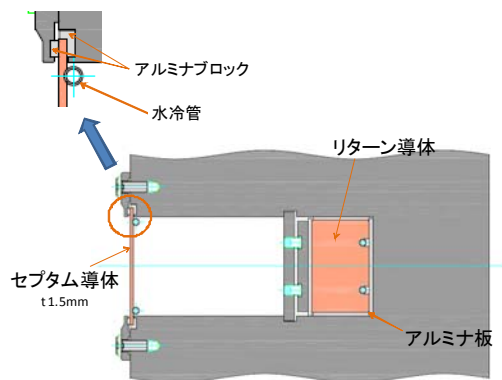


図 2：SMS1_1の磁極の断面

SMS1_2は、SMS1_1を2turn化した構造となっており、2枚の1.5mm厚セプタム導体の間に0.5 mm厚のアルミナ板をはさんで絶縁をとっている。

2.1 セプタム導体の支持部分

セプタム導体には巾30 mm、長さ5 mmの突出部が67 mm間隔で設けられており、それを利用して磁極から支持されている。磁極との間の絶縁はアルミナ製のブロックにより確保されている。突出部による電流密度の変化を抑えるため、各突出部には巾2 mmのスリットが7つ設けられている。突出部における磁場の変動は約0.3%以内に収まっている。

2.2 磁場測定結果

MRへのインストールに先だって、KEKつくばキャンパスにてセプタム磁石の磁場測定を行った。ホール素子を用いてビーム平面上の磁場の鉛直成分を測定した結果を図3に示す。横軸の原点は周回ビームの中心に対応し、縦軸はBL積である。周回ビーム中心での漏れ磁場は14 [gauss・m]程度、取り出し磁場の一様性は0.1%程度となっている。

2.3 遠隔アライン機構

低磁場セプタムと中磁場セプタムには、真空容器の水平位置を、ビーム軸と直交する方向に±5 mmア

ラインできる機構が備わっている。この機構は、架台を上下2段に分割し、上架台を直交LMガイドにクロスローラーを重ねた物で4点支持することにより、平行移動と回転の自由度を持たせたうえで、水平位置を上流と下流の2つのステップモーターで遠隔制御することによって実現している。

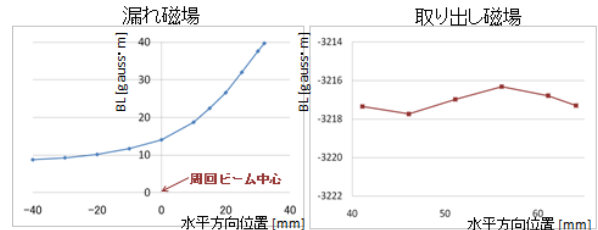


図 3：低磁場セプタムの磁場分布

3. 中磁場セプタム (SMS2)

中磁場セプタムの4つの磁極は低磁場セプタムと同じく直径660mmの真空容器の中に設置されている。主要スペックを表2に示す。

	セプタム厚	定格磁場	定格電流
SMS2_1~4	8.5 mm	0.33 T	3000 A
	ターン数	コア長	ギャップ
SMS2_1~4	4	0.838 m	48 mm

表 2：中磁場セプタムの主要な仕様

3.1 セプタム導体

セプタム導体は巾5mm、高さ11mmの銅材で、φ4mm、t0.5mmの水冷SUS管が2本内蔵されHIP処理にて拡散接合されている。セプタム導体の試作機における温度上昇測定結果を図4に示す。電流は3000A、冷却水流量4.4L/minで2本の水冷管に逆方向に冷却水を流した時、温度上昇は約32°Cとなった。

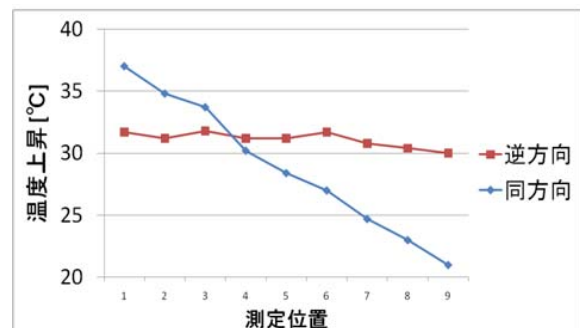


図 4：中磁場セプタム導体の温度上昇測定結果。各測定位置の間隔は100mm。

また、耐放射線性の観点から絶縁にはセラミック溶射を用いた。実機へのセラミック溶射に先だって、セラミックの種類と溶射法を最適化するため、溶射を施したサンプルを作成して3点曲げ試験を行い、溶射が破壊される加重を調査した。溶射の破壊の判定は溶射に割れが入る際に発生する音によって行っ

た。結果を図5に示す。ロッド溶射法よりもプラズマ溶射法が優れているという結果が得られ、その中でも剥離加重がもっとも大きい、日本コーティング社による50 μmのNi下地を施したグレーアルミナ溶射(厚さ200 μm)を絶縁方式として採用した。

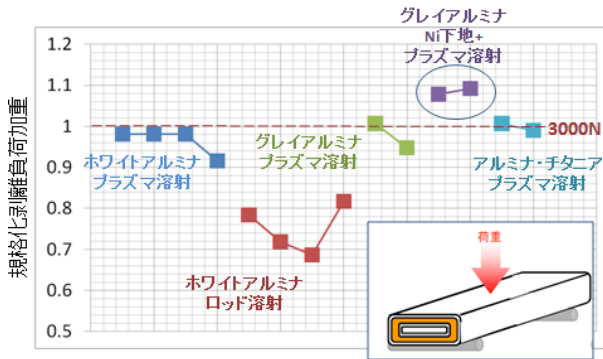


図5：セラミック溶射の耐加重試験の結果

セプタム導体は、厚さ50 μm、巾20 mmのSUSリボンによってシールド板に固定されている。固定は200 mm間隔で行う。SUSリボンとセプタム導体の間には、摩擦等による溶射の摩耗や剥離を防ぐために厚さ20 μm、巾30 mmのSUSリボンがもう一重巻かれている。50 μmのSUSリボンに10kg重の荷重(SUSリボンのせん断荷重20kg重のほぼ半分)を加えて引っ張りながらシールド板にスポット溶接することにより、セプタム導体を20kg重の荷重でシールド板に固定する。この荷重は、定格運転時にセプタム導体にかかる電磁力とほぼ同程度の値である(電磁力はセプタム導体をシールド板に押しつける方向に働く)。

3.2 磁場測定結果

図6に中磁場セプタムの磁場測定結果を示す。周回ビーム中心での漏れ磁場は2.2 [gauss・m]程度、取り出し磁場の変動は0.3 %程度となっている。

4. 高磁場セプタム

高磁場セプタムの主要仕様を表3に示す。周回ビームと取り出しビームが十分離れているため、真空ダクトを抱え込んだC型の電磁石となっている。

	セプタム厚	定格磁場	定格電流
SMS3_1, 2	35 mm	0.91 T	3400 A
SMS3_3, 4	64 mm	1.00 T	2800 A
	ターン数	コア長	ギャップ
SMS3_1, 2	16	1.14 m	61 mm
SMS3_3, 4	18	2.28 m	49 mm

表3：高磁場セプタムの主要な仕様

高磁場セプタムの導体にはポリイミドテープで絶縁されたホローコンダクター(SMS3_1, 3_2はt1.5x8x10mm, SMS3_3, 4はφ5.5, 9x14mm)を用いている。各磁極の端部には周回ビーム領域への漏れ磁場を押さえるために磁気シールドが取り付けられてい

る。図7に磁場測定の結果を示す。周回ビーム中心での漏れ磁場は高磁場全体で24 [gauss・m]程度、取り出し磁場の変動は0.2 %程度となっている。

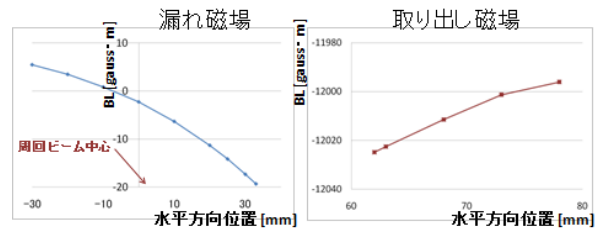


図6：中磁場セプタムの磁場分布

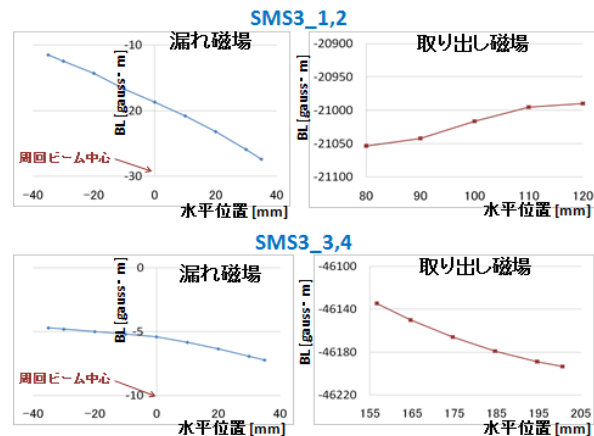


図7：高磁場セプタムの磁場分布。上段がSMS3_1,2、下段がSMS3_3,4の分布。

5. 2009年初頭のビームタイムにおける運転の結果と今後の課題

上記のセプタム磁石群は、2008年12月にインストールを完了し、2009年1~2月におけるビームタイムにおいて定格運転され、遅い取り出しビームをハドロン実験施設へと導くことに成功した。MRトンネル内に設置されたビームロスモニター(BLM)から求めたビーム取り出し効率の現状は約90%であり、今後大強度ビームの取り出しへ向けて効率を高めていく必要がある。BLMの分布によれば、セプタム電磁石でのビームロスが遅い取り出し部全体の半分以上を占めている。ビーム軌道の調整と、セプタム電磁石の位置の遠隔調整によってセプタム電磁石でのビームロスの低減をすすめていく。

また、中磁場セプタムの水平方向の漏れ磁場が周回ビームに引き起こす鉛直方向のC.O.D.が、ステアリング磁石により補正可能ではあるが無視できない量(約3mm)であることが明らかになった。端部コイルの非対称性が原因と考えられ、今後原因の確定と改造案の作成を行う。

参考文献

[1] M. Tomizawa et al., "J-PARC MRの遅い取り出し", in this conference