

8GeV および 30GeV 陽子の遅い取り出しのための大口径セプタム磁石の設計

DESIGN OF LARGE APERTURE SEPTUM MAGNETS FOR THE SLOW EXTRACTION OF 8 AND 30 GEV PROTON BEAM

武藤亮太郎^{#,A)}, 新垣良次^{B)}, 木村琢郎^{B)}, 村杉茂^{B)}, 岡村勝也^{B)}, 白壁義久^{A)}, 富澤正人^{B)}, 柳岡栄一^{B)}
Ryotaro Muto^{#,A)}, Yoshitsugu Arakaki^{B)}, Takuro Kimura^{B)}, Shigeru Murasugi^{B)}, Katsuya Okamura^{B)},
Yoshihisa Shirakabe^{A)}, Masahito Tomizawa^{B)}, Eiichi Yanaoka^{B)}

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

^{B)} Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

The conceptual design of the magnetic septa for the 8 GeV and 30 GeV proton slow beam extraction have been developed. Due to the large emittance of the 8-GeV beam, the newly designed magnetic septa must have larger aperture than the present septa for only 30-GeV beam extraction. The detailed design of each magnetic septum is reported.

1. はじめに

J-PARC メインリングでは、現在 30 GeV まで加速された陽子を 3 次共鳴を用いた遅い取り出しによって取り出し、ハドロン実験施設における素粒子原子核実験のために供している[1,2]。このハドロン実験施設の将来計画として、8 GeV 陽子を用いた素粒子実験(COMET 実験[3])が提案され、準備が進められている。8 GeV 陽子の取り出しのためには、大きなエミッタンスを受け入れるための大口径のセプタム磁石が必要となるが、30 GeV 陽子と 8 GeV 陽子の両方を同じセプタム磁石を用いて取り出すことが出来るようにするためには、30 GeV 用の偏向磁場やセプタム厚を保ったまま、磁極のギャップおよびコイルのアンペア・ターンを増やして 8 GeV 用に大口径化する必要がある。本論文では、各セプタム磁石の設計案、コイルの発熱計算、偏向および漏れ磁場計算、磁場に起因する応力計算の結果を報告する。

2. 8 GeV 陽子取り出し用のセプタム磁石に要求されるギャップと電流

新しくデザインされる 8 GeV 陽子取り出し用のセプタム磁石(大口径セプタム磁石とよぶ)は、現在 30 GeV の陽子ビームの取り出しに使用しているセプタム磁石[4]と磁極の構成(全 10 台)や偏向角は同一である。DC 励磁である点も同じである。8 GeV の大エミッタンスビームを偏向するために磁極のギャップを大きくし、また同じセプタム磁石で 30 GeV 陽子ビームも偏向できるようにしておく必要があるため、コイルのアンペア・ターンはギャップが増えた分だけ大きくしておく必要がある。現状のセプタム磁石と大口径セプタム磁石との比較(磁極のギャップと、定格電流×ターン数)を Table 1 にまとめた。以下、それぞれのセプタム電磁石について詳細を説明する。

Table 1: Gaps, Electric Currents and Turn Numbers of Newly Designed Septum Magnet Cores

磁極名	gap [mm]	電流×ターン数 [A・turn]
	現状→大口径	現状→大口径
低磁場 1 (SMS1_1)	55 → 76	3000×1 → 4300×1
低磁場 2 (SMS1_2)	55 → 76	3000×2 → 4300×2
中磁場 1~4 (SMS2_1~4)	48 → 81	3000×4 → 3600×6
高磁場 1,2 (SMS3_1,2)	61 → 89	3100×16 → 3600×20
高磁場 3,4 (SMS3_3,4)	49 → 69	2800×18 → 2800×24

3. 低磁場セプタム (SMS1)

低磁場セプタム(SMS1)は真空チェンバーの中におさめられた磁極長 1.5m の 2 つの磁極からなる。コイルは厚さ 1.5 mm の無酸素銅で製作し、内径 3 mm、肉厚 0.5mm の SUS パイプを真空銀ろう付けにより接合して上下 2 カ所で水冷する。上流側の磁極 SMS1_1 は 1 ターン、下流側の磁極 SMS1_2 は 2 ターンのコイルである。SMS1_1 の断面形状を Figure 1 に、POISSON による 2 次元磁場計算の結果を Figure 2 に示した。必要な偏向磁場が得られており、また漏れ磁場も約 2 gauss 未満である。大口径化によりギャップが大きくなりコイルに流れる電流が増えるが、水冷管の数や径を大きくすることは難しいため、コイルの温度、冷却水の出水温度は現状より上昇する。コイルの熱計算の結果を Figure 3 に示した。最大温度は 115°C に達するが、Figure 4 に示

[#] ryotaro.muto@kek.jp

すように、ローレンツ力に起因するセプタム導体の変位は最大 8 μm と小さく、発生する内部応力もコイルを保持する部分で最大 10 MPa と許容応力を大きく下回っている。今後導体を試作して温度分布・変位分布を実測することを計画している。

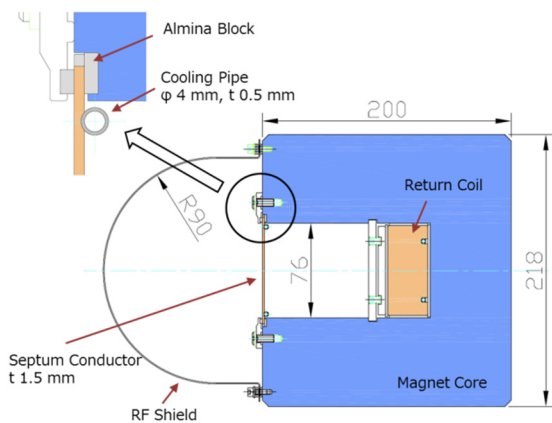


Figure 1: Schematic cross section of SMS1_1.

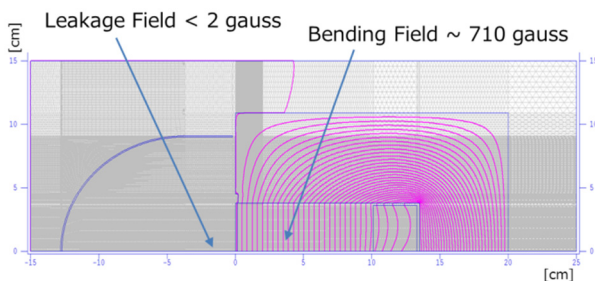


Figure 2: Result of magnetic field calculation for SMS1_1.

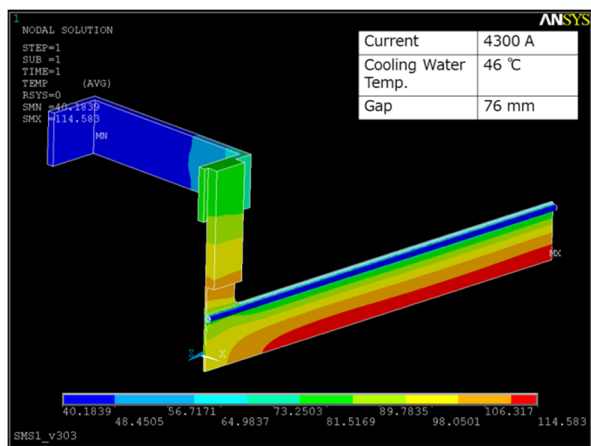


Figure 3: Temperature distribution of the septum conductor of the SMS1.

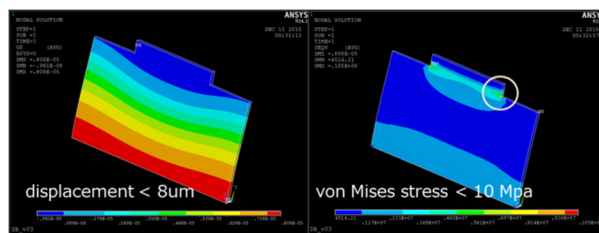


Figure 4: Calculation results for the displacement and the von Mises stress of the SMS1 septum conductor.

4. 中磁場セプタム (SMS2)

中磁場セプタム(SMS2)は真空チェンバー内に設置された 4 つの磁極からなる。磁極の断面図を Figure 5 に示した。磁極長はギャップ 81 mm、ターン数は 6、定格電流は 3600 A である。セプタムは厚さ 2 mm の磁気シールドに導体を SUS 製のフォイルを用いて取り付けられた構造となっている。セプタム導体には内径 3 mm、肉厚 0.5mm の SUS パイプを幅 5 mm、縦 12.5 mm の無酸素銅の内部に埋め込み HIP 接合した水冷導体を用いる。導体の断面図を Figure 6 に示した。導体の素線絶縁は厚さ 250 μm のセラミック溶射で行う。この製作手法は現状の中磁場セプタムでも採用されているが、コイルの断面サイズと定格電流が異なるため、発熱評価を ANSYS を用いて行った。結果を Figure 7 に示す。冷却水を流す方向は上下の 2 本の管で逆にし、最大温度を下げる。このため導体の端と中央で温度分布が異なる。冷却水の流量として 2.4 L/min を仮定すると冷却水の温度上昇は 16 $^{\circ}\text{C}$ となり、導体の最高到達温度は 62 $^{\circ}\text{C}$ となった。これは現状の SMS2 コイルと同等であり、問題なく運転出来ることがわかった。

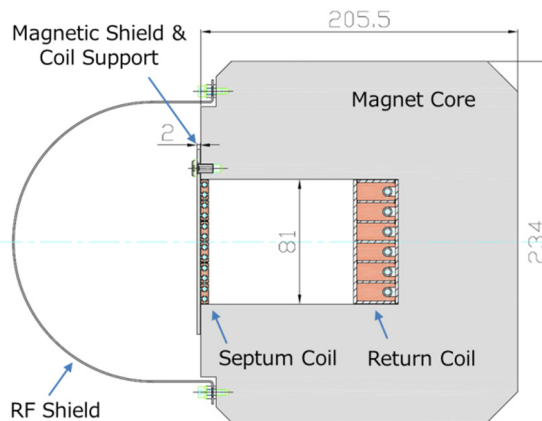


Figure 5: Schematic cross section of SMS2.

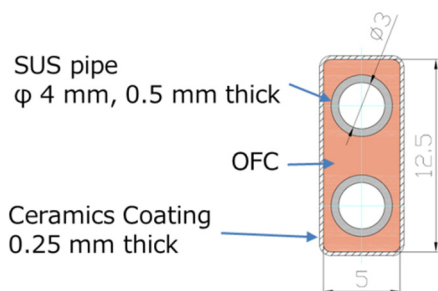


Figure 6: Schematic cross section of the septum conductor for SMS2.

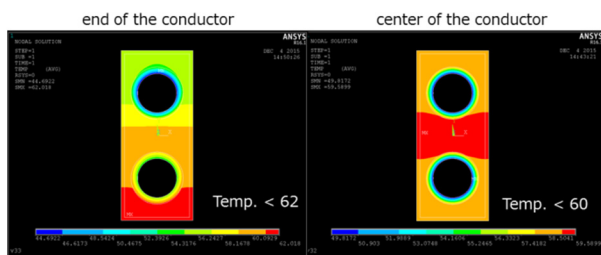


Figure 7: Calculation results for the temperature rise of the SMS2 septum conductor. Left panel is temperature distribution at the end of the conductor, and right panel is at the center of the conductor.

5. 高磁場セプトラム (SMS3)

高磁場セプトラムは、磁極長 1140 mm の磁石 2 台と、磁極長 2280 mm の磁石 2 台の計 4 台からなる。偏向角は合計で 64 mrad である。

5.1 高磁場セプトラム 1,2 (SMS3_1,2)

磁極長 1140 mm、ギャップは 89 mm である。ホロコンは 10 mm×9 mm、肉厚 1.5 mm のものを使用し 2 列 20 ターンのコイルとする。リターン側のホロコンには 9 mm×20 mm の導体(無酸素銅)をろう付けし電流による発熱を低減する。ホロコンの冷却は 1 ターンにつき 1 水路で行う。定格電流 3600 A に対する冷却水の温度上昇は冷却水の差圧 1 MPa に対して 20°C である。偏向磁場は 0.9 T である。Figure 8 に上半分の断面形状の概略図を、Figure 9 に POISSON での 2 次元磁場計算結果を示す。周囲ビームダクトは鉄で製作することで磁気シールドを兼ねている。周囲ビームダクト内の漏れ磁場は 1 gauss 未満に抑えられている。

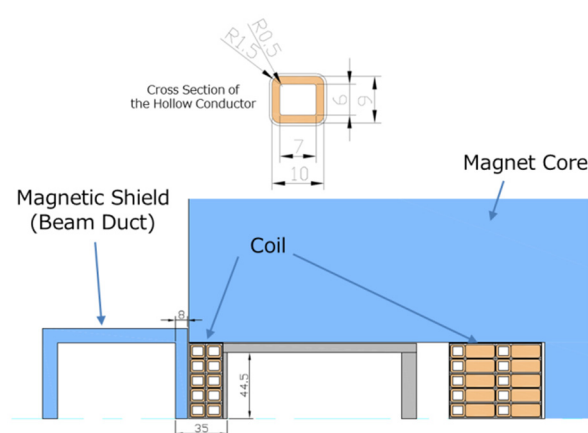


Figure 8: Schematic cross section of SMS3_1 and 3_2.

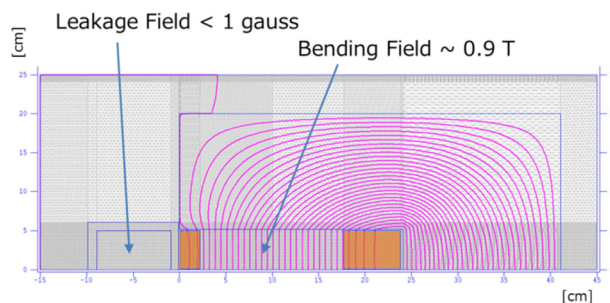


Figure 9: Result of magnetic field calculation for SMS3_1 and 3_2.

5.2 高磁場セプトラム 3,4 (SMS3_3,4)

磁極長 2280 mm、ギャップは現状の 49mm から 69 mm へ大きくする。コイルのアンペア・ターンの増大分はコイルのターン数を 3 列×6 層の 18 ターンから 3 列×8 層の 24 ターンに増やすことで稼ぎ、定格電流は現状の 2800 A のままとする。ホロコンサイズは現状と同じく 14 mm×9 mm、穴径 5.5 mm のものを使用し、冷却は 1 ターンにつき 1 水路で行う。リターン側のホロコンには 9 mm×24 mm の導体(無酸素銅)をろう付けする。偏向磁場は 1.0 T である。Figure 10 に上半分の断面形状の概略図を、Figure 11 に POISSON での 2 次元磁場計算結果を示す。漏れ磁場は 1 gauss 未満に抑えられている。

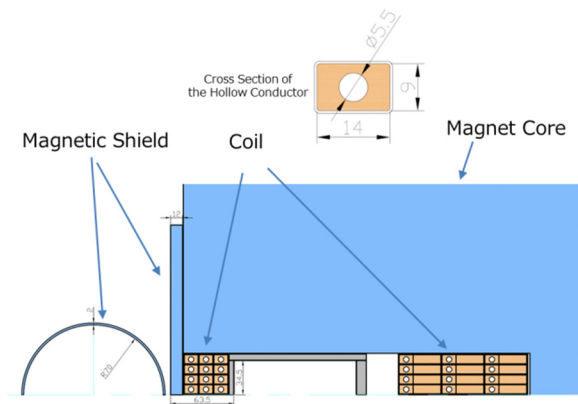


Figure 10: Schematic cross section for the upper half of SMS3_3 and 3_4.

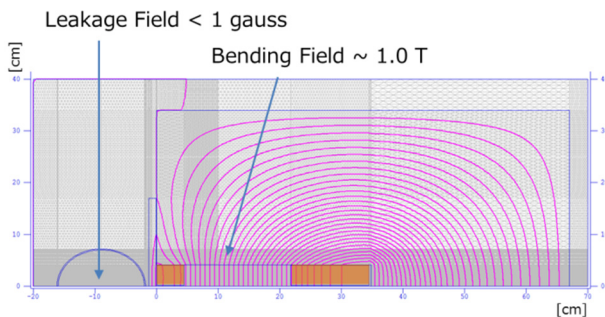


Figure 11: Result of magnetic field calculation for SMS3_3 and 3_4.

6. まとめ

J-PARC メインリングにおいて、8 GeV の大エミッタンス陽子ビームを取り出すための遅い取り出し用セプタム磁石群の概念設計を行った。現在メインリングにて使用中の 30 GeV 遅い取り出し用セプタム磁石をもとにし、ギャップとアンペア・ターンを増やす方針で設計を行い、大きな問題なく 8 GeV と 30 GeV 両方のビームを受け入れ可能なギャップを実現することができた。セプタム導体の最高温度が 115 °C に達する低磁場セプタムについては、今後試作導体を製作し温度分布・変位分布を実測することを計画している。

参考文献

- [1] Joint Project Team of JAERI and KEK, “The joint project for high-intensity proton accelerators”, KEK Report, 99-4 and JAERI-Tech, 99-056, July 1999.
- [2] T. Koseki *et al.*, “Beam commissioning and operation of the J-PARC main ring synchrotron”, Prog. Theor. Exp. Phys. (2012), 02B004.
- [3] The COMET Collaboration, “COMET Phase-1 Technical Design Report”; http://comet.kek.jp/Documents_files/PAC-TDR-2014/PAC-Review-20141110.pdf
- [4] R. Muto *et al.*, “Manufacturing and Operation of the Magnetic Septa for the Slow Beam Extraction from the J-