

# コサイン・シータ型セプタム電磁石とその超伝導応用について

## TRUNCATED IRON-YOKED COSINE-THETA SEPTUM MAGNET AND DESIGN STUDIES WITH SUPERCONDUCTING TECHNOLOGY

杉田 圭\*, エクバート・フィッシャー

Kei Sugita\*, Egbert Fischer

GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH

### Abstract

Generally a septum magnet with a C-shape iron yoke is used for an injection and extraction areas of accelerators. However, this type of magnet cannot be used as a high field magnet beyond the iron saturation level around 2 T due to leakage of the magnetic field and degradation of the magnetic field quality. On the other hand, in a ring accelerator, cosine-theta type magnets with a superconducting cable are commonly used to induce high magnetic field more than 2 T. Based on the cosine-theta magnet, a novel concept of a septum magnet was devised. With superconducting cables, possibility of septum magnet design beyond 2 T was explored by electromagnetic simulations. In future, such a high field magnet could be used for the CERN's future project FCC (Future Circular Collider) or superconducting accelerators for medical applications. We present the principle of the design and three design studies with different superconducting cables.

### 1. コサイン・シータ型セプタム電磁石

一般に円形加速器のビーム入射や取り出しには、C型の鉄ヨークを配したセプタム電磁石が用いられる。他の一般的な鉄ヨークを用いた常伝導加速器電磁石と同様に、高磁場を生じさせようとした場合、鉄の飽和による磁場の歪みや漏れ磁場により、2 T程度が限界となる。

一方、2 Tを超える磁場が必要となる高エネルギー加速器などでは、コサイン・シータ型の電磁石が超伝導電磁石として用いられる。任意の円周上に、角度によって変化する電流密度  $I = I_0 \cdot \cos \theta$  の電流を配すと、その円周内に純粋な二極磁場を生じることを基本原理として、電磁石を設計したものがコサイン・シータ型電磁石である。飽和の影響をなるべく受けないような内径を選んだ円形の鉄ヨークをその円周電流の外部に配すことで、内部の磁場を強め、外部への磁場の漏れを防ぐことができる。このような原理に基づく電磁石は、RHIC, HERA, LHC など高エネルギー加速器で活用されている。そこでコサイン・シータ型の基本概念をもとに、2 Tを超える磁場をつくりだすセプタム電磁石を新たに考案した (Figure 1) [1, 2, 3, 4].

Figure 2 は、磁極あたり 10 本の線電流と、その線電流の鏡像電流を無限大の比透磁率を保つ鉄ヨークの代替として、その電流の作る磁力線を解析的計算により描いたものである。完全なコサイン・シータ型の電磁石 (Figure 2・左) はコイル内部に二極の均一な磁場を生じさせていることが分かる。このコサイン・シータ型の電磁石を垂直な直線で切り取っていったのが、セプタム電磁石の基本形となる。Figure 2・右方の三図は、その切り取りが基本形の完全なコサイン・シータ型電磁石の左、中央、右となっている。切り取られた部分にあった線電流は切り取った直線上に等間隔に並べられる。それぞれ磁力線が右側のコサイン・シータ型部と線電流が直線上に配された部

分に囲まれた部分に保持されていることと、線電流が直線上に配された部分より左側では磁力線が現れない、したがって無磁場の領域があることがわかる。右方の二図の場合は、鉄ヨークも切り取ることができる。

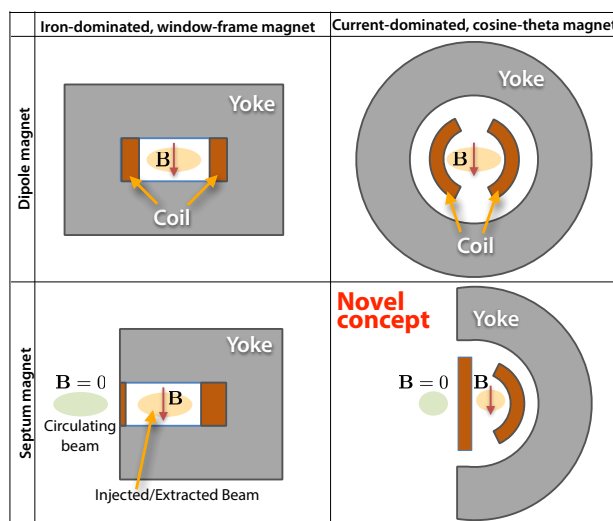


Figure 1: Outline pictures of iron- and current-dominated, accelerator-dipole- and septum-magnets.

### 2. 超伝導セプタム電磁石

前述の基本設計は常伝導電磁石にも応用可能である [1] が、ここでは超伝導線材を用いた高磁場セプタム電磁石について報告する。それぞれの設計仕様は Table 1 にまとめた。以下、それぞれの詳細について述べる。

#### 2.1 3.65 T セプタム

このセプタム電磁石は GSI における国際協力プロジェクト FAIR (Facility for Anti-proton and Ion Research

\*k.sugita@gsi.de

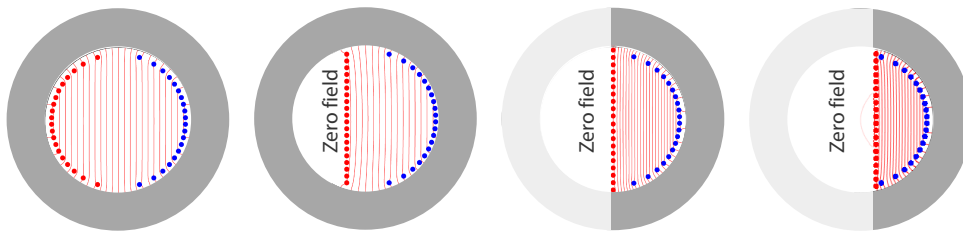


Figure 2: Flux lines induced by complete cosine-theta and truncated cosine-theta septa with a truncation in the left side, at the center, in the right side. (from left to right). Flux lines were drawn by ten line currents per pole and their image currents instead of the iron yoke with infinite permeability.

Table 1: Design Parameters of the Superconducting Septum Magnets

Maximum field strength	3.65 T	8 T	2 T
Cable type	Rutherford cable	Rutherford cable	Nuclotron cable
Cable size	2.5 mm × 1 mm	15.4 mm × 2.2 mm	φ 8.29 mm
Superconducting strand diameter	0.5 mm	1.65 mm	0.8 mm
Number of strands in cable	10	28	23
Maximum field strength	3.65 T	7.87 T	2 T
Turns per pole	66	59	14
Current	1.9 kA	15 kA	13.3 kA
Operation temperature	4.7 K	1.9 K	4.7 K

in Europe)の取り出し用セプタム電磁石の試案として設計された。電磁石に対して、スペースなどの制約がおおきく、Figure 3のような形状となった。

コンパクトな設計と磁場性能最適化のために小さなラザフォード・ケーブルを用いた。取り出しビーム側の磁場は3.65 Tに達し、誤差磁場は1%程度に抑えることができた。また周回ビーム側は6 mTに抑えることができた。電磁石中央部の磁場強度をFigure 4に示す。

コイルは右側がコサイン・シータ型、左側がブロック・コイル型となるため、その接続となるコイル端部の巻線形状が問題となると考えられる。そこでコイル端部をモデル化して、磁場の評価を行った (Figure 5)。計算の結果、電磁石端部での周回ビーム側への漏れ磁場は内部よりも低いことがわかった [5]。これは、従来の常伝導セプタム電磁石では、コイル端部が鉄ヨークから露出しているのに対して、コサイン・シータ型では鉄ヨーク内部に収められているためと考えられる。この点は本コンセプトに基づくセプタム電磁石の特長のひとつである。

## 2.2 8 Tセプタム

コサイン・シータ型の設計を基本としているため、高エネルギー加速器の超伝導電磁石と同程度の磁場強度をもつセプタム電磁石も可能なはずである。そこで、安定した高磁場・超伝導加速器電磁石であるCERN-LHC [6]の主二極電磁石 (8.6 T)の超伝導線材を元にした線材により8 T級のセプタム電磁石の設計を試みた [7]。断面図をFigure 6に示す。電磁石断面の二次元計算では、口径内の磁場強度は7.87 Tとなった (Figure 7)。約20 mmのセプタム隔壁 (主にブロック・コイルの線材幅)を挟んだ周回ビーム側で

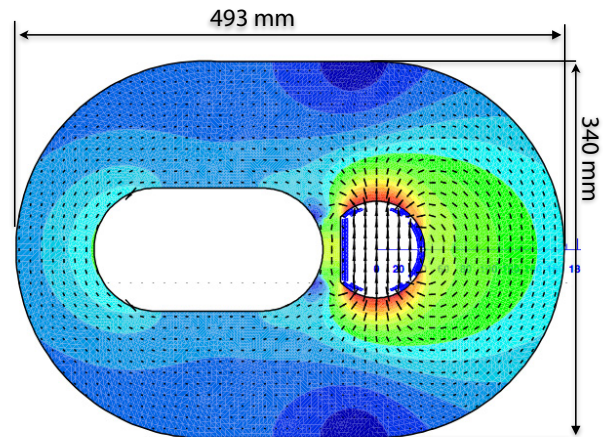


Figure 3: Cross section of 3.65 T superconducting septum magnet. The hole at the right side is for an extracted beam and the other is for a circulating beam.

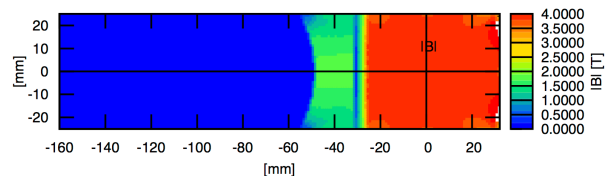


Figure 4: The magnetic field  $|B|$  at the central part of the magnet.

は、漏れ磁場を4 mT程度まで抑えることができた。高磁場を作り出すためにコサイン・シータ型の部分は二層コイル、また隔壁の幅を薄くするためにブロッ

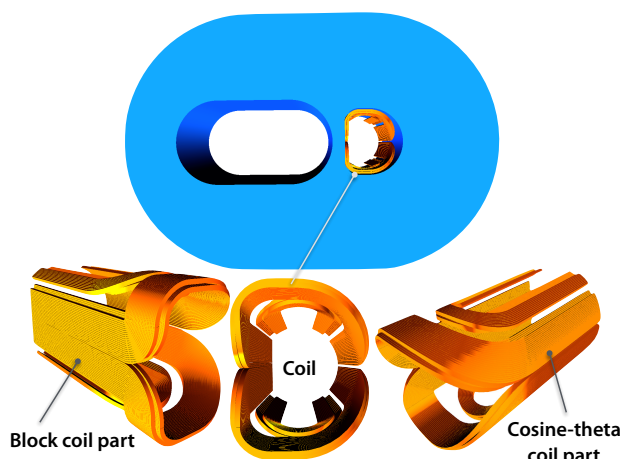


Figure 5: Picture of the three dimensional model of the end of the 3.65 T septum magnet.

ク・コイルの部分は一層コイルとなっている。従って、コイル端部での一層コイルから二層コイルへの巻線が、複雑になる。電磁石の製作に向けて、コイル端部の三次元的な磁場の最適化ならびに機械構造設計が必須である。

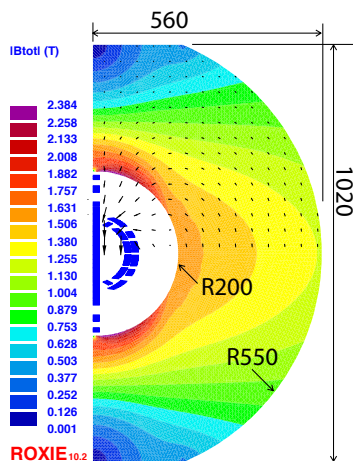


Figure 6: Cross section of the 8 T superconducting septum magnet.

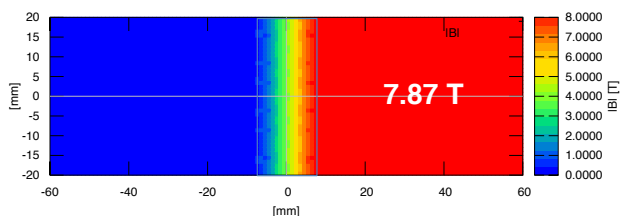


Figure 7: The magnetic field  $|B|$  at the central part of the magnet.

### 2.3 2 T セプタム

FAIR プロジェクトの中核である重イオン・シンクロトロン SIS100 では、JINR (Joint Institute for Nuclear Research ロシア・ドゥブナ) のニュークロトロン加速器のために開発されたニュークロトロン・ケーブル [8] を用いた超伝導電磁石を採用している。ニュークロトロン・ケーブルは優れた冷却特性と機械特性をもち、これまで実用化されてきた早い励磁、繰り返しの電磁石に加え、高磁場電磁石、特に口径の大きな電磁石への応用の可能性が期待されている [9]。そこでニュークロトロン・ケーブルを活用したセプタム電磁石の磁場計算をおこなった。電磁石とコイルの断面を Figure 8 に示す。線材は 1.9 T の SIS100 主二極電磁石に用いられるもの同一である。断面内の線材の位置を主な変数として、高磁場側の磁場性能を最大化し無磁場側の漏れ磁場を最小化する最適化をおこなった。その結果、無磁場側への漏れ磁場を 10 mT 程度まで抑えることと、高磁場側での高い磁場均一性が達成できた (Figure 9)。

8 T セプタムで指摘した、コイル端部での二層コイルから一層コイルへの巻線は、ニュークロトロン・ケーブルの異方性のない曲げ特性から、ラサフォード・ケーブルよりも容易で、機械的に安定であると考えられる。より高い磁場を達成するためには、コイル全体としての工学的電流密度を上げる必要があり、冷却特性も含めた線材や電磁石の構造の最適化が必要である。

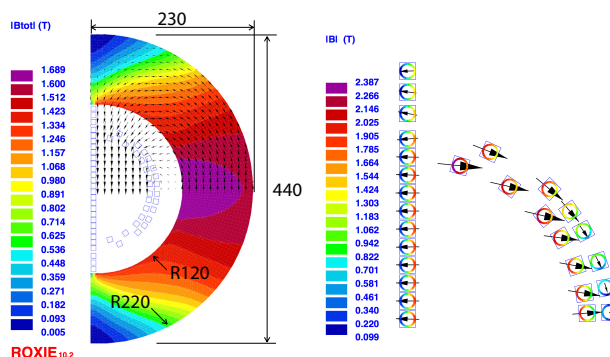


Figure 8: Cross section of the 2 T superconducting septum magnet (left) and the cross section of the upper half of the coil (right).

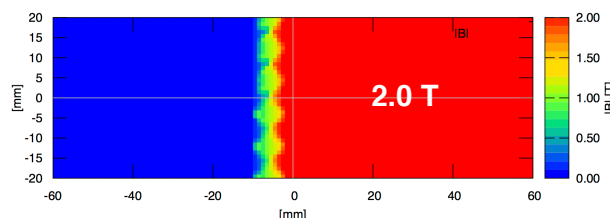


Figure 9: The magnetic field  $|B|$  at the central part of the magnet.

### 3. まとめ

コサイン・シータ型電磁石に基づくあらたなセプタム電磁石のコンセプトを紹介した。超伝導線材を用い、2Tを超える高磁場セプタム電磁石の磁場計算を行った。その結果、高エネルギー加速器用コサイン・シータ型電磁石とほぼ同等の磁場を発生させることができ、周回ビーム側への漏れ磁場も低く抑えられることが確認された。今後、具体的な仕様を決定の上、基礎的な技術開発、並びに機械構造解析を含めたシミュレーションをおこない、試作機製作を推進する。また常伝導電磁石への応用も可能であるため、従来のセプタム電磁石との比較検討を行っていく。

### 参考文献

- [1] K. Sugita, "Novel concept of truncated iron-yoked cosine theta magnets and design studies for FAIR septum magnets", IEEE Transactions on Applied Superconductivity 22, 4902204 (2012).
- [2] K. Sugita, "Improved septum magnet", International Patent Application No. WO 2013/034481 (06 Sep. 2011).
- [3] K. Sugita, "Septum magnet", US Patent No. 9,236,176 (12 Jan. 2016).
- [4] K. Sugita, "Improved septum magnet", European Patent No. 2754336 (27 Apr. 2016).
- [5] K. Sugita *et al.*, "Superconducting septa and fast ramped cosine-theta magnets", Presented in FCC Week 2015.
- [6] L. Evans, P. Bryant, "LHC machine", Journal of Instrumentation 3, S08001 (2008).
- [7] K. Sugita *et al.*, "Design studies for a fast ramped high field superconducting septa", Presented in FCC Week 2016.
- [8] A. Smirnov *et al.*, "A pulsed superconducting dipole magnet for the Nuclotron", J. Phys. Colloques 45, C1 (1984).
- [9] K. Sugita *et al.*, "Basic design aspects for superconducting high field septa", Phy. Rev. Accel. and Beams FCC special edition (submitted).