

重粒子線小型シンクロトロン用超伝導電磁石のヨーク形状最適化

YOKE SHAPE OPTIMIZATION OF THE SUPERCONDUCTING MAGNET FOR A COMPACT HEAVY ION SYNCHROTRON

藤本哲也^{#,A)}, 水島康太^{B)}, 岩田佳之^{B)}, 野田悦夫^{B)}, 浦田昌身^{B)}, 松葉俊哉^{B)}, 宮武立彦^{B)},
天野沙紀^{C)}, 高山茂貴^{C)}, 折笠朝文^{C)}, 吉行健^{C)}

Tetsuya Fujimoto^{#,A)}, Kota Mizushima^{B)}, Yoshiyuki Iwata^{B)}, Etsuo Noda^{B)}, Masami Urata^{B)}, Syunya Matsuba^{B)},
Tatsuhiko Miyatake^{B)}, Saki Amano^{C)}, Shigeaki Takayama^{C)}, Tomofumi Orikasa^{C)}, Takeshi Yoshiyuki^{C)}

^{A)} Accelerator Engineering Corporation (AEC)

^{B)} National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

^{C)} Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation (ESS)

Abstract

A synchrotron employing superconducting technology has been developing at QST to realize a compactness and low-cost facility for carbon ion radiotherapy. This superconducting magnet is adapting a conducting cooling system to realize a repeating operation from 0.3T to 3.5T with a ramp rate of 0.7T/s. When using superconducting magnet for synchrotron that continuously change the magnetic field, it is important to lower the magnetomotive force as much as possible so as to reduce the risk of quench. It is possible to decrease the magnetomotive force by closing the distance between superconducting wire and iron yoke. However, the closer the distance under high magnetic field, magnetic field stability becomes worse due to the saturation of the magnetic field density in the iron yoke. Therefore, we considered the optimal yoke shape so as to keep a good field stability no matter if the yoke is in saturated condition. As a result of the optimization, it was found that the maximum excitation current would be reduced approximately 4.5%.

1. はじめに

量研機構(QST)では重粒子線がん治療装置の更なる普及を目指し、小型かつ低コストとなる加速器の開発を進めている[1]。この小型シンクロトロンには超伝導技術を利用し、また二極コイルと四極コイルを同心上に重ねて巻く機能結合型[2]を採用することで既存の普及型シンクロトロンの周長 63m の半分以下となる周長 29m 程度を目指している[3]。本超伝導シンクロトロンは曲率半径 $\rho=1.89\text{m}$ 、90 度の偏向電磁石 4 台で構成され、0.3T から 3.5T の磁場を連続的に 10 秒周期で上げ下げを実現する冷凍機伝熱冷却方式を採用し、 $q/A=1/2$ のイオンを 4 MeV/u から 430 MeV/u まで加速する。Table 1 は本超伝導電磁石に要求される仕様をまとめたものである。現行の巻き線機の都合上 45 度のコイルを 2 つ近接に配置することで 90 度の偏向電磁石としている。マルチターン入射を採用することから必要な安定磁場領域は水平・垂直で異なるため、二極磁場の起磁力を下げるために楕円形状のコイル配置を採用することとした。またシンクロトロンのシミュレーション結果を参照し、有効磁場領域は可能な限り狭く、磁場安定度に関しては可能な限り緩和することで、コンパクトで低い起磁力となるように検討してきた。これまでの検討では、新たに開発した $\phi 1\text{mm}$ の低 AC ロス線を採用することを想定し、負荷率 70%@4.2K 程度に収まるように励磁電流を決定していた。その結果、二極コイルで最大励磁電流 268A、必要なコイルターン数を 1070Turn/pole としていた。[4, 5]

Table 1: Specifications for the Superconducting Magnet

Bending angle	[deg]	90 (45×2)
Bending radius	[m]	1.89
Field ramp speed	[T/s]	0.7
Maximum dipole field	[T]	3.5
Maximum field gradient	[T/m]	1.5
Effective magnetic field for injection beam (Hori., Vert.)	[mm]	(±30, ±19)
Effective magnetic field for extraction beam (Hori., Vert.)	[mm]	(±47, ±8)
Field uniformity (dipole)		$< \pm 2.5 \times 10^{-4}$
Field uniformity (quadrupole)		$< \pm 1 \times 10^{-3}$

一方、鉄ヨーク形状は低磁場(0.3T)から鉄ヨーク中の磁束密度に飽和の影響が出る高磁場(3.5T)まで、すべての磁場範囲に対して磁場安定度が仕様の範囲内に収まるように設計する必要がある。コイルとヨークの間隔を狭めるほどボア内磁場強度に対するヨークの寄与が大きくなり起磁力を低減することが可能となるが、この間隔を狭めるほど鉄ヨーク中の磁束密度が高くなることからヨーク中磁束密度の飽和により高磁場側の磁場安定度が悪化する。そのためこれまでは飽和領域においても良好な磁場安定度を保てるようにコイルとヨークの間隔を決定していた。ここでは、起磁力の更なる低減を目的に、ヨーク形状を最適化することで鉄ヨーク飽和状態における磁場

[#] t.fujimoto@aec-beam.co.jp

安定度を改善する検討を行ったので報告する。

2. ヨーク形状最適化による起磁力低減

2.1 コイル

本超伝導電磁石では $\phi 1\text{mm}$ の低 AC ロス線(モノリス線)をサーフェスワインディング法によりコイル巻枠上に三次元巻線を行う。必要な磁場を得るために、二極コイル 22 層、四極コイル 2 層の構成とした。Figure 1 はコイル断面配置を示している。コイル巻き枠上にまず四極コイル 2 層を巻き、アルミ冷却シートを挟んで二極コイル 22 層を巻く構成となっている。各コイルの層間には絶縁シートが巻かれるが、コイルは $q=1.89\text{m}$ の湾曲状に巻くため内径側の絶縁シートが一部重なり、層間が広がってしまうことが過去の巻き線実績から分かっている。内径側のみ層間が広がると四極磁場が発生する。そこで、四極コイル、および二極コイル 4 層目、10 層目、16 層目を巻いたあとに 0.5mm の成型層を設けて内外径の差をリセットする方法を考案し、採用した。また、湾曲形状により発生するマルチポール成分の補正は、これまで最外層のコイルを使用していたが、内外系のエラーが小さい成型層直後の 17、18 層目で行うこととした。

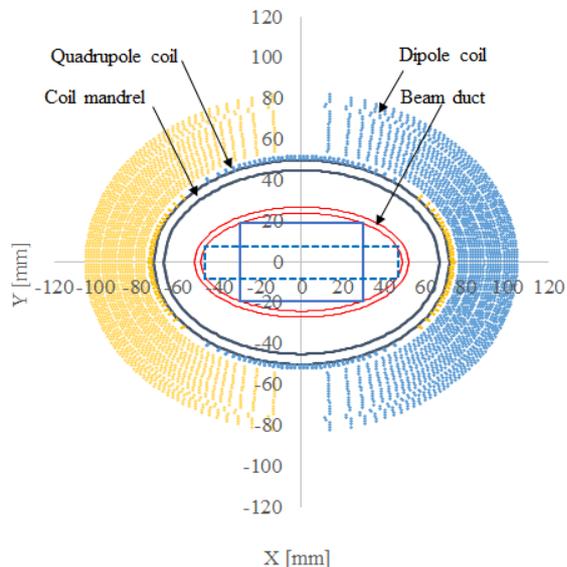


Figure 1: Cross-sectional view of the superconducting coil. Dipole and quadrupole coils are wound up on the coil bobbin concentrically.

2.2 ヨーク形状の最適化

ヨーク形状の最適化について、まずヨーク外径について考える。ヨーク中磁束密度が飽和領域にある状態において、垂直方向ヨーク厚を変化させるとボア中の二極磁場安定度が変化する。この現象を利用し、ヨーク外径の最適化を行った。Figure 2 は磁場安定度および中心磁場の垂直方向ヨーク厚依存性を示している。垂直方向ヨーク厚を薄くしていくと鉄ヨークの磁束の飽和は進み中心磁場は下がっていくが、磁場安定度は改善する傾向が見られる。飽和が進むことでヨーク中の磁束の分布が変化し、磁場分布に影響を与えていると考えられる。飽和が進むことで中心磁場は下がるが、磁場安定度が改

善することでよりコイルとヨークの間隔を詰めることができることから、総合的に起磁力を下げるができる。

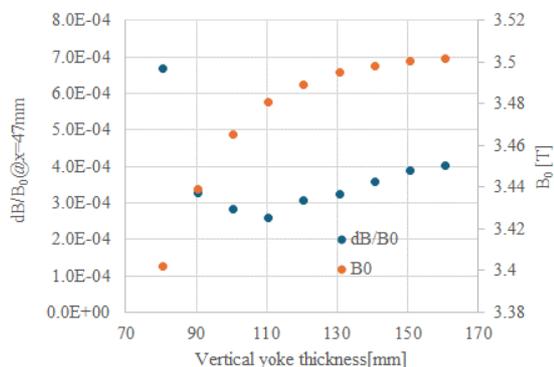


Figure 2: Dependence of magnetic field stability on vertical yoke thickness.

次にヨーク内部の磁束の流れを調整する穴を開けて磁場安定度を改善し、更なる起磁力の低減について検討を行った。鉄ヨークの正規化ガウスネットワークを用いたトポロジー最適化解析[6]の結果から、鉄ヨークの飽和による二極磁場中のマルチポール成分の低減に大きく寄与する穴の位置がおおよそ分かり、そこから穴のサイズ、位置を微調整することで穴の位置を決定した。Figure 3 に決定したヨーク穴の配置を示したヨーク断面形状を示す。穴のサイズは $\phi 31$ とし、上下左右対称に 4 か所に配置することとした。この穴を開けることで高磁場側での磁場安定度が改善することから、ヨークとコイルの間隔を近づけることができる。穴が無い状態でのヨーク内径楕円の寸法は $(a, b) = (125.0, 109.4)$ としてたが、穴を開けることで $(a, b) = (117.2, 100.4)$ まで近づけることが可能となった。これにより、中心磁場 $B_0=3.5\text{T}$ を得るのに必要な励磁電流は 268A から 256A まで 4.5% 低減できた。

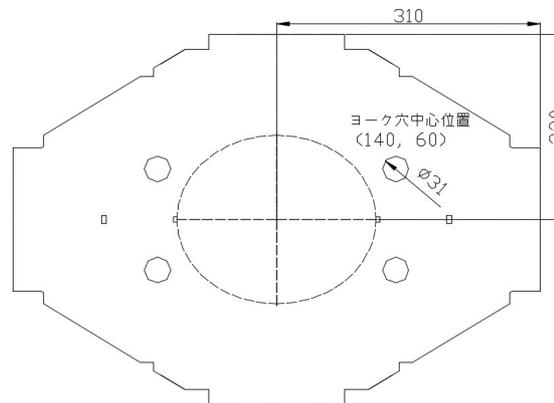


Figure 3: Cross-sectional view of yoke with an arrangement of yoke holes which are used for an adjusting a magnetic flux flow.

Figure 4 はヨークに穴開けた前後のヨーク断面磁束密度を示している。ヨークに穴を開けると、この穴付近の磁束密度がかなり高くなっていることが分かる。ヨーク中の最大磁束密度は旧ヨーク形状で 2.3T に対して、穴を開けると 2.6T となり、磁束密度の飽和はかなり進んだ状態

になる。ヨーク中の磁束は影像電流としてボア中の磁束に寄与する。ヨークの飽和により主に二極磁場中に六極磁場が生じるが、穴付近の磁束がボア中の六極磁場を打ち消す方向に働くものと考えられる。

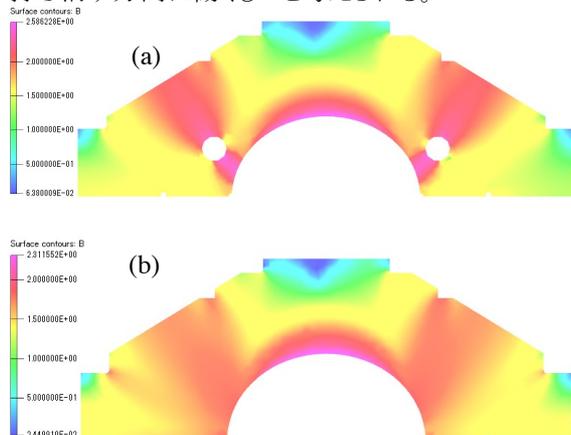


Figure 4: Color map of magnetic flux density in yoke cross section. (a) and (b) show the case with and without hole (old yoke shape), respectively.

励磁電流を低減できたことで負荷率についてどの程度低減できるか計算により求めた。Figure 5は超伝導コイルの負荷曲線を示している。超伝導コイルには新たに開発した $\phi 1$ mm の低 AC ロス線の使用を想定し、その線成績値を計算に使用した。また、コイル経験磁場は 3D 計算の結果から 4.23T を使用している。ヨークに穴を開けることで最大励磁電流が 268A から 256A に下がり、これにより負荷率は 70.3%とヨーク最適化前と比較して 1.9%の低減が出来ている。これにより 256A で動作時の臨界温度は 5.84K となり、温度マージンは 1.64K と穴無しの旧ヨーク形状から 0.1K ではあるが余裕が出来ている。

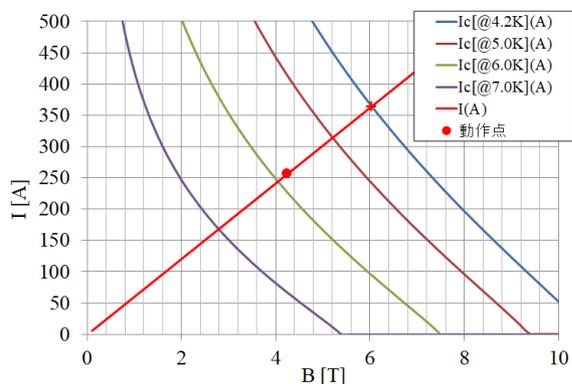


Figure 5: Load line of the superconducting dipole coil. A load factor of 70.3% is obtained, which is 1.9% lower compare with a without hole.

3. 二極コイルの 3D 磁場計算

起磁力低減のため改善を行ったヨーク形状で二極コイルの 3D 磁場計算を行い、磁場安定度について要求

仕様を満たしているか確認する。計算には 3D 電磁場解析ソフト Opera-3Dを使用した。湾曲させたときに生じる四極成分をキャンセルするために 17、18 層目にはキャンセル分の $\cos^2 \theta$ を乗せたコイル配置を作成した。本シンクロトロンでは $q/A=1/2$ のイオンを 4MeV/u で入射、430MeV/u まで加速を行うが、それぞれのエネルギーに相当する磁場である 0.3T と 3.5T となる。これらの磁場について磁場安定度を求めた結果を Figure 6 に示す。二極磁場安定度の仕様は $x=\pm 30\text{mm}$ において $dBy/By_0 < \pm 2.5 \times 10^{-4}$ としているが、低磁場、高磁場ともに十分その条件を満たしている。高磁場においては $dBy/By_0 < \pm 5 \times 10^{-5}$ @ $x=30\text{mm}$ と余裕のある設計としている。これは、穴あきヨークでは鉄ヨーク中の磁束密度の飽和が進んだ状態になることから、電磁鋼板の占積率や B-H 曲線のちょっとしたずれに影響を受けやすいため、余裕を持たせたためである。

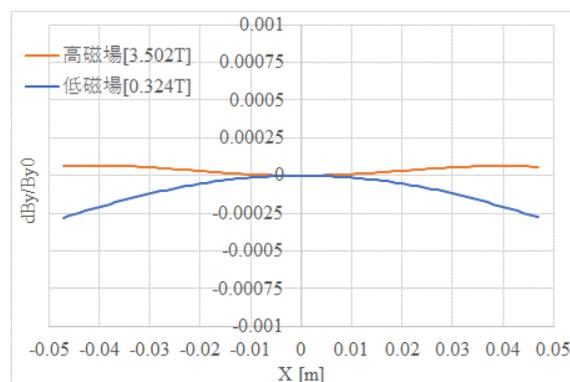


Figure 6: Magnetic field stability of the superconducting dipole magnet with hole in yoke.

Figure 7はヨークの穴有無しでの磁場安定度の比較である。穴無しでは中心磁場 3.5T を得るのに必要な励磁電流は 253A となり、穴有りでの 256A に対して-1.2%の励磁量で済むが、磁場安定度は $x=30\text{mm}$ において $dBy/By_0 = \pm 6.5 \times 10^{-4}$ となり磁場安定度の仕様を満たすことができていない。

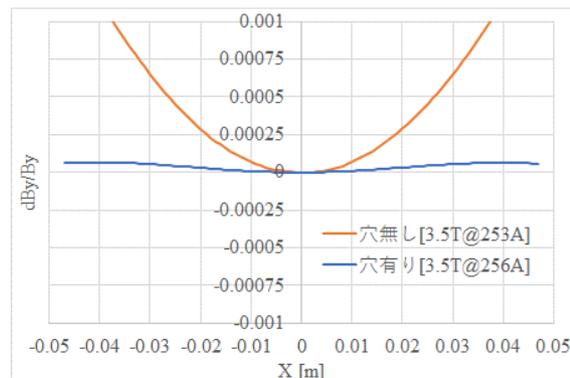


Figure 7: Comparison of dipole magnetic field stability with and without holes in yoke.

以上、3D 計算の結果から求まる二極コイルに関する各パラメータを Table 2 にまとめる。

Table 2: Magnetic Field Characteristics of the Dipole Coil

Magnetomotive force	[kAT/pole]	273.92
Maximum excitation current	[A]	256
Magnetic field	[T]	3.50
Effective length	[mm]	1481.434
Stored energy	[kJ]	184.59
Inductance	[H]	5.63
Excitation voltage	[V]	262.36

4. まとめ

量研機構で進めている量子メスプロジェクトの実現に向けて、これまでシンクロトロン用超伝導電磁石の設計を進めてきた。今回、ヨーク形状の最適化により起磁力を低減する検討を行った。ボア内磁場強度を変えることなく起磁力を下げるためにはヨークとコイルの間隔を近づけることが効果的であるが、近づけることでヨーク中磁束

密度の飽和が進み、磁場安定度が悪化する。この磁場安定度の悪化をヨークに穴を開けることで緩和できることを利用し、穴の位置、サイズの最適化を行った。結果、これまでのヨーク形状に対して励磁電流が 268A から 256A に 4.5% 下げることが可能となった。

現在、今回の検討結果も踏まえて電磁石の製作を進めているところである。

参考文献

- [1] <https://www.qst.go.jp/site/qst-kakushin/39695.html>
- [2] Y. Iwata *et al.*, "Development of Curved Combined-Function Superconducting Magnets for a Heavy-Ion Rotating Gantry", IEEE Trans. Appl. Supercond., 24, 2004, 4400505.
- [3] K. Mizushima *et al.*, proceedings of PASJ2017, WEP131.
- [4] T. Fujimoto *et al.*, proceedings of PASJ2020, FRPP49.
- [5] T. Fujimoto *et al.*, proceedings of PASJ2021, MOP002.
- [6] Y. Yang *et al.*, Topology Optimization Using a Normalized Gaussian Network of Iron Yoke for Magnetic Field Design of an Accelerator Superconducting Magnet, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 33, No. 5, 2023.