

SuperKEKB ビーム衝突点用超伝導 4 極電磁石プロトタイプの製作と試験結果

CONSTRUCTION AND COLD TESTS OF THE PROTOTYPES OF THE SUPERCONDUCTING QUADRUPOLE MAGNETS FOR THE SUPERKEKB IR

有本 靖, 大内 徳人, 東 憲男, 山岡 広, 土屋 清澄, 宗 占国, 大木 俊征

Yasushi Arimoto, Norihito Ohuchi, Norio Higashi, Hiroshi Yamaoka, Kiyosumi Tsuchiya, Zhanguo Zong, Toshiyuki Oki, Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

In SuperKEKB, upgrade of KEKB is in progress to increase collision frequency (luminosity) between an electron and a positron beam by 40 times from KEKB. Beam-final-focus system consists of four doublets of the superconducting quadrupole magnets and eight sets of superconducting quadrupole magnets are installed into a beam collision region. QC1P (installed on a positron beamline) and QC1E (installed on an electron beamline) nearest to the colliding point has a small inner radius of superconducting coil and high field qualities are required. In High Energy Accelerator Research Organization, prototypes for these two quadrupole magnets were manufactured and excitation examination and magnetic field measurement were performed. Here, we report manufacture of this prototype and the test result under liquid helium temperature.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では、電子・陽電子衝突型加速器である KEKB の性能を 40 倍まで高めた SuperKEKB 加速器の建設が進められている [1]。SuperKEKB では電子・陽電子ビームの衝突点においてそれぞれのビームが鉛直方向に約 50 nm まで収束される。このビームの収束は衝突点近傍に設置される 8 台の超伝導 4 極電磁石によって行なわれる。SuperKEKB のアップグレードではこれら 8 台の最終収束超伝導 4 極電磁石が新たに設計・製作される [2]。現在、設計は完了し、実機の製作が進められている。今回、実機の製作に先立ち、最終収束系超伝導 4 極電磁石である QC1P 及び QC1E のプロトタイプ機を製作し、低温試験を行なったのでこれらの試験結果について紹介する。

2. QC1 プロトタイプ機

衝突点用超伝導電磁石システム (QCS) は電子・陽電子ビームラインに組み込まれる超伝導 4 極電磁石ダブルレットから構成されている (図 1)。今回製作したのは衝突点に近い電子ビーム用 QC1E (または QC1RE) 及び陽電子用 QC1P (または QC1RP) のプロトタイプ機である。ここで、それぞれのプロトタイプ機を "QC1E" 及び "QC1P" と呼ぶ。QC1E 及び QC1P の断面図を図 2 に示す。QC1E にはカラーの外周に磁気遮蔽のための鉄ヨークが組込まれる。これらは QCS の 4 極電磁石の中で内半径が 33 mm, 25 mm と小さいため、特に高い製作精度が要求される。

磁場性能を評価するため、電磁石サイズ、コイル形

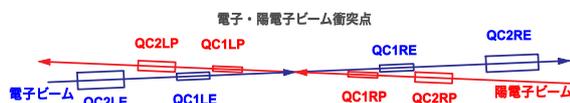


Figure 1: Schematic layout of the final-focus-quadrupole-magnet system (plan view).

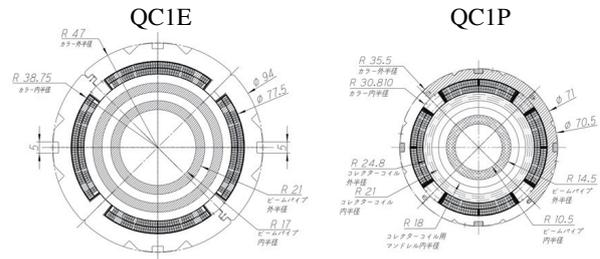


Figure 2: Cross sectional views of QC1E (left) and QC1P(right). QC1E has iron yokes outside of colors but it is not drawn in this figure.

状、発生磁場勾配は実機と同じ設計となっている。

プロトタイプ機の製作は KEK において行なわれた。製作は主に以下の工程で行なわれた。

1. 巻線
2. キュアー
3. カラーリング
4. スプライス処理

巻線工程において超伝導ケーブルをマンドレルと呼ばれる型枠に巻き付け、キュアー工程でマンドレルに巻線されたケーブルを型に羽目込み、加温、圧縮をして成型した。巻線工程、キュアー工程を 4 極分繰り返した後、これらを円筒ボビンへ円筒形状に組み込み、その外側にカラーを組み込んで外側から加圧することにより 4 極電磁石の円筒形状にした。QC1E においてはさらにその外側に鉄ヨークを組み込んだ。最後にスプライス処理で、各磁極間のリード部をはんだ付けにより結線した。

磁場精度を高めるためにコイルの各部品は 50 μm の精度で製作された。特にコイル断面でのスペーサーであるウェッジについては直線部の多極成分に影響するため、3 次元測定器 (FARO Gage Plus) を用いて寸法を測定した上で使用した。図 3 は QC1P に用いられたウェッジの典型的な寸法測定の結果である。実線と点線はウェッジの寸法測定位置の違いを表わし、マーカーの色と形状の違いはウェッジのシリアル番号の違いを表わしている。

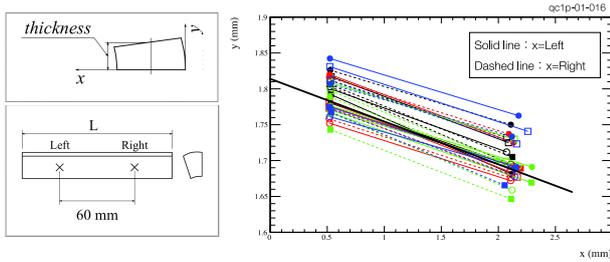


Figure 3: The typical measured sizes of cross section of QC1P wedges. A left-upper figure is a schematic cross section of a wedge and a definition of axis in a right plot. Here, x and y are radial and azimuthal-angle direction when the wedge installed in a magnet, respectively. A left-lower figure shows measured position of a wedge height. The right plot shows measured height of wedge surface as a function of x . Differences in color and symbol indicate serial number of the wedges. A solid-thick-black line indicates design value.



Figure 4: Photograph of QC1E prototype superconducting magnet.

また黒の太い実線は設計値を表わしている。この図より、 y 方向の厚みの最大値-最小値の差はおよそ 50 μ m であることがわかる。

完成した QC1E と QC1P プロトタイプ機の外観写真を図 4-5 に示す。1 台の電磁石の製作期間は約 1ヶ月であった。

3. 低温試験結果

完成した QC1E、QC1P プロトタイプ機は縦型液体ヘリウムクライオスタット内に設置され、液体ヘリウム温度 (4.2 K) に冷却、励磁試験、磁場測定が行なわれた。磁場測定はハーモニックコイルを用いて行なわれた。ハーモニックコイルはロングタイプ (長さ: 600 mm) とショートタイプ (長さ: 40 mm) の 2 種類を使用した。

3.1 QC1E

図 6 は電流の関数として QC1E の発生する最大磁場 (○)、温度 4.2 K (◇) 及び 4.7 K (●) の時のケーブルが超伝

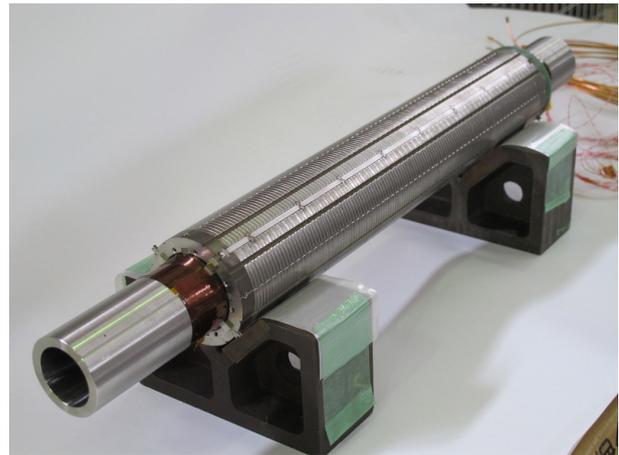


Figure 5: A photograph of QC1P prototype superconducting magnet.

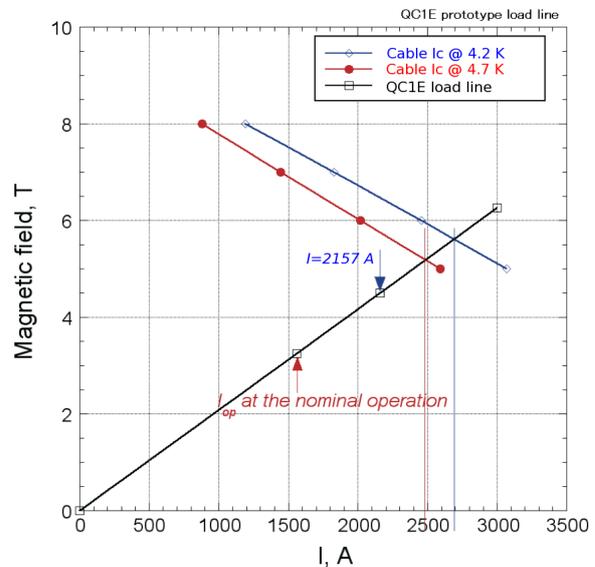


Figure 6: A load line of QC1E prototype (open squares). B-fields as a function of critical current for superconducting cable at temperature of 4.2 K (open diamonds) and 4.7 K (closed circle).

導状態を保持出来る最大磁場をプロットしたものである。4.2 K は本測定でのクライオスタット内温度であり、4.7 K は SuperKEKB 運転時の最大温度である。今回の励磁試験では (電源リミットである) 2157 A までクエンチなしで励磁できた。この電流値は SuperKEKB における運転温度 4.7 K での臨界電流値に対して 13% のマージンを持っている。次にショートタイプのコイルを用いてビーム軸 (z 軸) 方向の磁場分布を測定した (Z スキャン)。Z スキャンで得られた 4 極成分の磁場分布を図 7 に示す。この時の励磁電流は定格通電電流である 1561 A とした。コイル直線部において磁場勾配は $G=70.07$ T/m であった。これらの磁場測定結果と励磁試験結果を合わせると QC1E が加速器運転上必要とされる 4 極磁場を十分な運転マージンをもって発生出来ると言える。しか

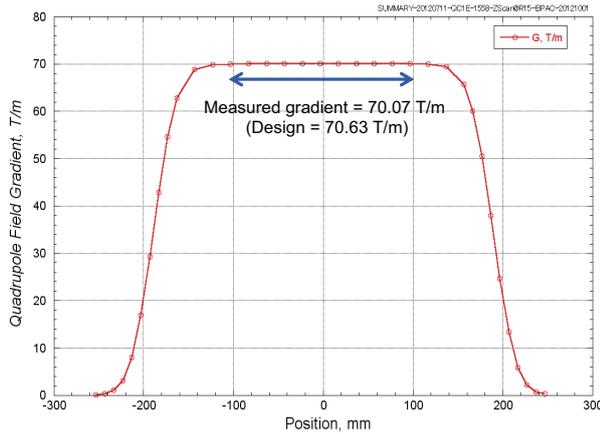


Figure 7: The profile of quadrupole components for QC1E as a function of a beam-axis position.

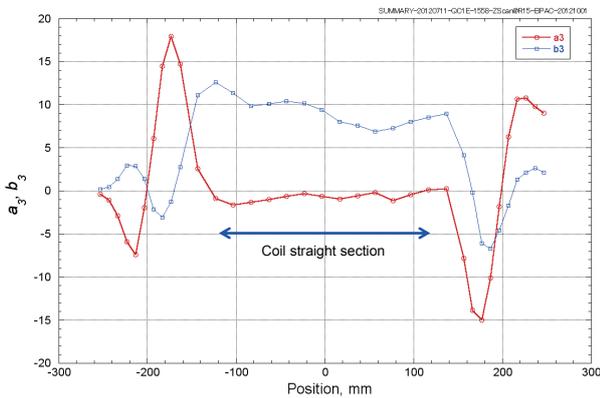


Figure 8: Profiles of sextupole components for QC1E as a function of a beam-axis position. Open circles and open squares indicate skew components and normal components, respectively. Reference radius=15 mm. $a_n = A_n/B_{2z=0} = 10000$, $b_n = B_n/B_{2z=0} = 10000$.

し磁場勾配の測定値は設計値よりも約0.1%小さめの値となっている。

図8に参照半径を15mmとした時のZスキャンで得られた6極磁場成分を示す(○:スキュー6極、□:ノーマル6極)。ノーマル成分はコイル直線部において、7-10、エンド部においてはスキュー成分は17と大きな値を示している。

次に、ロングコイルを用いた積分磁場の測定結果を表1に示す。Zスキャン測定でも見られたように、高次の磁場エラー成分のうち6極磁場成分は大きく、その大きさはスキュー、ノーマル成分についてそれぞれ $a_3 = 1.78$ 、 $b_3 = 8.59$ である。

3.2 QC1P

図9にQC1Pの励磁試験結果を表示する。励磁試験では、QC1Eと同様に2100Aまでクエンチなしで励磁できた。この電流値はSuperKEKBにおける運転温度4.7Kでの臨界電流値に対して約32%のマージンを持っている。

ショートコイルによるZスキャン測定では通電電流

Table 1: Measured multipole components for QC1E prototype with the long coil. Excitation current: 1561.7 A. Reference radius: 15 mm.

n	a_n	b_n
2	0.00	10000
3	1.78	8.59
4	0.44	-0.68
5	0.23	-1.83
6	-0.39	-1.85
7	-0.09	0.10
8	0.69	-0.02
9	0.51	-0.09
10	-0.10	-0.62

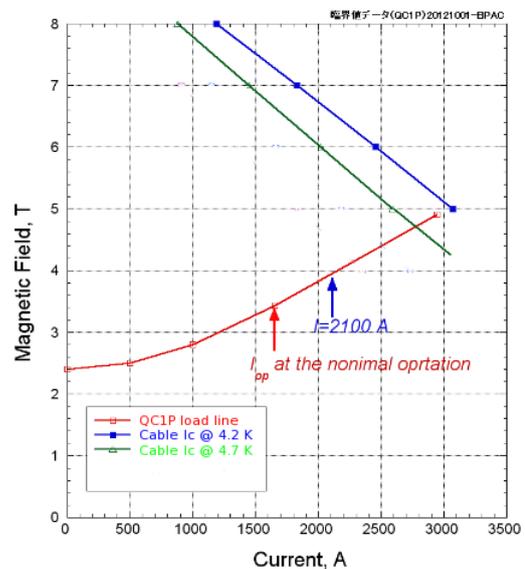


Figure 9: A load line of QC1P prototype (open squares). B-fields as a function of critical current for a superconducting cable at temperature of 4.2 K (closed squares) and 4.7 K (open triangles).

1626 Aにおいて、 $G=68.38$ T/mが得られた(図10)。コイル直線部では一様な分布が得られている。測定値は設計値よりも約0.1%小さめの値となっているが、これらの磁場測定結果と励磁試験結果を合わせるとQC1Pが加速器運転上必要とされる4極磁場を十分な運転マージンをもって発生出来ると言える。

一方、6極成分については図11に示されるように、コイル直線部では4極磁ノーマル成分10000に対し $a_3 = 1$ 、 $b_3 = 2$ であり、エンド部では $a_3 = 10$ 、 $b_3 = 20$ と大きな値を示している。このプロットにおいて参照半径は10mmとした。また、ロングコイルで測定した積分磁場の多極成分を表2に示す。この結果においても、6極磁場成分は $a_n = 2.82$ 、 $b_n = 3.66$ であり、大きなエラー成分を示している。

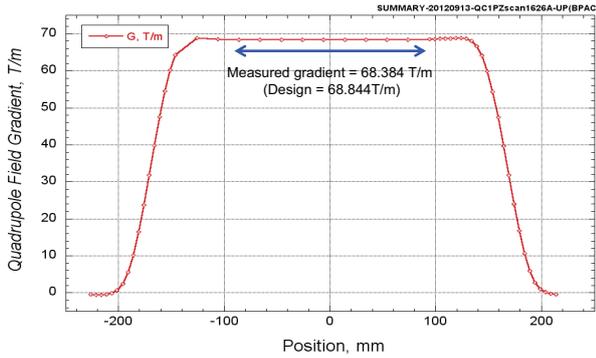


Figure 10: A profile of quadrupole components for QC1P as a function of a beam-axis position.

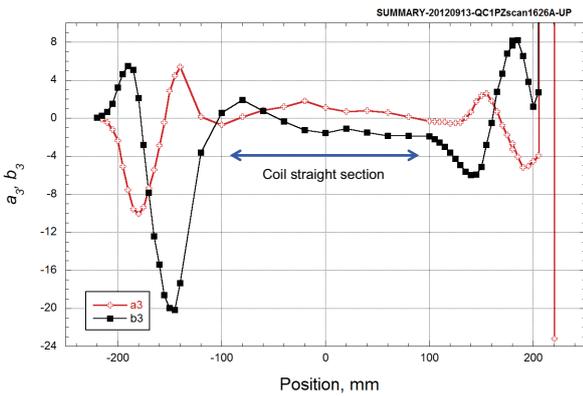


Figure 11: Profiles of sextupole component for QC1P as a function of a beam-axis position. Open crosses and closed squares indicate skew components and normal components, respectively. Reference radius=10 mm. $a_n = A_n/B_{2z=0} \quad 10000$, $b_n = B_n/B_{2z=0} \quad 10000$.

4. まとめと考察

SuperKEKBにおいて衝突点でのビーム収束には8台の超伝導4極電磁石が用いられる。

今回ここで用いられるQC1E、QC1Pのプロトタイプ電磁石の製作及び低温試験を行なった。電磁石の製作はKEKで行なわれ、製作期間は一台当たり1ヶ月であった。励磁試験においては運転電流以上でもクエンチ無しで励磁された。ノーマル4極磁場の大きさ、ビーム軸方向の分布はビーム光学設計において要求される仕様を満たしていることが確認された。

しかしながら、磁場勾配は設計値に対して0.1%小さい値となった。この原因は設計段階で超伝導ケーブルのヤング率を1桁小さく見積っていたためコイル半径が、QC1Eは280 m、QC1Pは250 m、大きくなってしまったことが原因と考えられる。

また6極成分についてはコイル半径が大きくなったことにより、コイルと円筒形のポビンとの間に間隙が生じ、コイル断面がダイポール変形してしまったためと考えられる。実際に変形量を36 mとすると測定された大きさの誤差6極成分が発生することが計算によって確認された。

現在、製作が進められている実機の設計にはこれら

Table 2: Measured multipole components for QC1P prototype with the long coil. Excitation current is 1701.66 A and reference radius is 9.54 mm.

n	a_n	b_n
2	0.00	10000
3	2.82	3.66
4	2.08	0.24
5	0.35	0.23
6	0.03	-0.59
7	0.07	0.13
8	0.03	0.01
9	-0.08	0.05
10	0.02	0.01

の結果が反映されたものとなっている。

5. 謝辞

本研究を行なうに当たり、励磁試験、磁場測定に於いて三菱電機システムサービス株式会社田中学氏、株式会社日立プラントテクノロジー遠藤友成氏の高い技術サポートを受けることが出来、感謝致します。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi, *et. al.*, Accelerator design at SuperKEKB, Progress of Theoretical and Experimental Physics 2013 (3). doi:10.1093/ptep/pts083.
- [2] N. Ohuchi, *et. al.*, Design of the superconducting magnet system for the SuperKEKB interaction region, in: Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2012, p. 21.