

SuperKEKB ビーム最終収束用超伝導電磁石システム(7-1) -ビーム最終収束システムの建設状況-

Superconducting Magnet System for the Interaction Region of SuperKEKB (7-1) -Construction Status of the Beam Final Focus System-

大内 徳人, 有本 靖, 川井 正徳, 近藤 良也, 宗 占国, 王 旭東, 山岡 広, 土屋 清澄, 青木 香苗, 植木竜一(高エネ研); WANDERER P., PARKER B., ANERELLA M., MARONE A., JAIN A. (BNL); 金 太炫(三菱電機); 河村 郁生(日立プラメカ) OHUCHI Norihito, ARIMOTO Yasushi, KAWAI Masanori, KONDOU Yoshinari, ZONG Zhanguo, WANG Xudong, YAMAOKA Hiroshi, TSUCHIYA Kiyosumi, AOKI Kanae, UEKI Ryuichi (KEK); WANDERER Peter, PARKER Brett, ANERELLA Michael, MARONE Andy, JAIN Animesh (BNL); Kim Tae-hyun (Mitsubishi Electric Corp.); KAWAMURA Ikuo (Hitachi Plant Mechanics)
E-mail: norihito.ohuchi@kek.jp

1. SuperKEKB 電子・陽電子加速器

高エネルギー加速器研究機構では, KEKB 加速器・Belle 素粒子検出器を用いて, 1999 年から電子・陽電子ビームの衝突実験を 10 年間行い, 2001 年には粒子・反粒子の対称性の破れを発見し, また「小林・益川理論」の検証を行うなどの成果をあげてきた。2010 年からは加速器の衝突性能を 40 倍向上させる SuperKEKB 加速器へのアップグレードを行っており, 2016 年 6 月には, 電子・陽電子ビームを衝突点で最終形状(〜50nm)まで収束する超伝導電磁石システムを除いた加速器の調整運転(Phase-1)を完了した。超伝導電磁石システムは, 衝突点左側のシステム(QCSL)が 2016 年 10 月に完成し, 2 か月の冷却試験を終えた。衝突点右側のシステム(QCSR)は, 今年 3 月に完成し, Belle-II 超伝導ソレノイド・QCSL も含めた全システム冷却運転の準備段階にある。本発表では, SuperKEKB ビーム最終収束超伝導電磁石システムの構成, 超伝導電磁石・クライオスタットの製作, システムの建設状況と今後の運転スケジュールについて報告する。

2. ビーム衝突用超伝導電磁石システム

超伝導電磁石システムは, 総数 55 台の超伝導電磁石から構成され[1], 2 台のクライオスタットに分割して組込まれている。Fig. 1 に, ビーム衝突点に設置された 2 台のクライオスタットの断面図を示した。電子・陽電子ビームは, 8 台の超伝導 4 極電磁石[2]で収束される。衝突点でビームサイズ〜50nm(縦方向)のビームを衝突させる為, ビーム制御用の補正磁石が 43 台組込まれている。補正磁石は, 2011 年から米国 BNL 研究所と共同開発し, 2015 年 2 月には全磁石の製作を完了した。電子・陽電子ビームは 1.5T の Belle 測定器超伝導ソレノイド磁場中を 83mrad の交差角で衝突点に入射される為, ビームはソレノイド磁場の影響を著しく受ける。この磁場の影響を積分的にキャンセルする補正超伝導ソレノイド 4 台[3]が, 4 極磁石と補正磁石の外周部に取付けられている。

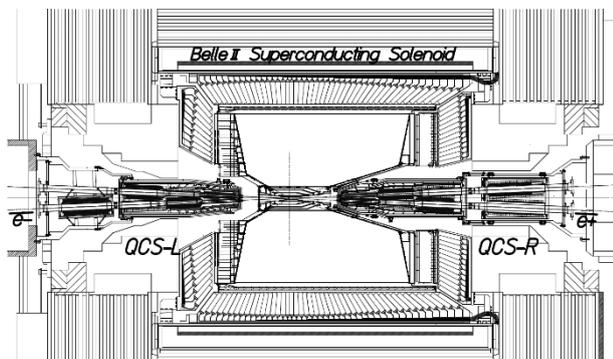


Fig.1 Beam final focus superconducting magnet systems for the SuperKEKB Interaction Region (IR)

3. 冷却システム

2 台のクライオスタットは, 個別の同じ冷凍能力(250W @ 4.4K)を持つヘリウム冷凍機システムで冷却される[4]。ヘリウム冷凍機は, 1990 年に製作された TRISTAN 加速器 QCS の冷却に使用された 4 台の内の 2 台で, 1 台は KEKB 加速器で継続して使用されていたが, 他 1 台はヘリウム圧縮機も含めて 1996 年から 20 年間保管されていたものである。

KEKB ビーム最終収束システムでは 10 台の超伝導電磁石を 1 台の冷凍機で冷却した。SuperKEKB では超伝導電磁石が 55 台使用されることから, 電流リード・クライオスタット熱負荷の増加[5]に対応する為, 2 台のヘリウム冷凍機システムが用いられる。また, 連続運転に対応できるよう, モニターシステム[6]の増強も行っている。

4. システム建設の現状と今後の運転スケジュール

Fig. 2 に SuperKEKB ビーム衝突点に設置された 2 台の QCS クライオスタットの写真を示した。QCSL クライオスタット(加速器リング外周からの写真の為, 右側)は, 2015 年 12 月に KEK に納品され, ビームラインに設置される前に冷却試験を地上部実験室で 6 か月間行い, 励磁・磁場・断熱性能を確認した。QCSL クライオスタットは, 2016 年 8 月に SuperKEKB ビームラインに据付け, 冷凍機による冷却試験・励磁試験を完了した。QCSR クライオスタットは 2017 年 2 月にビームラインに設置され, その後, 低温配管・パワーケーブル配線工事を 3 月に完了した。QCSL・QCSR システム及び Belle ソレノイドを含めた複合励磁試験は, 今年 5 月〜8 月の期間行い, ビーム運転状態の磁石磁場の測定を行う。この試験後, ビームパイプの取付けを行い, 2018 年 2 月よりビーム運転(Phase-2)を 5 か月行う予定である。

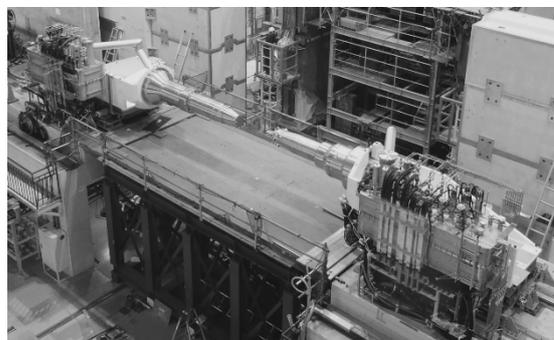


Fig.2 Two QCS magnet-cryostats for the SuperKEKB IR

参考文献

1. N. Ohuchi, et al.: *Proc. of NA-PAC' 13*, Pasadena, Sept. 2013, pp. 1232-1234; <http://www.JACoW.org>
- 2, 3, 4, 5, 6. Abstracts of CSJ this conf., 2C-a02, 2C-a03, 2C-a04, 2C-a05, 2C-a06

SuperKEKB ビーム最終収束用超伝導電磁石システム (7-2)

- 超伝導 4 極電磁石の磁場性能 -

Superconducting Magnet System for the Interaction Region of SuperKEKB (7-2)

- Field quality of superconducting quadrupole magnets -

有本 靖, 川井 正徳, 近藤 良也, 宗 占国, 土屋 清澄, 山岡 広, 王 旭東, 大内 徳人 (KEK/総研大); 金 太炫 (三菱電機)
 ARIMOTO Yasushi, KAWAI Masanori, KONDOU Yoshinari, ZONG Zhanguo, TSUCHIYA Kiyosumi, YAMAOKA Hiroshi,
 WANG Xudong, OHUCHI Norihito (KEK/SOKENDAI); KIM Tae-hyun (Mitsubishi Electric)
 E-mail: yasushi.arimoto@kek.jp

1. はじめに

現在 KEK において建設が進められている SuperKEKB は KEKB の 40 倍のルミノシティを目標として設計された電子/陽電子円形コライダーである [1]. このルミノシティを達成する上で鍵となる要素の 1 つが最終収束超伝導電磁石システム (QCS) である. QCS は衝突点領域 (IR) に設置され電子、陽電子ビームを約 50 nm のサイズに絞り込む役割を担う. 衝突点 (IP) を挟んで 2 台のクライオスタットから構成され、それぞれのクライオスタットには超伝導 4 極電磁石が 4 台ずつ格納されている. 各 4 極電磁石には磁場エラーを補正するための補正電磁石が組み込まれている. さらに Belle-II 検出器のソレノイド磁場 (1.5 T) をビーム軸に沿った積分値でキャンセルするための補償ソレノイドが 2 台のクライオスタット内に計 4 台設置されている [2].

QCS-L は 2015 年 12 月に納品され、2016 年 8 月 (QCS-R は 2017 年 2 月) に、SuperKEKB 衝突点領域 (IR) にインストールされた. (IP を挟んで加速器リング中心から見て左側のクライオスタットを QCS-L、右側のクライオスタットを QCS-R と呼んでいる.)

QCS-L については IR へのインストールに先立ち、KEK の超伝導低温真空実験棟において、3 月から 4 月にかけて冷却励磁試験、ハーモニックコイルによる磁場測定が行なわれた. 4 極電磁石単体での縦型クライオスタットによる磁場測定の結果についてはこれまでに報告されているが [3]、今回は 4 極電磁石が実機のクライオスタットに組み込まれたセットアップで行なわれた磁場測定の結果について報告する.

2. QCS-L 超伝導 4 極電磁石

図 1 に QCS-L 内の 4 極電磁石の平面図を示す. クライオスタット内には 2 台のヘリウム容器が設置されており、IP 側 (図の右側) のヘリウム容器には QC1LE, QC1LP, QC2LP が、反 IP 側のヘリウム容器には QC2LE が格納されている. また IP 側のヘリウム容器には補償ソレノイド、タングステン製放射線シールド、電子リング上には QC1LP からの漏れ磁場をキャンセルする電磁石が設置されている.

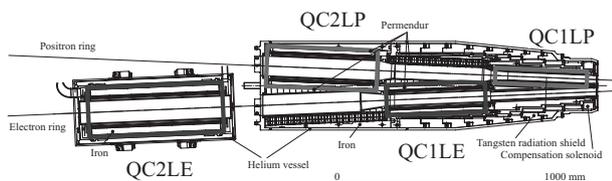


Fig. 1. QCS-L quadrupole with helium vessel (plan view)

各電磁石の断面図を図 2 に示す. QC1LP, QC1LE, QC2LP, QC2LE はそれぞれコイル内径が 25.0 mm, 33.0 mm, 53.8 mm, 59.3 mm である. また QC1LE, QC2LP, QC2LE にはカラー外周部にパーメンジュール (QC2LE は鉄) ヨークが組込まれている. それぞれの対向ビームラインには同じ材質の磁気シールドが設置されている.

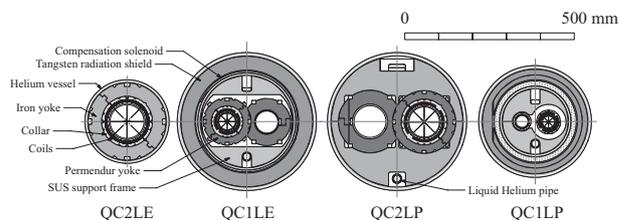


Fig. 2. Cross sections of QCS-L quadrupoles.

3. 磁場測定

測定は液体ヘリウムにて電磁石を 4.2 K まで冷却し、1 台ずつ定格電流まで励磁して行なわれた. 4 極電磁石の誤差成分である多極磁場成分を測定するために 2 極及び 4 極巻線でパッキングされたハーモニックコイルを用いた. 4 台の 4 極電磁石のボア半径がすべて異なるので、それぞれに適した 3 つの異なる半径のハーモニックコイルを製作した. QC1E, QC1P には巻線半径が 12 mm, QC2LP には巻線半径が 25 mm, QC2LE には巻線半径が 33 mm のものを用いた.

4. 測定結果

QC1LP と QC1LE の 4 極成分 (次数=2) の強さを 10000 として規格化した時の多極磁場成分の測定値を図 3 に示す. 左 (右) の図は QC1LP (QC1LE) の多極磁場の次数ごとに示したものである. 黒、白のバーはそれぞれスキュー、ノーマル成分を表す. ビームへの影響が大きい 6 極成分 (次数=3) は 1 units 程度もしくはそれ以下である. また他の多極成分についても 1 unit 以下となっている.

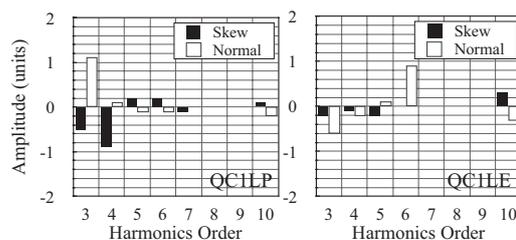


Fig. 3. Higher order harmonics of QC1LP (left) and QC1LE (right).

5. まとめ

QCS-L クライオスタット内に設置された 4 台の 4 極電磁石に対しハーモニックコイルを用いて誤差成分である多極成分の大きさを測定した. ビーム光学シミュレーションから要請されている許容値は 6 極成分は 10 units 以下、その他の成分は 5 units 以下であることから、いずれの電磁石も許容範囲内であることが確認された. 発表会では QCS-L 内の他の 4 極電磁石の測定結果についても報告する予定である.

参考文献

1. Y. Ohnishi, *et. al.*, Progr. Theor. Exp. Phys. 2013 (3) (2013) 03A011.
2. N. Ohuchi, *et. al.*, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 94.
3. Y. Arimoto, *et. al.*, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 89, 2014, p. 167.

SuperKEKB ビーム最終収束用超伝導電磁石システム(7-3) -超伝導ソレノイドの保護設計とクエンチ試験結果- Superconducting Magnet System for the Interaction Region of SuperKEKB (7-3) -Design and Quench Test of Superconducting Solenoid-

王 旭東, 山岡 広, 有本 靖, 川井 正徳, 近藤 良也, 宗 占国, 土屋 清澄, 大内 徳人(KEK/総研大); 金太炫(三菱電機)
WANG Xudong, YAMAOKA Hiroshi, ARIMOTO Yasushi, KAWAI Masanori, KONDOU Yoshinari, ZONG Zhanguo,
TSUCHIYA Kiyosumi, OHUCHI Norihito (KEK/SOKENDAI); KIM Tae-hyun (Mitsubishi Electric Corp.)
E-mail: wanxdon@post.kek.jp

1. はじめに

KEK では、電子・陽電子ビーム衝突型加速器 KEKB のアップグレード(SuperKEKB)を 2010 年から行っている。SuperKEKB ビーム衝突領域の超伝導電磁石システムは、ビーム最終収束用に 8 台の超伝導 4 極電磁石(QC1, QC2), ビーム運転調整用に 43 台の超伝導補正多極磁石が使用される[1]。また 4 台の補正用超伝導ソレノイド(ESL, ESR1-3)は、素粒子検出器 Belle-II が発生する 1.5 T のソレノイド磁場をキャンセルし、ビームライン上のソレノイド磁場の積分値をゼロとするように設計される[2]。本発表は、4 台の超伝導ソレノイドの内、蓄積エネルギーが最大の ESR1 の保護設計とクエンチ実験結果について報告する。

2. 超伝導ソレノイドの保護設計とクエンチ試験結果

ESR1 は、必要磁場と空間的制約により、15 個のコイルブロック(コイル#1-#15)に分割して設計された。ESR1 のロードラインを Fig. 1 に示す。ESR1 の巻線に用いた NbTi 超伝導線の断面積は 1.29 mm²、銅比は 1.7 である。液体ヘリウム冷却において、定格電流 450 A で最大経験磁場が 3.2 T となる。運転温度 4.7 K での負荷率は約 0.51 で、蓄積エネルギーは約 244 kJ となる。対地電圧を抑えるため、Fig. 2 に示すように ESR1 を 2 分割し、保護抵抗の midpoint で接地する構成とした。保護抵抗値(R1-R3)は対地電圧が±200 V 以内となるように設計した。クエンチ保護設計では、Fig. 3(a)の保護抵抗単独の場合と Fig. 3(b)の低温ダイオード保護も施した場合について数値解析を行い、15 個のコイルブロックがそれぞれ単独でクエンチした際の最高到達温度を Table 1 に示す。なお、熱解析では巻線のみエンタルピーを考慮し、コイル間の熱伝播を無視した。Table 1 より、保護抵抗単独の場合にはクエンチ温度が 200 K 以上となり、保護および再冷却時間の観点から望ましくない。一方、低温ダイオードの保護を追加することによりクエンチ温度は 200 K 未満に抑えることができる。低温ダイオードを追加した保護設計の検証のため、ヒーター誘導による ESR1 単体のクエンチ実験を行った。Fig. 3 に ESR1 と実験装置の写真を示す。Fig. 4 にクエンチ発生した際の測定結果の一例を示す。ただし、測定環境により ESR1 実験時は空心で行ったが、実機では内部に鉄ヨークがある構造となる。コイル #4 でヒーター投入したことにより、コイル#1-#5 間の電圧が上昇し、クエンチ検出器が作動して遮断となった。遮断後にコイル#1-#5 の電圧上昇はダイオードが作動したことにより 13 V 未満に抑えられ、電流がダイオード回路へ迂回して、コイルの温度上昇が約 50 K に収まっている。よって、Fig. 2(b)の保護設計を実証し、実機 ESR1 で十分にクエンチ保護が可能と考える。ESR1 は昨年に完成し、今年中に実機の励磁試験を行う予定である。

参考文献

1. N. Ohuchi, et al.: IEEE transactions on applied superconductivity, Vol. 21 (2011) pp.1829-1832
2. X. Wang, et al.: IEEE transactions on applied superconductivity, Vol. 26 (2016) 4102205

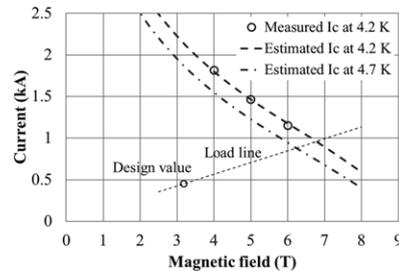


Fig. 1 Road line of ESR1 and I_c of NbTi wire

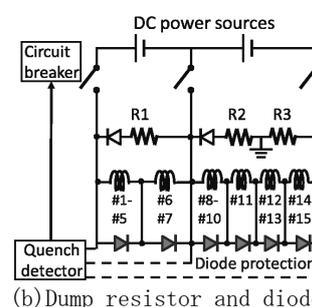
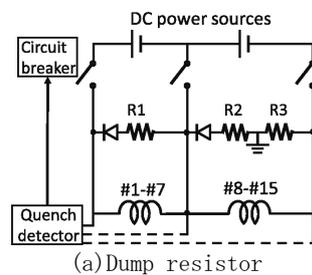


Fig. 2 Dump circuit

Table 1 Quench temperature

Coil	Dump resistor	Dump resistor and diode
#1	154 K	39 K
#2	121 K	39 K
#3	87 K	39 K
#4	96 K	39 K
#5	129 K	39 K
#6	129 K	67 K
#7	155 K	75 K
#8	399 K	136 K
#9	294 K	109 K
#10	306 K	112 K
#11	152 K	84 K
#12	223 K	121 K
#13	159 K	108 K
#14	148 K	91 K
#15	270 K	144 K

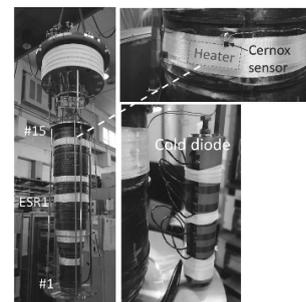


Fig. 3 Experimental setup of ESR1 for the quench test

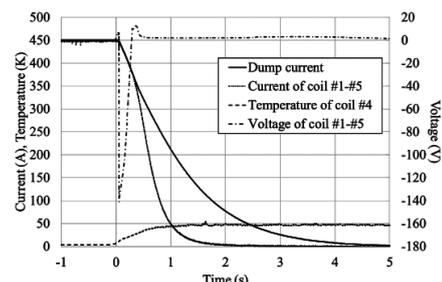


Fig. 4 Quench test result of coil #4

SuperKEKB ビーム最終収束用超伝導電磁石システム(7-4)

- 冷却システム設計と建設状況 -

Superconducting Magnet System for the Interaction Region of SuperKEKB(7-4)

- Design and Construction of Cryogenic System for Superconducting Magnets -

川井 正徳, 近藤 良也, 大内 徳人, 有本 靖, 宗 占国, 山岡 広, 土屋 清澄, 王 旭東, 青木 香苗(KEK);
遠藤 友成, 河村 郁生(日立プラントメカニクス)

KAWAI Masanori, KONDOU Yoshinari, OHUCHI Norihito, ARIMOTO Yasushi, ZONG Zhanguo,

YAMAOKA Hiroshi, TSUCHIYA Kiyosumi, WANG Xudong, AOKI Kanae (KEK);

ENDO Tomonari, KAWAMURA Ikuo (HITACHI)

E-mail: masanori.kawai@kek.jp

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 KEKB のリミノシティを約 40 倍に高めた SuperKEKB 加速器の建設が行われている。SuperKEKB 加速器のビーム衝突点では、ビームサイズを収束させ電子・陽電子の衝突の頻度を上げるための 8 台の最終収束用超伝導 4 極電磁石(QCS)と 43 台のビーム補正用コイル、4 台の Belle 測定器ソレノイド磁場キャンセルコイルがビーム衝突点を挟んで 2 台のクライオスタットに分割され組込まれている。これらの超伝導電磁石は、TRISTAN/KEKB 加速器で使用された冷凍能力 250W@4.4K の He 冷凍機システムを 2 基使用して冷却される。衝突点左側のシステム(QCS-L)は、2016 年に冷却・励磁試験を行い、右側のシステム(QCS-R)は、2017 年 3 月に He 冷凍機システムが完成し、総合冷却・励磁試験の準備段階である。本発表では、QCS 超伝導電磁石冷却システムの設計と建設状況、冷却試験結果について報告する。

2. QCS 超伝導電磁石冷却システム

QCS 超伝導電磁石システムの冷却は、1990 年に製作され TRISTAN 加速器及び KEKB 加速器で使用していた冷凍能力 250W@4.4K(冷凍液化能力 160W@4K+28.4L/h)の He 冷凍機システムを移設・改造して行う。QCS の 4K での設計熱負荷(初期設計値)は合計 76.4W+28.4L/h(そのうち単相過冷却液体ヘリウムへの熱負荷は 23.89W)となる。TRISTAN/KEKB 加速器では、1 基の He 冷凍機システムで QCS-L/R の 2 台の超伝導電磁石を冷却していたが、SuperKEKB ではクライオスタットの熱負荷の増加と電流リードの熱負荷が増加にするため、1 基の He 冷凍機で 2 台の QCS を冷却した場合、必要冷凍能力=(76.4W+28.4L/h)×2 台=152.8W+56.8L/h となり、冷凍液化能力が不足する事から 2 基の He 冷凍機システムを使用し QCS-L/R を其々単独で冷却を行う。さらにクエンチ後の再冷却時間の短縮が加速器運転の条件となっていることから、SuperKEKB では 2 基の He 冷凍機システムを使用する。図 1 に Belle 検出器、QCS クライオスタット、He 冷凍機の配置を示す。

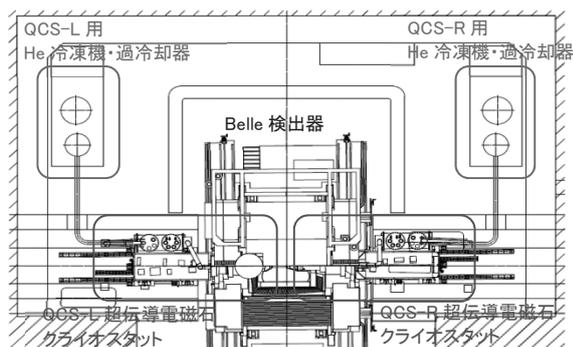


Fig.1 Layout of the QCS cryogenic system

3. ヘリウム冷凍機システムの建設

QCS-L 用 He 冷凍機システムは TRISTAN/KEKB 加速器で使用していたものを継続して(サブクーラー及び極低温多重配管は新規に製作)使用する。2012 年から QCS-L 用 He 冷凍機システムの建設を行い、2013 年 2 月に He 冷凍機単体の試験運転を実施し、冷凍能力の測定と制御系を含むシステムの健全性の確認を行った。2016 年 8 月に QCS-L クライオスタットを SuperKEKB ビームラインに設置し、He 冷凍機システムとの結合を行い、約 2 か月の総合冷却試験と励磁試験を実施した。QCS-R 用 He 冷凍機システムは TRISTAN 実験終了後の 1996 年から 20 年間保管されていた He 冷凍機システムを移設・整備を行い、今年 3 月に QCS-R クライオスタットと結合をし、5 月からの総合冷却・励磁試験の準備段階である。図 2 に QCS He 冷凍機システムの冷却回路を示す。

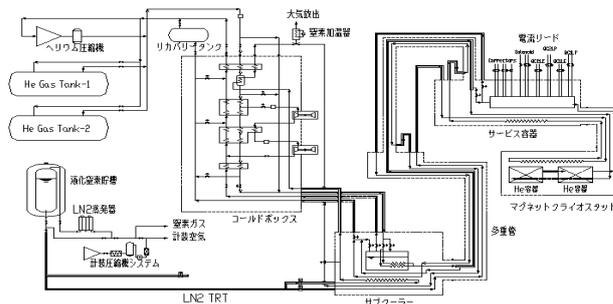


Fig.2 Flow diagram of the QCS cryogenic system

4. QCS-L 冷却・励磁試験結果

昨年 10 月に QCS-L 用 He 冷凍機システムはクライオスタットと結合し、総合冷却・励磁試験を実施した。図 3 に冷却曲線を示す。実施した試験内容は以下の通りである。

- ▶ 自動制御運転での冷却システムの動作確認試験
- ▶ 冷却試験、加温試験
- ▶ 熱負荷試験
- ▶ インターロック及び復帰処理試験(冷凍機膨張タービン故障、He 圧縮機故障)
- ▶ 電磁石通電試験(クエンチインターロック、電流リード冷却ガス流量制御)

本発表で試験結果の詳細について報告をする。

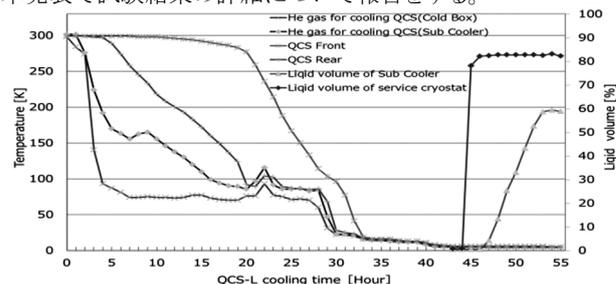


Fig.3 Cool down condition of the QCS Magnet

SuperKEKB ビーム最終収束用超伝導電磁石システム(7-5) -QCS-L 冷却システム熱設計と熱負荷測定-

Superconducting Magnet System for the Interaction Region of SuperKEKB (7-5) -Thermal Design of the QCS-L Cryostat and Heat Load Measurements-

宗 占国, 大内 徳人, 川井 正徳, 近藤 良也, 有本 靖, 山岡 広, 土屋 清澄, 王 旭東, 青木 香苗 (KEK);
遠藤 友成, 河村 郁生 (株式会社 日立プラントメカニクス); 金 太炫 (三菱電機)

ZONG Zhanguo, OHUCHI Norihito, KAWAI Masanori, KONDOU Yoshinari, ARIMOTO Yasushi, YAMAOKA Hiroshi,
TSUCHIYA Kiyosumi, WANG Xudong, AOKI Kanae (KEK); ENDOU Tomonari, KAWAMURA Ikuo (HITACHI);
KIM Taehyun (Mitsubishi Electric)
E-mail: zhanguo.zong@kek.jp

1. はじめに

SuperKEKB加速器ビーム衝突点では、電子・陽電子ビームを収束させビームの衝突頻度を上げるための最終収束用超伝導電磁石 QCS-L・QCS-R システムが設置された。QCS クライオスタット内には、各々4台の超伝導4極電磁石、20台/23台(L/R)の超伝導補正磁石及び1台/3台(L/R)の超伝導補償ソレノイドが組み込まれている[1、2、3、4]。超伝導電磁石は2個の液体ヘリウム容器に分割され、ヘリウム容器はサポートロッドによって真空容器に支持されている。超伝導電磁石を安定に励磁するために、圧力 0.16 MPa、流量 20 g/s の過冷却液体ヘリウム(単相流)が使用されている[5、6]。液体ヘリウムは液の顕熱(=2.06 J/g: 4.4 K~4.7 K)により単相流の状態では約 40 Wの熱負荷を吸収することができる。Fig. 1に、QCS-Lの電磁石クライオスタット及びサービス容器内の液体ヘリウムフロー図を示す。

2015年12月にQCS-Lクライオスタットは完成し、2016年8月に加速器ビームラインに設置した。QCS-L冷凍機・サブクーラーと接続後、2016年11月~12月にQCS-L冷却システムとしての最初の試運転を実施し、クライオスタットの熱性能を測定した。本稿では、QCS-Lクライオスタットの熱設計と測定結果について報告する。

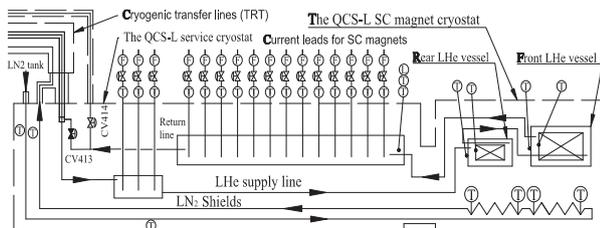


Fig.1 Cooling scheme of the service cryostat and SC magnet cryostat of QCS-L, and the temperature sensors.

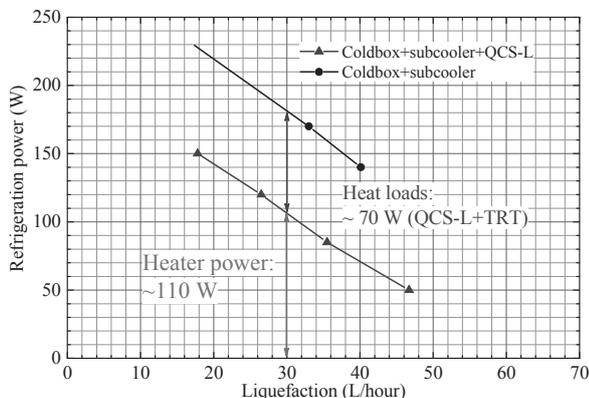


Fig.2 Measured refrigeration and liquefaction capacities of cryogenic system with and without the QCS-L cryostat.

Table 1 Heat loads of the service cryostat and the magnet cryostat of QCS-L.

Items	QCS-L Cryostat	
	Service	Magnet
Support rods & pipes	19.12	13.20
Thermal radiation	1.94	6.62
TRT & Valves	22.00	-
Instrument wires	3.80	0.87
Sum of heat loads	46.86	20.69
Total heat loads of QCS-L	67.5 W	

2. QCS-Lの熱負荷の測定と分析

QCS-Lクライオスタットの熱負荷は、冷却システムにクライオスタットを接続した場合と接続しない場合の熱負荷を比較することによって計算した。Fig. 2に熱負荷測定時の液体ヘリウムの液化量と冷凍能力を示した。図中青三角はクライオスタットを接続した場合の測定結果を示し、黒丸は接続しない場合の測定結果を示す。横軸の液体ヘリウムの液化量は、25台の超伝導電磁石の電流リードの冷却流量とサブクーラー液体ヘリウム貯槽内の液の変化量から計算した。縦軸の冷凍能力は内蔵ヒーターにより与えられた。Fig. 2により、液化量 30 L/h(QCS-L超伝導電磁石全体電流リードの定格流量[7])の時の冷凍能力は 180 W/110 W(QCS-Lクライオスタット無/有)である。この結果から、低温配管(TRT)とQCS-Lクライオスタットの熱負荷は約 70 Wと考えられる。

Table 1には、測定されたクライオスタット内温度分布から計算した熱負荷と低温配管の熱負荷を示す。Table 1に示した約 67.5 Wの総熱負荷は、冷却システムの液化・冷凍能力測定から得られた熱負荷測定値(70 W)にほぼ一致した。QCS-Lの熱負荷は、主に液体ヘリウム容器のサポートロッド及びサービス容器内電流リードの挿入配管からの熱伝導によるものである。また、輻射による浸入熱は、室温のビームパイプと液体ヘリウム容器間に液体窒素シールドを持たないため 4.3 Wになり、QCS-L全体では 8.5 Wである。

この熱負荷分布の評価により、液体ヘリウム供給ライン、QCS-Lの後方部液体ヘリウム容器および前方部液体ヘリウム容器の熱負荷合計は約 27 Wであり、単相液体ヘリウムであるための最大熱負荷約 40 Wよりも小さいことが分かった。以上の結果より、QCS-L超伝導電磁石は単相液体ヘリウムに浸漬され、安定に冷却されることを確認した。

参考文献

1. N. Ohuchi et al.: Proc. of NAPAC2013, WEODA1.
- 2, 3, 4, 5, 6. Abstracts of CSSJ this Conf., 2C-a01, 2C-a02, 2C-a03, 2C-a04, 2C-a06.
7. Z. Zong et al.: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.06>

SuperKEKB ビーム最終収束用超伝導電磁石システム(7-6) —QCS及びBELLE II冷凍システム用リモートモニタリングシステム開発状況—

Superconducting Magnet System for the Interaction Region of SuperKEKB (7-6)

-Development of the remote monitoring system for the QCS and BELLE II cryogenic system-

青木 香苗, 大内 徳人, 宗 占国, 川井 正徳, 近藤 良也, 榎田 康博(KEK); 廣瀬 雅哉(関東情報サービス);
遠藤 友成(日立プラントメカニクス); 岩崎 昌子(大阪市大); 中村 卓也(三菱電機 SC)

AOKI Kanae, OHUCHI Norihito, ZONG Zhanguo, KAWAI Masanori, KONDOU Yoshinari, MAKIDA Yasuhiro
HIROSE Masaya (Kanto Information Service); ENDOU Tomonari (Hitachi Plant Mechanics); IWASAKI Masako (Osaka City Univ.);
NAKAMURA Takuya (Mitsubishi Electric System & Service)
E-mail: kanae.aoki@kek.jp

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)においては、2019年1月の物理実験開始を目指してSuperKEKB加速器及びBelle II測定器の建設を進めている。

ビーム衝突点近傍には、Belle II測定器用超伝導ソレノイド電磁石(Belle ソレノイド)及びSuperKEKB加速器最終収束系超伝導電磁石システム(QCSL及びQCSR)が位置する[1-5]。我々は、この超伝導電磁石群及びヘリウム冷凍システム用リモートモニタリングシステムの開発を行っている[6-8]。このシステムは、オープンソースソフトウェアの集合体であるEPICS (Experimental Physics and Industrial Control)[9]をベースとしている。

リモートモニタリングシステム開発の目的は、無線LANも含めた一般的なネットワーク上で、関係者がnote PCなどから容易に超伝導電磁石群及びヘリウム冷凍システム data の利用を可能とすることである。

本発表においては、目標としていた全 data 点数を、これも目標としていた速度(1 sec cycle)で収集可能となった現状について報告を行う。

2. 超伝導電磁石群とヘリウム冷凍システム及び制御系

KEK 筑波実験棟の衝突点に Belle ソレノイド、その内部に2台のクライオスタットに分かれて QCS 超伝導電磁石群(QCSL、QCSR); 加速器最終収束系ビーム衝突点用超伝導4極電磁石と超伝導補正磁石群)が設置されている。

これら Belle ソレノイド、QCSL 及び QCSR は、3台のクライオスタットに分かれて、それぞれが専用のヘリウム冷凍機で冷却、超伝導状態が維持される。

これらの冷凍運転は、(株)日立ハイテクソリューションズ社製の総合計装システム EX-8000 によって制御されている。3台のヘリウム冷凍機とクライオスタットは、それぞれが EX-8000 の MLC(Multi-Loop-Controller)で独立に制御されるが、これら3台の MLC は閉じた1つのネットワーク上にあり、EX-8000 のその他の装置を共有している (Fig.1)。

我々が開発したリモートモニタリングシステムは、EX-8000 ネットワーク上の GWU(Gate Way Unit)から、3台の MLC のデータを吸い上げて、一般的なネットワークにおいても超伝導電磁石とヘリウム冷凍機の状態をモニター可能としたものである。

3. ソフトウェアの構成とこれまでの問題点への対処

EPICS は、分散化されたプログラム構造を持つリアルタイムコントローラーを実現するソフトウェア集合体であり、次の要素から成り立っている。

- EPICS IOC (IO Controller)
- データベース(CSS [Control System Studio] アーカイバー+データベース管理ソフトウェア)
- CSS モニタークライアント

これまでの実現されたサイクルタイムは、data 点数が現状の2/3で10 secと遅いものだったが、GWUとの通信コマンドを変更することで、より速いサイクルの実現が可能となった。

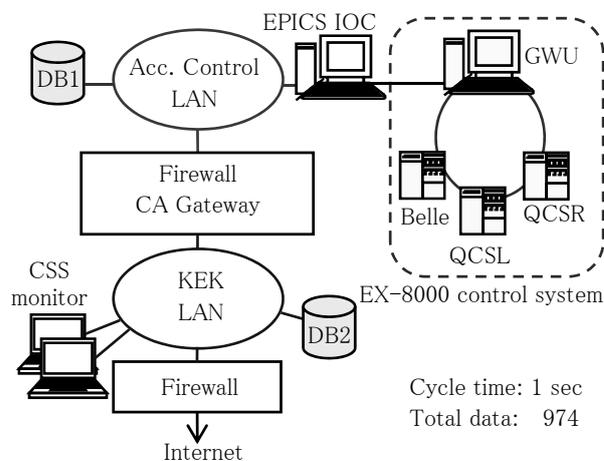


Fig.1 Current state of the remote monitoring system

4. 確認されたモニター性能

- 1) 目標とした全 data 点数の収集が可能となった。
(EX-8000 上の PV 値、MV 値、DI 値、DO 値の全 data に相当する)
 - MLC1: Belle ソレノイド&冷凍システム 245 点
 - MLC3: QCSL&冷凍システム 381 点
 - MLC4: QCSR&冷凍システム 348 点
- 2) 上記の全 data を、サイクルタイム 1 sec で、収集かつデータベース(DB1、DB2)に蓄積していることを確認。
(1 sec cycle は、EX-8000 の data 収集サイクルと同じ)
- 3) CSS monitor 上で利用するために、新たに作成した QCSL 及び QCSR のグラフとグラフィックスの動作確認

5. 今後の予定

超伝導電磁石試験、加速器試験、物理実験での運転に際して、使いやすさを検証し改良を行う予定である。

参考文献

- 1, 2, 3, 4, 5. Abstracts of CSSJ this Conf., 2C-a01, 2C-a02, 2C-a03, 2C-a04, 2C-a05
6. M. Iwasaki, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.115
7. M. Iwasaki, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 90 (2014) p.200
8. K. Aoki, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 92 (2015) p.85
9. EPICS, <http://www.aps.anl.gov/epics/>

LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発(9)

-コイル予備応力を増加させた 2 m モデル磁石のトレーニング特性

Development of superconducting magnets for LHC luminosity upgrade (9)

- Training performance of the 2 m model magnet with increased coil pre-stress

菅野 未知央, 飯田真久, 池本由希子, 榎本瞬, 大島洋克, 岡田尚起, 岡田竜太郎, 荻津透, 川又弘志, 木村誠宏,
佐々木憲一, 鈴木研人, 高橋直人, 田中賢一, 中本 建志, 東憲男(高エネ研);

Andrea Musso and Ezio Todesco (CERN)

SUGANO Michinaka, IIDA Masahisa, IKEMOTO Yukiko, ENOMOTO Shun, OHATA Hirokatsu, OKADA Naoki,
OKADA Ryutarō, OGITSU Toru, KAWAMATA Hiroshi, KIMURA Nobuhiro, SASAKI Kenichi, SUZUKI Kento,
TAKAHASHI Naoto, TANAKA Kenichi, NAKAMOTO Tatsushi, HIGASHI Norio (KEK);

MUSSO Andrea and TODESCO Ezio (CERN)

E-mail : michinaka.sugano@kek.jp

1. はじめに

CERN-LHC 加速器では、積分ルミノシティを現行 LHC の 10 倍以上である 3000 fb⁻¹ まで向上させることを目指した高輝度化アップグレード計画 (HL-LHC) が進行中である。目標達成のためには ATLAS 及び CMS 実験衝突点近傍の加速器システムの性能向上が不可欠であり、KEK はこの中でビーム分離超伝導双極磁石 (D1 磁石) の開発を担当している。D1 磁石は、衝突点付近で同一軌道上に調整された対向する陽子ビームをアーク部に向かって再び別軌道に分ける機能を果たす。衝突点で小さな β^* を得るために最終収束四極磁石および D1 磁石には 150 mm の大口径が必要であり、また積分磁場として 35 Tm が要求されている。主双極磁場は運転温度 1.9 K、定格運転電流 12 kA で 5.6 T である。D1 磁石の断面は Fig. 1 に示す通りであり、Nb-Ti/Cu 超伝導単層コイルをスペーサーとしてのステンレスカラーで位置決めし、鉄ヨークが剛性を担っている。

D1 磁石製作の技術的課題として、大口径化に伴ってより顕著になる鉄ヨークの飽和を考慮した磁場設計、25 MGy 以上と想定される放射線に耐え得る絶縁材料を用いた磁石開発、大口径に起因する組み立て、冷却、励磁時のコイルの大きな変形量の正確な予測などが挙げられる。実機の機械長は約 6.7 m であるが、原理検証のために KEK で 2 m 長のモデル磁石の製作を行っている。

2. 2 m モデル磁石 1 号機のクエンチ特性

2015~2016 年に 2 m モデル磁石 1 号機 (MBXFS01, Fig. 1) を製作し、冷却、励磁試験を実施した。最大クエンチ電流として定格電流 12 kA の 105% は達成したものの、合格条件である 108% にはわずかに届かなかった。コイルには組み立て段階で電磁力に抗するコイル断面円周方向の圧縮予備応力を負荷するが、励磁試験においてこの予備応力が定格よりもかなり低い電流で完全に解放されていることが確認された。さらに、組み立て途中の測定から、コイル端部でも予備応力がかなり低いことが明らかになっていた。以上のことから、不十分なトレーニング特性はコイルの機械的支持が不完全であることが原因であると推定された。

3. 2 m モデル磁石 1 号機の改造とクエンチ特性

上記のモデル磁石を試験後に分解し、コイル水平面 (Fig. 1 の Mid-plane の位置) にシム板を挿入した。この状態で、ヨーク組み付けを行うことで、コイルの予備応力を 35 MPa 増加させることができた。

改造後の磁石について、KEK 超伝導低温工学センター内の深さ 9 m の縦型クライオスタットにおいて、1.9 K 冷却、励磁試験を行った。本発表で報告するトレーニングクエンチ試験に加えて、磁場測定[1]およびクエンチ保護検討のためのヒーター試験[2]を合わせて実施した。

Fig. 2 に改造前 (MBXFS01) と改造後 (MBXFS01b) のクエンチ電流を示す。図中、SSL (Short sample limit) は超伝導ケーブルの臨界電流とロードラインで決まる電流上限値、Nominal は定格電流、Ultimate は合格条件の電流を

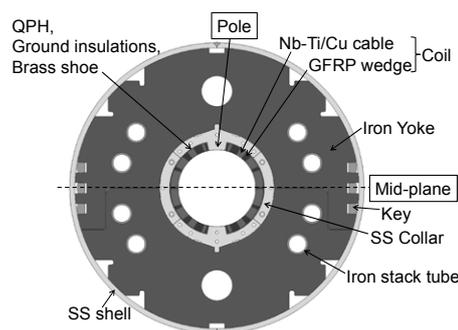


Fig. 1 Cross-section of the D1 magnet.

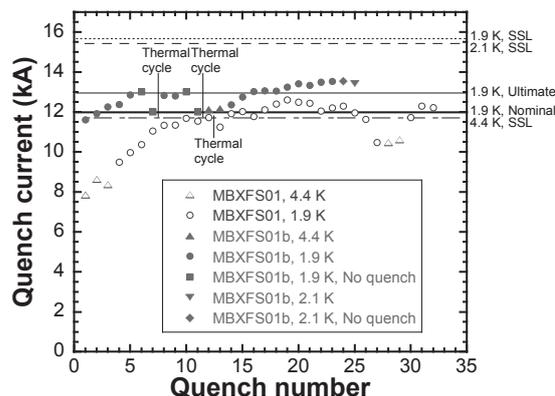


Fig. 2 Quench history of the first 2 m model (MBXFS01) and the reassembled model with enhanced coil pre-stress (MBXFS01b).

示す。改造前と比較して改造機では明らかにトレーニング特性が改善されており、2 回のクエンチ後に定格電流に、5 回のクエンチ後に合格条件電流に到達した。4.4 K ではクエンチ電流がほぼ SSL と同レベルに達することを確認した。また、最終的に最大電流は 13.5 kA に達した。励磁中のコイル予備応力の測定結果から、改造前と比較してより高い電流値まで予備応力が残留していることも確認された。

4. まとめ

LHC の高輝度化アップグレードの一環として、D1 磁石の 2 m モデル磁石 1 号機の製作、磁石性能試験を実施した。コイル予備応力を増加させることで、1 号機で不完全だったトレーニング特性を改善できることを実証した。

参考文献

1. S. Enomoto et al, Abstract of CSJ Conference, Vol. 95, 2C-a08 (2017).
2. K. Suzuki et al, Abstract of CSJ Conference, Vol. 95, 2C-a09 (2017).

LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発(10)

- 2m モデル磁石 1b 号機の磁場測定 -

Development of superconducting magnets for LHC luminosity upgrade (10)

- Magnetic field measurement of the 2-m model magnet.

榎本 瞬, 菅野 未知央, 中本 建志, 鈴木 研人, 川又 弘史, 岡田 尚起, 池本 由希子, 岡田 竜太郎, 東 憲男, 荻津 透, 佐々木 憲一, 木村 誠宏, 田中 賢一, 大島 洋克, 飯田 真久, 菅原 繁勝, 高橋 直人 (高エネ研);

Andrea Musso and Ezio Todesco (CERN)

ENOMOTO Shun, SUGANO Michinaka, NAKAMOTO Tatsushi, SUZUKI Kento, KAWAMATA Hiroshi, OKADA Naoki,

IKEMOTO Yukiko, OKADA Ryutarou, HIGASHI Norio, OGITSU Toru, SASAKI Ken-ichi, KIMURA Nobuhiro,

TANAKA Ken-ichi, OHATA Hirokatsu, IIDA Masahisa, SUGAWARA Shigekatsu and TAKAHASHI Naoto (KEK);

MUSSO Andrea and TODESCO Ezio (CERN)

E-mail : enoshun@post.kek.jp

1. はじめに

欧州原子核研究機構(CERN)のLHC加速器では2024年頃にビーム衝突点近傍の超伝導磁石システムのアップグレードを計画している(高輝度アップグレード:HL-LHC)。その中で高エネルギー加速器研究機構(KEK)は衝突点近くのビーム分離用超伝導双極磁石(D1)の開発を担っている。磁石は口径150mm、全長7mとなり、超伝導コイルにはNbTi超伝導線を用い、磁場は12kA、1.9Kで5.6T、積分磁場長35Tmを公称値としている。

これまでKEKでは、性能検証のため、実機7mに対して直線部を短くした機械長2mのモデル磁石の所内開発を行ってきた。2016年最初のモデル磁石1号機(MBXFS01)の冷却・励磁試験を行った。その結果、励磁中にポール部分の予備応力が完全に抜けきってしまったため、クエンチ性能が所定の条件を十分に満たすことができないことが判明した[1]。このため、モデル磁石1号機を分解して、コイル水平面に対して0.6mmのシム板を挿入することによってコイルの予備応力を増加させた。改造されたモデル磁石1b号機(MBXFS01b)は、2017年2月から冷却・励磁試験を行い、クエンチ性能が大幅に改善されたことが確認できた。[2]

MBXFS01bの磁場測定では、1号機で測定できなかった磁石中心における定格電流以上12.2kAまでの電流依存性測定及び定格電流12kAにおけるz方向磁場分布の測定を行った。本講演では磁場測定の再現性、多極成分に対する大口径の影響や鉄の飽和の影響を主眼において報告を行う。

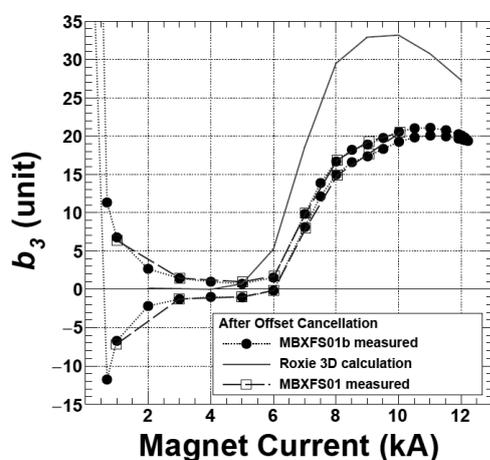


Fig. 1 b_3 of DC loop at the magnet center after offset cancellation. Comparison between measured and ROXIE 3D calculation.

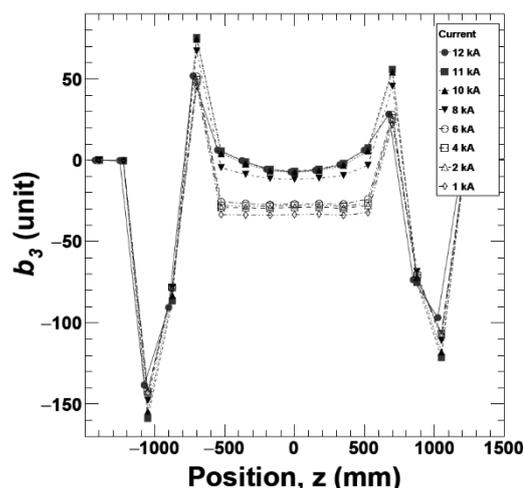


Fig. 2 b_3 of z-scan measurements at several currents.

2. 磁場測定・結果

冷却・励磁試験は、KEK超伝導低温工学センター第4低温棟・縦型クライオスタット(深さ9m)で行った。磁場測定は、磁石のボア中に常温クライオスタットチューブを挿入し、回転コイルにより磁場測定を行った。

磁石中心における電流依存性の測定では、1号機の測定を再現していることが確認できたが、その一方で、Fig. 1に示すようにノーマル6極成分(b_3)などの多極成分では鉄の飽和が生じる高電流領域において計算結果と大きく異なる結果が得られた。また、z方向磁場分布の測定ではFig. 2に示すようにコイル直線部(± 500 mm)で、電流の増加に伴い、エンド部の磁場の漏れ込みが顕著に表れることを確認した。

3. まとめ

KEKでは、LHC加速器高輝度アップグレード用D1磁石の開発を行っている。改造したモデル磁石1b号機の冷却・励磁試験を2017年2月から実施し、磁場測定を行った。1号機と1b号機で磁場測定の再現性を確認すると共に、多極成分で鉄の飽和の影響や大口径の影響が顕著見られ、磁場計算と大きく異なる結果が得られた。本講演では、より詳細な議論および積分磁場などの結果について報告を行う。

参考文献

1. M. Sugano, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 27, no. 4, June 2017, Art. no. 4002409.
2. M. Sugano et al, Abstract of CSJ Conference, Vol. 95, 2C-A07 (2017).

LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発 (11)

- 2m モデル磁石を用いたクエンチ保護ヒーター試験結果

Development of superconducting magnets for LHC luminosity upgrade (11)

- Quench protection study with the 2 m model magnet of beam separation dipole

鈴木研人, 飯田真久, 池本由希子, 榎本瞬, 大島洋克, 岡田尚起, 岡田竜太郎, 荻津透, 川又弘史, 木村誠宏, 佐々木憲一, 菅野未知央, 高橋直人, 田中賢一, 中本建志, 東憲男 (高エネ研);

MUSSO Andrea, TODESCO Ezio (CERN)

SUZUKI Kento, IIDA Masahisa, IKEMOTO Yukiko, ENOMOTO Shun, OHATA Hirokatsu, OKADA Naoki, OKADA Ryutarou, OGITSU Toru, KAWAMATA Hiroshi, KIMURA Nobuhiro, SASAKI Kenichi, SUGANO Michinaka, TAKAHASHI Naoto, TANAKA Kenichi, NAKAMOTO Tatsushi, HIGASHI Norio (KEK);

MUSSO Andrea and TODESCO Ezio (CERN)

E-mail: kentsuzu@post.kek.jp

1 はじめに

欧州原子核機構 (CERN) が次期 LHC 計画として進めている「HL-LHC」ではビーム高輝度化を達成すべく、最終収束 4 極磁石の高磁場化・大口径化 (70mm→150mm) を進めている。このアップグレードに伴い、ビーム分離用双極 (D1) 磁石も大口径化並びに超伝導 (NbTi) 化が必須となっている。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では CERN との国際協力の枠組みのもと、この D1 磁石実機開発に先立ち 2m 長のモデル磁石の開発を行っている。D1 磁石は現行 LHC と同様、超流動ヘリウム温度 (1.9K) まで冷却され、定格運転電流 12 kA にて 5.6 T の磁場強度を生み出す仕様となっている。KEK はモデル磁石初号機 (MBXFS01) の製作を 2015 年から開始し、その性能評価を 2016 年に行った。しかしながら、この測定中にコイル直線部において期待通りの予備応力を得る事ができなかったため、測定後に初号機の改造機 MBXFS01b の製作に踏み切った [1]。そして、この MBXFS01b の性能評価を 2017 年 3 月に行った。

磁石性能評価として、励磁試験 [1]、磁場測定 [2] の他、クエンチ保護検討のための試験を行い、ここではクエンチ保護ヒーター (Quench Protection Heater: QPH) と呼ばれる、常伝導転移を促進させるヒーターを用いてのエネルギー回収システム評価を行った。本発表では、この QPH 試験の結果について報告する。

2 QPH システム

QPH はクエンチが生じた際にヒーターに電流を流し、常伝導転移をコイル全体に促進させることでコイルを保護するシステムである。QPH はストリップ状の SUS (25 μm ×15 mm×2 m) であり、これが 2 枚のポリイミドフィルム (厚さ 50 μm) に挟まれた構造となっている。図 1 上にモデル磁石 MBXFS01(b) で使用している QPH の写真を載せた。経験磁場が比較的低い (つまり常伝導転移が遅い) Mid-plane 側にあるコイル 9 ターン分を覆うように QPH を配置しており、上下コイルに 2 枚ずつ、計 4 枚使用している。QPH は容量 7.05 mF の電源 (最大充電電圧=800 V) につながっている。コイルバランス電圧の上昇が検知されると電流遮断が起き、同時に QPH 電源のキャパシタの放電によってヒーター部に電流が流れ、常伝導転移が促進される仕組みとなっている。

3 Full Energy Dump 試験

加速器用超伝導磁石を運用する際、磁石とは平行に保護抵抗を接続し、クエンチ時のコイルの蓄積エネルギーを主にその抵抗によって吸収させる方法がある。HL-LHC の磁石設計ではこういった保護抵抗を用いず、QPH のみでクエンチを保護するシステムを採用している。ここで注意すべきは、電流遮断時の時定数が伸びると MIITs が大きくなり最悪の場合磁石の破壊をもたらす事である。そしてこの時定数の長短は保護抵抗システムにおいてはその抵抗値で決まる一方、QPH の場合では常伝導転移を起こした領域で決まる。我々は現状の QPH 配置条件が実機でうまく行くかどうかの事前確認として、改造機である MBXFS01b を用いて QPH の実証試験を行った。

図 1 下に示したのは通電電流毎に測定した MIITs とコイル内で消失したエネルギーである。この図には 4 枚の QPH、または 2 枚の QPH (上下コイル 1 枚ずつ配置) を焚いた場合についてプロットしており、赤点線は MIITs の設計限界値 (30 $\text{kA}^2\cdot\text{s}$) を示している。この結果より、QPH4 枚では 10.5kA、QPH2 枚では 9kA に到達した際に MIITs はその限界値に達している事がわかる。すなわち現行の QPH の配置条件では定格電流での運用が不可能である事を意味している。

4 まとめ

HL-LHC D1 磁石のクエンチ保護システムとしての QPH の実用性を評価した。その結果、現行の QPH の配置条件では定格電流による運用はできない事が分かった。今後の 2 号機の作成では今回の結果を踏まえ、全体的に常伝導転移を早めるような工夫、つまり経験磁場の高い領域も覆うような QPH の配置検討を行う予定である。

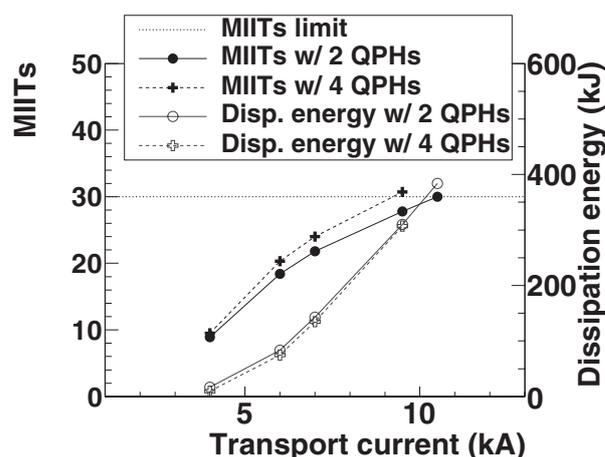
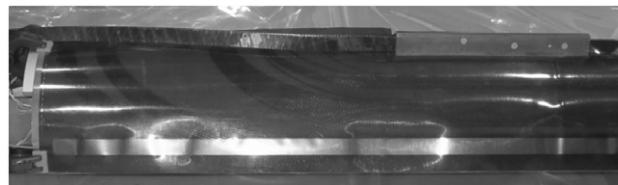


Fig. 1: Picture of a QPH that covers an outer surface of the coil (top). Measured MIITs and dissipation energy as a function of the transportation current (bottom).

参考文献

1. M. Sugano *et al.*, Abstract of CSJ Conference, Vol. 95, 2C-A07 (2017).
2. S. Enomoto *et al.*, Abstract of CSJ Conference, Vol. 95, 2C-A08 (2017).

ビーム試験用マグネットのためのRE系レーストラックコイルの試作 Fabricated results of REBCO racetrack coils for beam-line-test magnet

高山 茂貴, 小柳 圭, 宮崎 寛史, 石井 祐介, 来栖 努(東芝); 岩田 佳之, 野田 耕司(NIRS); 吉本 政弘(JAEA); 鈴木 研人, 荻津 透(KEK); 雨宮 尚之(京大)

TAKAYAMA Shigeki, KOYANAGI Kei, MIYAZAKI Hiroshi, ISHII Yusuke, KURUSU Tsutomu (Toshiba); IWATA Yoshiyuki, NODA Koji (NIRS); YOSHIMOTO Masahiro (JAEA); SUZUKI Kento, OGITSU Toru (KEK); AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.)
E-mail: shigeki2.takayama@toshiba.co.jp

1. はじめに

加速器システムの高機能・高効率・小型化を目指し高温超伝導の適用を検討している[1]。これまでにステージIIとして、加速器用マグネットの高温超伝導化のために、高精度磁場発生技術[2]や3次元巻線技術[3]、高効率伝導冷却マグネット技術[4]などの共通基盤技術の開発をおこなってきた。次なるステージとしてREBCO線材を用いた高温超伝導マグネットによるビーム試験を計画している。本計画では高温超伝導マグネットでビームを偏向するビーム誘導試験と、ビームロス模擬しビームをマグネットに照射するビームロス試験とを計画している。上記ビーム試験用の高温超伝導マグネットの設計およびコイル試作を実施したため、その結果について報告する。

2. マグネット設計

設計検討したマグネット諸元を Table 1 に、コイル諸元を Table 2 に示す。本マグネットは4積層のREBCOレーストラックコイルを上下にスプリット配置(コイル間距離130mm)し、外径側に鉄心を配置する構造とした。この場合200A励磁でビームダクト中心に2.5Tを発生する。磁場解析結果をFig1に示す。コイルの最内周部で経験磁場が最大となりその値は約4Tとなった。本マグネットにおいてビーム偏向試験を想定した粒子軌道計算を実施した。想定するビームは重粒子線(C⁶⁺)とし、粒子エネルギー430MeV/uにおいて軌道計算を実施した結果、ビーム半径2.68mで11.2度偏向されることが明らかとなった。この場合マグネットから下流側5mの位置においてビームが中心軸から0.97mずれることになる。ビーム偏向時ビームがダクトに衝突する事を避けるため、ビームダクトは高さ40mm、幅264mmのレーストラック断面形状を採用する計画。

3. コイル試作

上記設計をもとにコイル試作を実施した。試作したコイルをFig.2に示す。ここではまずダミー線(Cu, t0.1mm, w4mm)を用いて巻線し、その精度の評価を実施した。巻き上がったコイルの周方向8か所にて巻厚およびコイル高さを測定した結果、巻厚はpeak to peakで0.17mm、コイル高さはpeak to peakで0.22mmと±0.1mm程度の精度で巻線されていることが明らかとなった。

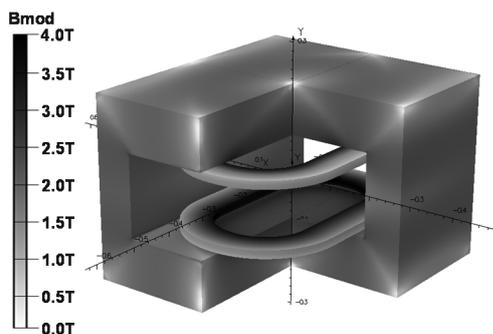


Fig.1 Result of three-dimensional magnetic field calculation

Table 1 Specifications of beam-line-test magnet

Coil configuration	Split arrangement of REBCO racetrack coil
Center field	2.5T
Peak field	4.0T
Integrated field	1.16Tm
Effective length	0.463m
Operating temperature	20K
Operating current	200A
Stored energy	65.7kJ
Inductance	3.3H

Table 2 Specifications of REBCO coil

Coil type	racetrack
Wire type	REBCO
Number of layers	4
Number of turns	300
Inner radius	103mm
Length of straight section	200mm
Conductor length	1.5km/pole

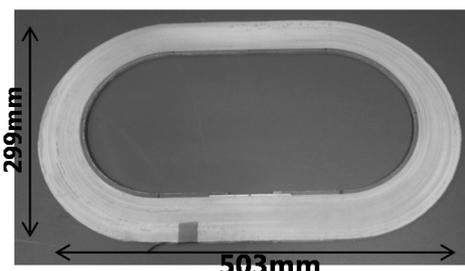


Fig.2 Photograph of the fabricated racetrack coil

4. まとめ

REBCO線材を用いた高温超伝導マグネットによるビーム試験を計画しており、そのためのマグネットの設計およびコイル試作を実施している。4積層のREBCOレーストラックコイルを上下にスプリット配置しビームダクト中心に2.5Tを発生するマグネットを検討した。上記マグネット用のコイルをダミー線で試作し巻線精度が±0.1mm程度である事を明らかにした。

謝辞

本研究は科学技術振興機構の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の支援によって行われた。

参考文献

1. N. Amemiya, et al.: Phys. C, Supercond. Vol. 482 (2012) p.74
2. Y. Li, et al.: Abs. of CSSJ Conference, Vol. 93 (2016) p.125
3. S. Takayama, et al.: Abs. of CSSJ Conference, Vol. 91 (2015) p.80
4. K. Koyanagi, et al.: Abs. of CSSJ Conference, Vol. 93 (2016) p.126

重粒子線がん治療用回転ガントリーのための低温超電導電磁石の製作 及び励磁試験結果

Manufacturing and excitation test results of the low-temperature superconducting magnets for the heavy ion rotating gantry

高山 茂貴, 高見 正平, 折笠 朝文, 長本 義史(東芝); 岩田 佳之, 野田 耕司(NIRS);
尾花 哲浩(NIFS); 荻津 透(KEK); 雨宮 尚之(京大)

TAKAYAMA Shigeki, TAKAMI Shohei, ORIKASA Tomofumi, NAGAMOTO Yoshifumi (Toshiba);

IWATA Yoshiyuki, NODA Koji (NIRS); OBANA Tetsuhiro (NIFS); OGITSU Toru (KEK); AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.)

E-mail: shigeki2.takayama@toshiba.co.jp

1. はじめに

重粒子線(炭素イオン)によるがん治療は治療効果が高く、患者負担が軽いため近年普及が進んでいる。回転ガントリーとは粒子線を患者の周囲 360 度任意の角度から照射する事を可能にする装置で、正常細胞への線量を低減出来る事が特徴である。陽子線によるがん治療装置ではこの回転ガントリーが一般的に適用されているが、重粒子は陽子に比べ重たいために本装置が大型となってしまふ。そこで我々は回転ガントリーの小型・軽量化を目的に超電導電磁石の適用を検討してきた。これまでに超電導電磁石の設計、製造が完了しており、製造に際し冷却・励磁試験等を実施してきたため、その試験結果について報告する。

2. 回転ガントリーレイアウト

回転ガントリーの外観を Fig.1 に示す[1]。今回開発した回転ガントリーはアイソセントリック型であり、軸長 13m、回転半径 5.45m となっている。ビーム制御の観点から 5 種類 10 台の超電導電磁石(BM01-BM10)で構成され、各磁石は二極・四極機能結合型磁石となっている。さらに 1 組のスキヤニング電磁石(SCM-X, SCM-Y)と 3 組のステアリング電磁石(STR01-STR03)およびビームモニター(PRN01-PRN03)が直線部に配置されている。上記機器は円筒状の構造体に固定され、本円筒を回転させることで任意の角度からの照射を可能としている。

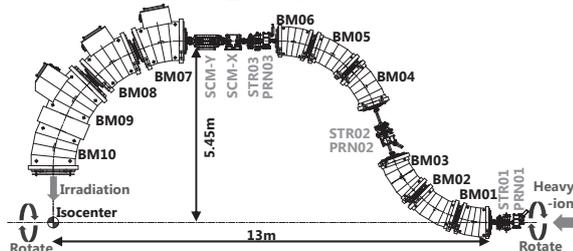


Fig.1 Layout of rotating gantry

3. 機能結合型超電導電磁石

搭載されている超電導電磁石の諸元を Table 1 に、外観を Fig.2 に示す。二極磁場は最大で 2.88T、四極磁場は最大で 9.3T/m となっており、NbTi の鞍型コイルを適用している。本磁石においては二極・四極コイルを同軸に配置することで機能結合磁場を生成しており、各コイルは独立励磁可能となっている。コイルの外径側には電磁鋼板を積層したリターンヨークが設置されており、電磁力支持と磁場強度の増加に寄与している。本磁石は 360 度回転に対応するために冷媒を用いない伝導冷却を採用している。各磁石に複数搭載された小型 GM 冷凍機(1.5W@4.2K)のクールドヘッドと超電導コイルとを高純度アルミで接続することで冷却を行っている。ガントリー全体で 34 台の小型冷凍機を用いており、それぞれが約 30m のフレキシブルガスホースによってガントリー外部に設置された圧縮機と接続されている。

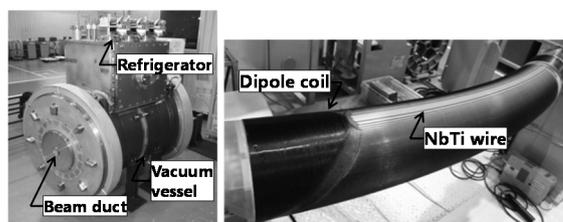


Fig.2 Left:LTS magnet, Right:saddle-shaped LTS coil (BM4)

Table 1 Specifications of LTS magnet

Specification	unit	BM01	BM02-	BM07	BM09
		BM06	BM05	BM08	BM10
Bending angle	deg.	18	26	22.5	22.5
Bending radius	m	2.3	2.3	2.8	2.8
Dipole field	T	2.88	2.88	2.37	2.37
Dipole current	A	136	136	227	231
Quadrupole field	T/m	9.3	9.3	-	1.3
Quadrupole current	A	130	130	-	200
Number of refrigerator	-	3	3	4	4

4. パターン励磁試験

粒子線がん治療装置では照射深さを粒子のエネルギーで制御している。そのため超電導電磁石は照射される粒子のエネルギーに応じて短い時間で励磁電流値を変更する必要がある。実際の治療を想定したパターン励磁試験を実施した。試験結果を Fig.3 に示す。実際の照射を模擬し初期化後ステップ状に励磁電流値を下げるパターンで励磁を行った。本励磁パターンにおいてコイル温度を測定した結果、初期温度 3.1K 程度に対し、最大温度上昇は 0.3K 程度と十分小さく、また、励磁時にクエンチも観測されず良好な結果が得られた。

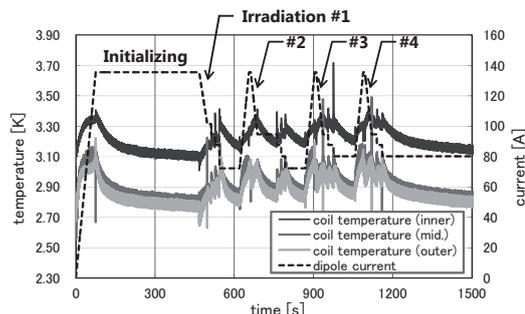


Fig.3 Coil temperature profile in pattern excitation (BM04)

5. まとめ

重粒子線がん治療装置用回転ガントリーの小型化を目的に超電導電磁石の適用を検討し、設計、製造、据付を完了した。製造に際し冷却・励磁試験等を実施し、良好な結果が得られた。現在ビームコミッショニングが実施されている。

参考文献

1. Y.Iwata, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 15, 044701 (2012).