

SuperKEKB ビーム最終収束用 QCS-L 超伝導電磁石クライオスタットの冷却試験 COLD TESTS OF THE QCS-L CRYOSTAT OF THE SUPERKEKB FINAL FOCUSING SYSTEM AT THE EXPERIMENTAL LABORATORY

宗占国[#], 大内徳人, 川井正徳, 近藤良也, 有本靖, 王旭東, 山岡広, 土屋清澄

ZONG Zhanguo, OHUCHI Norihito, KAWAI Masanori, KONDOU Yoshinari, ARIMOTO Yasushi, WANG Xudong,
YAMAOKA Hiroshi, TSUCHIYA Kiyosumi

High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho TSUKUBA, IBARAKI, JAPAN

Abstract

The QCS-L cryostat of the SuperKEKB final focusing SC magnet system accommodates four main SC quadrupole magnets (QCS), 20 SC correction coils (16 correction coils and 4 cancel coils), and one compensation SC solenoid (ESL), with two liquid helium (LHe) vessels. The cryostat was fabricated and was delivered to KEK Tsukuba campus by the end of 2015. Before installation to the accelerator beam lines in the interaction region (IR), the QCS-L cryostat was set-up and cooled in the KEK experimental laboratory with LHe from transportable dewars for excitation tests of SC magnets and magnetic field measurements, from February to July, 2016. This paper introduces the cooling requirements of the QCS-L cryostat and presents setting-up of the cold tests in the laboratory. All the 25 SC magnets were excited successfully to the operation currents and magnetic field measurements were carried out. This paper summarizes cooling processes of the cold tests and the measured cryogenic characteristics.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では、KEKB 電子・陽電子ビーム衝突型加速器の高輝度化を目的として SuperKEKB 加速器の建設を進めている。SuperKEKB 加速器では、標準模型を超える稀な物理現象を探索するために、KEKB の 40 倍のルミノシティを目指している[1]。このルミノシティは衝突点における電子と陽電子ビームサイズを 1/20 にして、ビーム電流を 2 倍に上げることによって達成する。SuperKEKB で目指すビームサイズは、幅 (水平方向) 10 μm 、高さ (鉛直方向) 50 nm である。このような極小のビームサイズを実現するため、SuperKEKB では、メインリングのラティスの変更、ビームパイプ形状の改良、陽電子ダンピングリングの導入、新たな最終収束用超伝導電磁石システムの建設など、さまざまな工夫がなされている[2]。

SuperKEKB ビーム最終収束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 極電磁石ダブレットから構成されている。そして、各超伝導 4 極電磁石は 1 ビームのみ通過するように設計されている。QCS 全体で 8 台の超伝導 4 極電磁石、ビーム運転調整用の 43 台の超伝導補正コイルと検出器 Belle-II ソレノイド磁場の影響をキャンセルする 4 台の超伝導補償ソレノイドが設置されている[3、4]。これらの超伝導電磁石は、ビーム衝突点 (IP) をはさんで左右 (加速器リング中心から IP を見て) に設置される 2 台のクライオスタット (左側のクライオスタットを QCS-L、右側のものを QCS-R と呼ぶ) に組み込まれる。QCS-L 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 (超伝導・低温・真空実験棟) で 6 か月間行い、励磁・磁場・断熱性能を確認した。本発表では、この実験室で構築された QCS-L 性能試験用冷却システム (図 1 と 2) の設計と実施された運転結果について報告する。

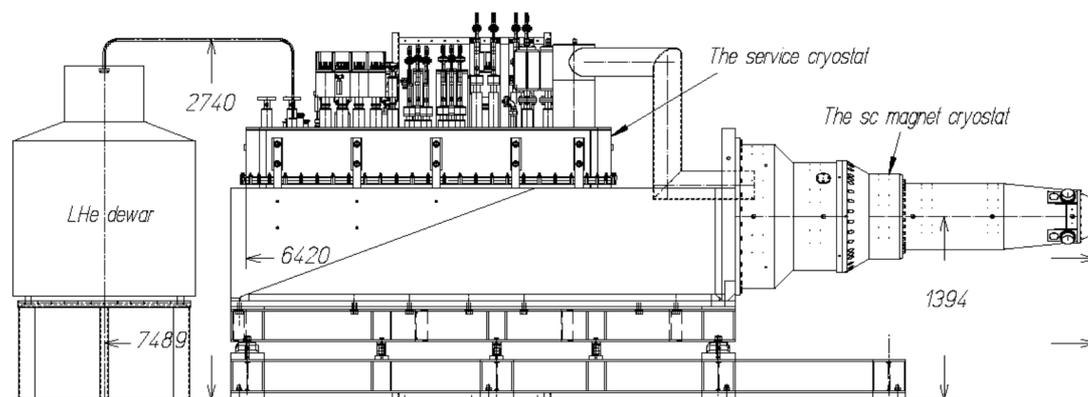


Figure 1: Setting-up of the QCS-L cryostat with transportable LHe dewar in the laboratory.

[#] zhanguo.zong@kek.jp



Figure 2: The QCS-L cryostat in the KEK laboratory.

2. QCS-L クライオスタット

QCS-L 内には、2 台の液体ヘリウム (LHe) 容器があり、これらの中に 4 台の超伝導 4 極電磁石、20 台の超伝導補正コイル及び 1 台の超伝導補償ソレノイドが設置されている。クライオスタット内で IP より遠くに配置される液体ヘリウム容器 (後方部 LHe 容器) には QC2LE 及びその補正コイルが、IP に近い方の液体ヘリウム容器 (前方部 LHe 容器) には QC1LP、QC2LP、QC1LE、補正コイル、及び超伝導補償ソレノイドが格納されている。

また、LHe 容器への外部からの熱負荷を減らすため、液体窒素 (LN₂) 熱放射遮蔽と多重層真空断熱 (MLI) の材料をクライオスタット内に設置する。各 LHe 容器は 8 本のサポートロッドによって真空容器に支持されている。サポートロッドの構成材料は低温でも靱性を維持することができ、熱侵入量の少ないチタン合金 (Ti-6Al-4V ELI) である[5]。LHe 容器の熱負荷は、主にサポートロッドからの熱伝導によるものである。このためサポートロッドを通じて LHe 容器 (4.2 K) へ侵入してくる熱を軽減するために LN₂ 熱輻射シールドの LN₂ 配管からサーマルアンカーが取られている。

QCS-L の冷却フロー図を図 3 に示す。QCS-L 内では、2 つの LHe 容器は、1 つの LHe フローによって直列に冷却される。LHe および LN₂ は、サービス容器 (the service cryostat) を経由して超伝導電磁石クライオスタット (the sc magnet cryostat) に供給される。インタフェースとしてのサービス容器は、超伝

導 (SC) 電磁石の電流リード、LHe の制御バルブ、計装配線のポートおよび低温トランスファライン (TRT) のバイオネットを収容するように装備されている。

QCS-L の超伝導電磁石は、異なる定格電流値の 51 本の電流リード (超伝導 4 極電磁石の場合は 8 本、ESL の場合は 3 本、補正コイルの場合は 5 セットのコンパクト電流リードユニット) を持つ (QCS 電流リードの詳細については文献[6、7]を参照)。QCS の電流リードは、LHe の蒸気ガスにより冷却される。QCS-L の全ての電流リードは、正常運転を維持するために約 30 L_{LHe}/hour (~1.0 g_{LHe}/s) の LHe 消費を必要とする。QCS-L サービス容器では、QC2LE とその 4 台の補正コイルの電流リードは LHe 供給ラインに、他の超伝導電磁石の電流リードは戻りラインに設置されている (図 3 に示す)。

3. QCS-L クライオスタットの冷却

3.1. 定常運転における冷却条件

QCS クライオスタットは Belle-II 測定器に挿入されるので、外形サイズは厳しい制限を受ける。このため超伝導電磁石コイルが浸漬される LHe の体積は非常に小さくなっている[8]。このような横型クライオスタットでは、LHe の蒸気ガス溜りによるコイル温度の上昇が懸念される。これを避けるために、過冷却 LHe (~0.16 MPa) による冷却方法を採用した。QCS 超伝導電磁石は、過冷却器 (サブクーラー) の熱交換器により作られる圧力 0.16 MPa、流量 20 g/s の単相過冷却 LHe による強制循環対流冷却方式で冷却される。液体ヘリウムは液の顕熱 (~2.0 W/g/s: 4.45 K~4.76 K、図 4 の A 点から B 点まで) により単相流の状態です約 40 W の熱負荷を吸収することができる。

3.2. 実験室における冷却

実験室には、冷凍機や過冷却器などの低温設備は装備されておらず、QCS 冷却試験は、液体ヘリウムデューワー (LHe dewar) から汲み出される液体ヘリウムを利用する。QCS クライオスタットは長い冷却配管を持つので、冷却方法として LHe プール沸騰方式でなく、二相流による強制対流方式を採用した。

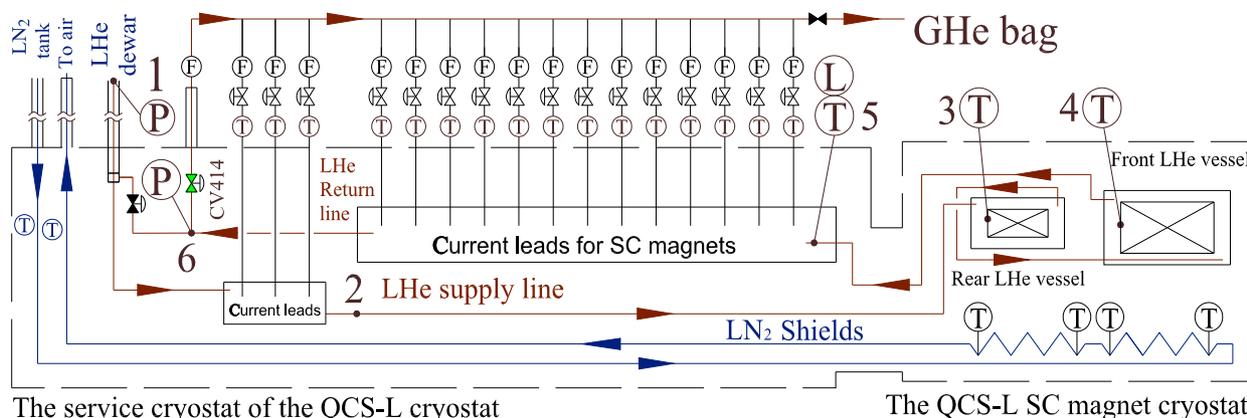


Figure 3: Cooling scheme of the LHe and LN₂ flows of the QCS-L cryostat.

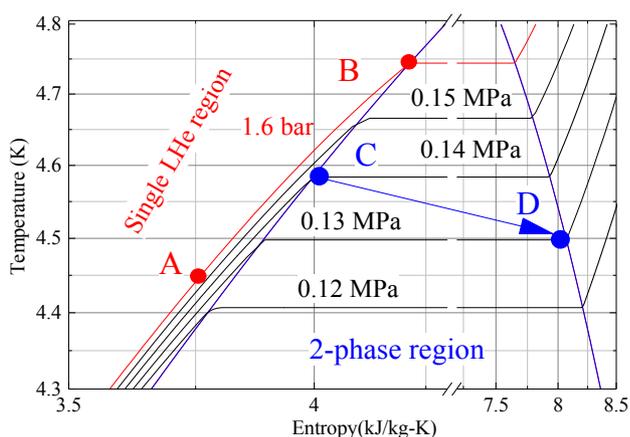


Figure 4: Cooling principles of the QCS-L cryostat, in helium diagram (T vs. Entropy).

冷却流量は、LHe デュワーから冷却チャンネルに沿った圧力降下によって維持される。熱負荷は、二相流内の LHe の蒸発潜熱 (約 20 W/g/s, 0.16 MPa の過冷却 LHe の 10 倍) によって吸収される。このようにして LHe の消費を減らすことができる。

実験室での冷却プロセスを図 4 に示す。C 点から D 点 (約 0.13 MPa) までは、それらの温度は過冷却 LHe の温度より常に高いわけではない。実験室における電源の台数の制限より、超伝導 4 極電磁石は 1 台ずつ、補正コイルは同時に最大 3 台まで励磁された。クライオスタットの熱的安定性を高めるために、もう 1 つの方法は、電流リードの冷却流量を 2 倍にし、電流リードに沿った温度勾配を減らすことである。

4. QCS-L の冷却プロセスと低温状態

QCS-L クライオスタットに備えられている主なセンサーを図 3 に示す。各電流リードの冷却ライン及びバイパスライン (CV414 を流れる) の冷却ヘリウ

ムガス流量は熱式流量計でモニターされる。それらのラインを流れる He ガス流量の合計は、LHe デュワーからの総質量流量と同じであった。後部および前部の LHe 容器の温度は、Cernox™ センサーによって測定される。また、電流リードの下部には LHe を貯める容器があり、電流リードのコールドエンドは LHe に浸されている。超伝導電磁石クライオスタット冷却後の二相流状態をモニターするために LHe の液面計が設置されている。今回の冷却試験では、冷却条件を確認するために、我々は 1 時間ごとに冷却システムの各測定機器の値を記録した。

図 5 は、磁場測定における典型的な 1 日の励磁、冷却プロセスを示しており、励磁された SC 電磁石の温度、質量流量、LHe レベル、および電流の変化が時間の関数として示されている。磁場測定終了後は液体ヘリウムのクライオスタットへの供給を停止するため、一晩 (約 8 時間) は加温状態となる。朝の段階で、クライオスタット内の温度は約 50K まで上昇する。午前 7 時 20 分に LHe がクライオスタットに液体ヘリウムデュワー (1000 L) より注入され、クライオスタット内は LHe 温度まで低下する。デュワー内の液体ヘリウムが無くなるとデュワーを交換しなければならない。交換作業は約 1 時間であり、この間は冷却過程は中断される。冷却プロセスの復帰後、LHe 液面レベルは 15 分以内に 80% まで上昇する。この時点でクライオスタットは SC 電磁石を励磁出来る状態となる。

冷却完了時に、バイパス流は、液体ヘリウムのオーバーフローによる (バイパス弁を通る不規則なまたは間欠的な流れの症状である) 流量の変動を示した。その場合、総流量は、デュワー圧力を減少させることによって徐々に減少し、それに対応して、冷却流に沿った圧力は、全質量流量の減少とともに低下した。後方部 LHe 容器と前方部 LHe 容器の温度は、二相流の飽和温度であった。またこれらの温度は容器内圧力、それに対応する全質量流量に依存していた。

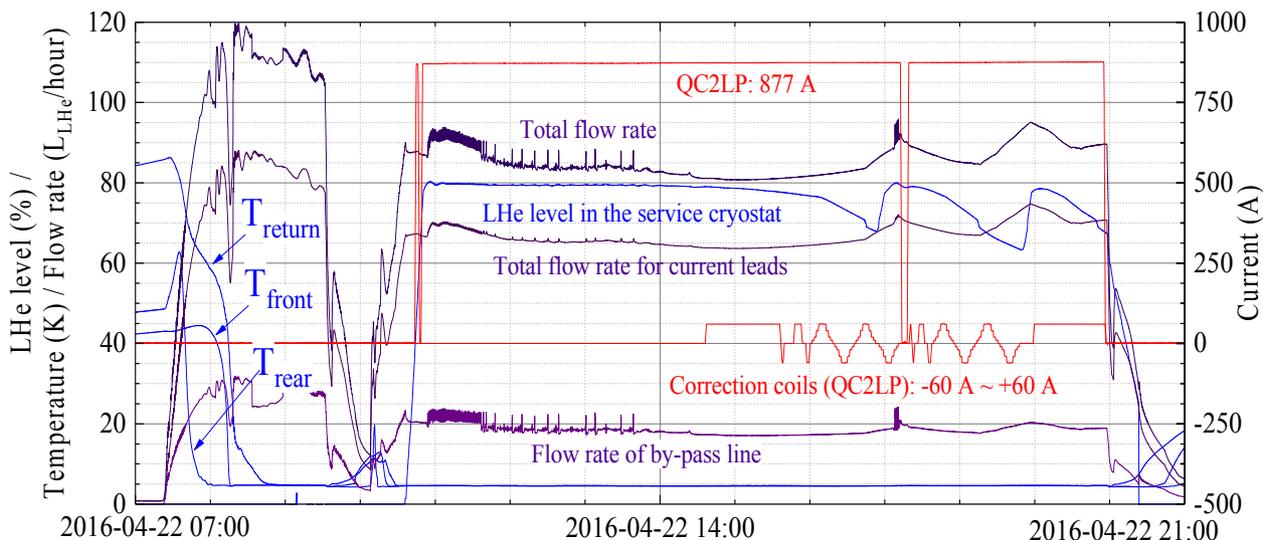


Figure 5: Evolutions of temperatures, mass flow rates, LHe level, and currents of excited SC magnets for one day test.

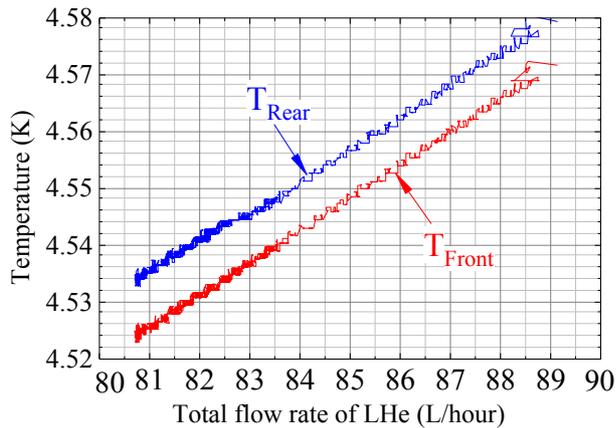


Figure 6: Temperatures of the rear and front LHe vessels vs. the total mass flow rates.

Table 1: Stable conditions of LHe flows in the dewar and the QCS-L cryostat, with a total mass flow rates of 2.89 g/s ($\sim 83.2 L_{LHe}/\text{hour}$ of LHe consumption, * measured data).

Point	T	P	m	%
-	K	MPa	g/s	LHe
1	4.592	0.141*	2.89*	100.00
2	-	-	2.53	84.58
3	4.545*	0.135	2.53	80.75
4	4.535*	0.134	2.53	41.13
5	~ 4.50	~ 0.13	2.53	37.30
6	4.489	0.129*	0.63*	~ 0.00

2 時間 (15 : 00 ~ 17 : 00) に渡って測定された後方部および前方部 LHe 容器の温度の全流量に対する依存性を図 6 に示す。温度は、0.133 MPa ~ 0.139 MPa の圧力範囲を有する二相領域において、4.524 K ~ 4.580 K の範囲であった。後方部と前方部の LHe 容器間の温度差は約 0.01 K であり、これらの間の配管での圧力損失は約 1.1 kPa であった。ゆらぎの少ない安定した温度は、超電導電磁石を励磁し磁場測定を行なうのに適していた。超電導電磁石の励磁および磁場測定を行なうために、クライオスタットを安定に維持出来る時間は約 10 時間であった。

表 1 は二相流における 2.89 g/s ($\sim 83.2 L_{LHe}/\text{h}$) の全質量流速における温度、圧力、質量流量、および LHe の含有率を示している。この流速を維持するために、LHe デュワーからクライオスタット出口までの圧力は、約 0.141 MPa および 0.129 MPa であった。後方部 LHe 容器と前方部 LHe 容器を流れるヘリウム二相流内の液体量は 80.75 % ~ 41.1 % であり、参考文献[9]において見積られた熱負荷分布に従って計算した。

5. 結論

SuperKEKB 最終収束超電導電磁石の QCS-L クラ

イオスタットは冷却性能試験、磁場測定のために、実験室に設置された。クライオスタット内の SC 電磁石は、LHe デュワーからの強制二相流によって冷却された。QCS-L クライオスタットの冷却条件は、SC 電磁石の安定した低温状態を示す温度、圧力、LHe レベル、および質量流量によって特徴づけられた。クライオスタットは毎朝約 50 K より、冷却作業 (液体ヘリウムのクライオスタットへの注入) が開始され、2 時間後に SC 電磁石を励磁出来る状態となった。磁場測定の可能な時間は、1500 L の LHe で約 10 時間であった。

超伝導・低温・真空実験棟で QCS-L クライオスタットを冷却し、すべての電磁石について安定して励磁することが出来た。また、筑波移設後の運転では、この低真棟で得られた冷却パラメーター (ガス流量等) が生かされている。

謝辞

本測定においては三菱システムサービス株式会社の田中氏、白石氏に装置の準備や現場作業について支援を受けた、三菱システムサービス株式会社の吉井氏、中村氏には測定用のソフトウェアの構築に協力を頂いた、また三立機械設計株式会社の青木氏には多くの装置の設計をして頂いた、さらに日立プラントメカニクス株式会社の遠藤氏には冷却システムに対して技術的な支援を頂いたことを深く感謝致します。

参考文献

- [1] H. Koiso, Commissioning status of high luminosity collider rings for SuperKEKB, Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, 2017, TUZB2, 1275-1280.
- [2] Y. Ohnishi *et al.*, Accelerator design at SuperKEKB, Prog. Theor. Exp. Phys. (2013) 03A001.
- [3] N. Ohuchi *et al.*, Design of the Superconducting Magnet System for the SuperKEKB Interaction Region, Proceeding of the PAC2013, Pasadena, CA, USA, 2013, 759-761.
- [4] Y. Arimoto *et al.*, Development status of SuperKEKB Quadrupole magnets for final focus of SuperKEKB, Proceedings of the PASJ 2014, Aomori, Japan, 2014, 132-136.
- [5] 土屋、大内 他, 加速器用超伝導マグネットの開発, 低温工学 Vol. 37(2002) No. 6, P248-256.
- [6] Zhanguo Zong *et al.*, Development of a compact HTS lead unit for the SC correction coils of the SuperKEKB final focusing magnet system, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, Volume 830, p. 279-286.
- [7] Z. G. Zong *et al.*, Current lead system of the SuperKEKB final focus SC magnet cryostats, Physics Procedia, Volume 67, 2015, p. 1102-1105.
- [8] 土屋、大内 他, 高エネルギー加速器セミナー-OHO' 87 (1987)、OHO' 97 (1997) .
- [9] 宗 他, QCS-L 冷却システム熱設計と熱負荷測定, 2017 年度春季低温工学・超電導学会, 2C-a05, p.98.