

SuperKEKB ビーム最終集束用超伝導電磁石冷却システムの試運転 COMMISSIONING OF THE SUPERKEKB FINAL FOCUSING SC MAGNET CRYOGENIC SYSTEMS

宗 占国^{#,A)}, 大内 徳人^{A)}, 有本 靖^{A)}, 川井 正徳^{A)}, 王 旭東^{A)}, 山岡 広^{A)}, 植木 竜一^{A)}, 青木 香苗^{A)}, 近藤 良也^{A)}, 土屋 清澄^{A)}, 遠藤 友成^{B)}

ZONG Zhanguo^{#,A)}, OHUCHI Norihito^{A)}, ARIMOTO Yasushi^{A)}, KAWAI Masanori^{A)}, WANG Xudong^{A)}, YAMAOKA Hiroshi^{A)}, UEKI Ryuichi^{A)}, AOKI Kanae^{A)}, KONDOU Yoshinari^{A)}, TSUCHIYA Kiyosumi^{A)}, ENDOU Tomonari^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Japan

^{B)} Hitachi Plant Mechanics Co., Ltd., Tsukuba, Japan

Abstract

The 55 final focusing SC magnets in the SuperKEKB interaction region are assembled into two cryostats (the QCS-L and QCS-R), located at the left and right sides of the accelerator interaction point, respectively. The two cryostats are cooled with subcooled liquid helium at 0.16 MPa and 4.5 K by two independent refrigerators of about 250 W cooling capacity. In February 2017, the two QCS cryostats were installed into the accelerator beam lines and in April were inserted into the Belle II detector. The cryostats were connected with the subcoolers and refrigerators. As cryogenic systems, commissioning was carried out to cool down the cryostats since May 2017, to excite the SC magnets and to test the cryogenic system interlock protections, before the magnetic field measurements for the accelerator operation in August 2017. This paper introduces the cryostats and cryogenic systems, and the cryogenic commissioning processes. The cryostat heat loads were measured and the results are presented in this paper.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では、小林 誠・益川敏英両博士のノーベル物理学賞受賞に結びつく成果を残した KEKB 加速器・Belle 測定器 (1999 年から 2010 年まで運転) のさらなる高性能化を目指した SuperKEKB 加速器・Belle II 測定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、衝突点におけるビームサイズを KEKB 加速器の 1/20 に絞り込むこと及び、蓄積ビーム電流を 2 倍に高めることにより KEKB 加速器が保持する衝突性能の世界最高記録 ($2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) を 40 倍に上げることを目指している。この性能アップに最も重要な役割を持つ装置は、衝突点における電子・陽電子ビームの縦方向サイズを 50 nm 程度にまで集束する QCS と呼ばれるビーム最終集束用超伝導 4 極電磁石システムである[1, 2]。

このシステムはビームラインに設置される超伝導 4 極電磁石ダブレットから構成されている。各超伝

導 4 極電磁石は 1 つのビーム (電子または陽電子) のみが通過する様に設計されている。QCS 全体では、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 Belle II 検出器用超伝導ソレノイドの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。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 (加速器メインリング MR 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 クライオスタットは、2015 年 12 月に KEK に納品され、ビームラインに設置する前に地上部実験室 (超伝導・低温・真空実験棟) で 6 か月間冷却試験を行い、励磁・磁場・断熱性能を確認した[3]。2016 年 6 月には QCS 設置前の SuperKEKB 加速器のビーム試運転 (Phase I) を完了した。8 月には QCS-L を SuperKEKB ビームラインに据付け、10 月には低温配管・低温制御配線・電流ケーブル配線工事を終了し、2 ヶ月間に渡る冷凍機による冷却試験・励磁試験は 2016 年末までに完了した。



Figure 1: QCS cryostats and cryogenic devices before the Belle II detector roll-in at the Tsukuba experimental hall.

zhanguo.zong@kek.jp

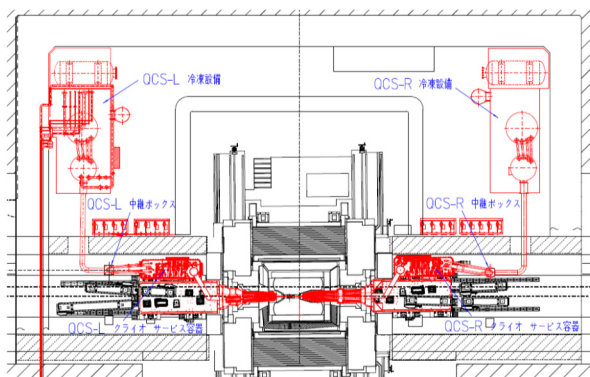


Figure 2: Two QCS cryostats of the SuperKEKB final focusing, inserted in the Belle II detector, and their cryogenic devices in the KEK Tsukuba experimental hall.

QCS-R 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、冷却システムは 3 月末までに建設された。Figure 1 に SuperKEKB ビームライン架橋上に設置された 2 台の QCS クライオスタット及び筑波実験棟地下 4 階 (B4) 地面に設置された冷凍機、液体ヘリウム過冷却器、低温配管などの写真 (加速器リング外周から) を示す。4 月には Belle II 測定器を衝突点にロールインし、QCS-L/R 両システムを両側から挿入して合体させた。Figure 2 には、Belle II 測定器、QCS クライオスタット、ヘリウム冷凍機、過冷却器、低温配管、電流リード用流量測定と調整ユニットの配置を示す。2017 年 5 月から QCS 冷却試験を開始し、Belle II 超伝導ソレノイド励磁下での QCS 超伝導電磁石の励磁試験・電源調整・インターロック試験を行い、6 月後半から 8 月末まで磁場測定を行った[4, 5]。今回の発表では、QCS 冷却システムのビームライン設置後の試運転について報告を行う。

2. QCS クライオスタットの冷却システム

2.1 冷却システムの設計

SuperKEKB ビーム最終集束の 55 台の超伝導電磁石は、2 台の QCS-L/R クライオスタットに各々 25 台/30 台が組み込まれた。クライオスタット内では、超伝導電磁石は、2 つの液体ヘリウム容器に分割して収納された。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 QC2E 及びその補正コイル (QCS-R は超伝導補償ソレノイド ESR23 もある) が、IP に近い方の液体ヘリウム容器 (前方部 LHe 容器) には QC1P、QC2P、QC1E、補正コイル、及び超伝導補償ソレノイド (ESL、ESR1) が格納されている。Figure 3 に QCS-R 内の超伝導電磁石の平面図を示す。

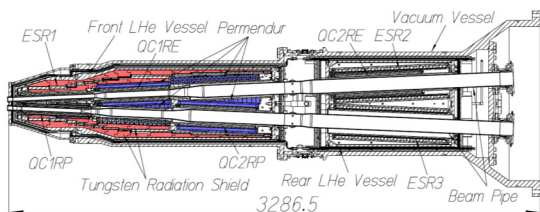


Figure 3: Cross section of the QCS-R magnet cryostat.

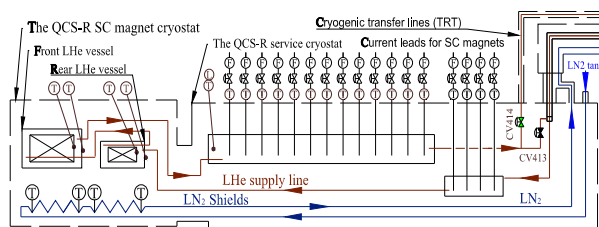


Figure 4: Cooling scheme of the service cryostat and SC magnet cryostat of the QCS-R, and the cryogenic sensors.

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。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 による冷却方法を採用した[6]。QCS クライオスタットは、過冷却器の熱交換器により作られる圧力 0.16 MPa、流量約 20 g/s の単相過冷却 LHe による強制循環で冷却される。液体ヘリウムは液の顕熱 (~2.0 W/g/s: 4.45 K~4.76 K) により単相流の状態 で約 40 W の熱負荷を吸収することができる。

Figure 4 に、QCS-R の超伝導電磁石クライオスタット (sc magnet cryostat) 及びサービス容器 (service cryostat) 内の液体ヘリウムフロー図を示す。QCS クライオスタット内では、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、サービス容器を経由して超伝導電磁石クライオスタットに供給される。インタフェースとしてのサービス容器は、超伝導電磁石の電流リード、LHe の制御自動弁、計装配線用ポートおよび低温トランスファライン (TRT) のパイオネットを収容するように設計されている。

QCS-L/R は、異なる定格電流値の 51 本/59 本の電流リードを持つ。QCS の電流リードは、LHe の蒸気ガスにより冷却される。一つの QCS の全ての電流リードは、正常運転を維持するために約 30 LHe/hour (~1.0 g_{LHe}/s) の LHe 消費を必要とする[7, 8]。

2.2 冷凍機

KEKB ビーム最終集束超伝導電磁石システムでは、2 台の QCS クライオスタット (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 台に増加したことから、クライオスタットの熱負荷・電流リード数の増大に対応するため、2 台の冷凍機が用いられる。SuperKEKB 加速器の QCS クライオスタットの定常運転時冷凍負荷は、クライオスタットと低温配管の熱負荷と電流リード冷却用液体ヘリウム量の和であり、1 台が当たりの冷凍負荷は約 60 W + 30 LHe/h (Table 1) である。SuperKEKB 超伝導電磁石システムでは、TRISTAN 加速器の QCS 用に 1990 年に製作された 4 台の He 冷凍機 (冷凍能力 4.5 K で 250 W、冷凍液化能力 160 W + 28.4 LHe/h) のうちの 2 台を再利用して使用された。2 台の QCS-L と QCS-R では、冷凍負荷が約 120 W + 60 LHe/h となり、1 台の冷凍機の冷却能力を越えた

ため、2基の冷凍機を使用し QCS-L・R を各々単独の冷却システムで冷却する設計となっている。

Table 1: Cold Masses and Heat Loads of the QCS Cryostats

QCS Cryostats	QCS-L	QCS-R	
the SC magnet cryostat	Total cold mass, kg	1522	3139
	Front LHe vessel, kg	1180	2076
	Rear LHe vessel, kg	342	1063
	Heat load of the two LHe vessels, W		
	Support rod	9.7	5.8
	Thermal radiation	6.6	10.1
	Instrument wires	0.9	0
	Sub-total, W	17.19	15.9
	Heat loads of the supply lines, W		
	Pipes of current leads	1.63	2.72
the service cryostat	Thermal radiation	0.55	0.71
	Cryogenic lines	2	2
	Instrument wires	0.8	0.75
	Sub-total, W	4.93	6.18
	Heat loads of the return lines, W		
	Pipes of current leads	9.86	9.75
	Thermal radiation	1.39	1.39
	Instrument wires	3.1	2.67
	Cryogenic lines&Valves	4	4
	Sub-total, W	18.3	17.81
Cryogenic transfer lines, W	16	16	
LHe flows for current leads, L _{LHe} /h	28.3	29.2	
Summary, W	56.42	55.89	

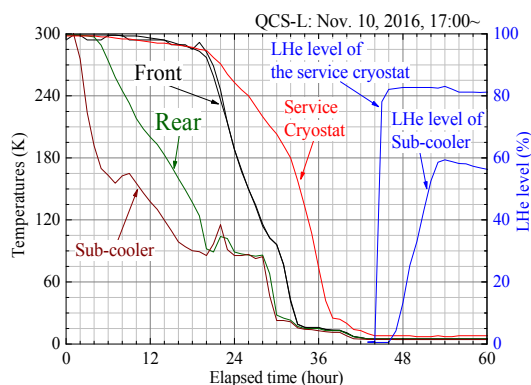


Figure 5: Cooling curves of the QCS-L cryostat, in its cryogenic system.

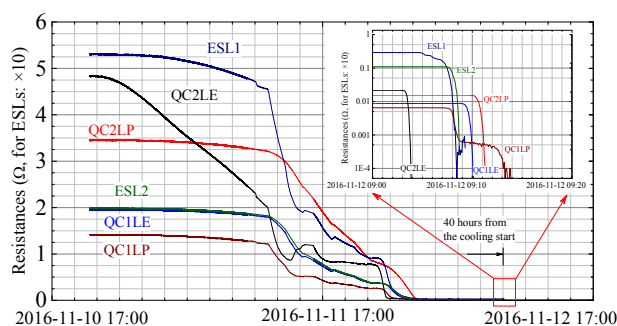


Figure 6: Monitored resistance evolutions of the SC magnets in the QCS-L cryostat.

3. QCS-L クライオスタットの冷却試験

3.1 QCS-L 冷却システムの初冷却

QCS-L 用冷凍機は、TRISTAN・KEKB 加速器で使用していたものを継続して（過冷却器及び低温配管は新規に製作）使用する。2013年2月に冷凍機単体での性能確認試験を実施し、冷凍能力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月には冷凍システムと QCS-L クライオスタットとの結合を行い、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の測定を行った。

Figure 5 には、2016年11月に行われた QCS-L クライオスタットの冷却曲線を示す。この曲線から、QCS クライオスタットを室温から液体ヘリウム温度まで冷却するのに約 40 時間（<2 日）必要であることが分かった。また、約 55 時間でサブクーラーに 55%の液体ヘリウムがまで貯まり、超伝導電磁石の通電が可能となる定常運転になった。

QCS クライオスタットのサイズは比較的大きいが、LHe 容器内の温度計は 1 つしか設置されておらず、超伝導電磁石が超伝導状態になっているかどうかの確認に多小の心配を感じた。そのため、最初の冷却試験では、Fig. 6 に示すように、4 極超伝導電磁石と超伝導補償ソレノイド（ESL1 と ESL2）の抵抗測定を行った。これらの超伝導電磁石の抵抗の変化は、QCS-L クライオスタットの温度計の温度変化と同じであった。LHe 容器が約 10 K（40 時間）に達すると、LHe 流の上流から下流に設置された超伝導コイルは順に超伝導状態となった。これにより、低温状態の温度測定と超伝導電磁石の超伝導状態の関連が確認された。

3.2 QCS-L クライオスタットの熱負荷測定

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求めた。Figure 7 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す。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量の変化から計算した。縦軸の冷凍能力は内蔵ヒーターのパ

ワーより求めた。Figure 7 より、液化量 30 L_{LHe}/h(QCS-L 超伝導電磁石全体電流リードの定格流量)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。

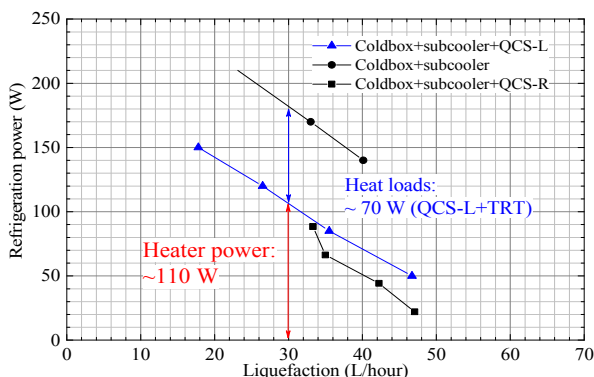


Figure 7: Measured refrigeration and liquefaction capacities of cryogenic system with and without the QCS-L and QCS-R cryostats.

Table 2: Heat Loads of the QCS-L Support Rods of the LHe Vessels and Support Pipes for the Current Leads

Item	QCS-L Cryostats			
	service	sc magnet	Total	Diff.
Cal. from 150 K	19.1	13.2	32.3	
Design, 120 K	11.5	9.7	21.2	11.1

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。このため、サポートロッドと電流リードの挿入配管を通じて LHe 容器 (4.2 K) へ侵入してくる熱を軽減するために LN₂ 配管からサーマルアンカーが取られている。実際は低温試験時の測定されたサーマルアンカー温度は設計の温度 (120 K) より、高かった (~150 K)。Table 2 にはサーマルアンカー温度より計算した熱伝導負荷を示す。この熱負荷差の 11.1 W を考慮すると QCS-L は総熱負荷 67.5 W (11.1 W + Table 1 の 56.4 W) となり、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。

4. QCS-R クライオスタットの冷却試験

QCS-R 用冷凍機は、TRISTAN 実験終了の 1996 年から 20 年間保管されていた冷凍機を移設・整備し、2017 年 3 月に QCS-R クライオスタットと結合をし、5 月から冷却システムの動作確認と冷却及び加熱試験、冷凍負荷測定、インターロック試験を実施した。初回の冷却では 20 K までしか冷却できなかった、冷凍機の入口フィルターの分解点検、クライオスタットと低温配管の断熱真空層の真空引き、冷凍機膨張タービンの調整等を行い、2 回目の冷却 (Fig. 8 には QCS-R の冷却曲線を示す、過冷却器の温度は 230 K から) では、約 44 時間で液

体ヘリウム温度まで冷却することができた。また、約 65 時間で過冷却器に 55%まで LHe が貯まり、超伝導電磁石通電可能な定常運転になった。Figure 9 には QCS-R の超伝導電磁石コイルの抵抗変化を示す。

2017 年 8 月には、磁場測定を行うため、3 回目の冷却 (過冷却器の温度は室温から) を行ったが、約 20 K 付近で冷却が停止し、液ヘリウム温度に達するには約 80 時間、定常運転には約 100 時間を要した。この長時間を要した原因として、冷凍システムの冷却ガス流量や圧力の調整不足と予冷時に使用する冷凍機のバイパス自動弁シートからの低温ガス (~7 K) の漏れ (約 1 g/s) が考えられる。他の原因としては、QCS-L に比べ QCS-R は LHe 容器の質量が重い (Table 1 に) ことが考えられる。

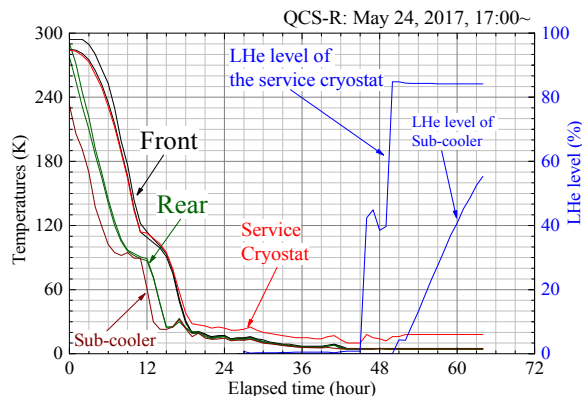


Figure 8: Cooling-down curves of the QCS-R cryostat for the first time to reach LHe temperatures.

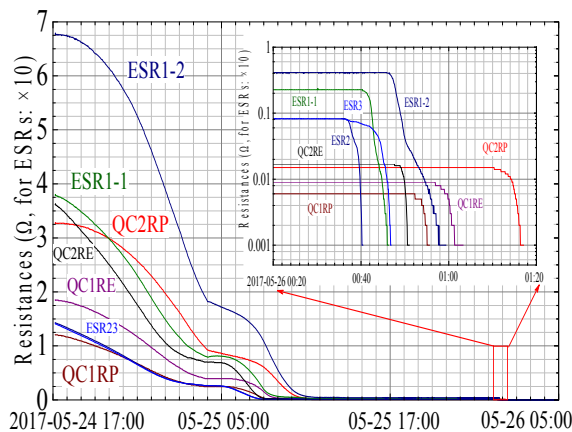


Figure 9: Monitored resistance evolution of the QCS-R SC magnet coils.

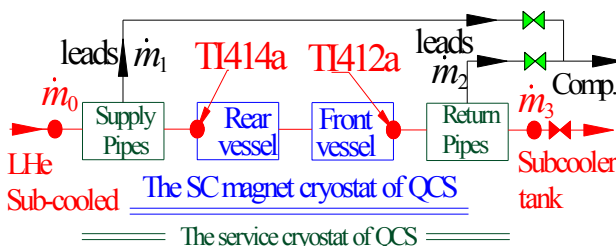


Figure 10: Cooling scheme of the QCS cryostats and positions of the Cernox temperature sensors.

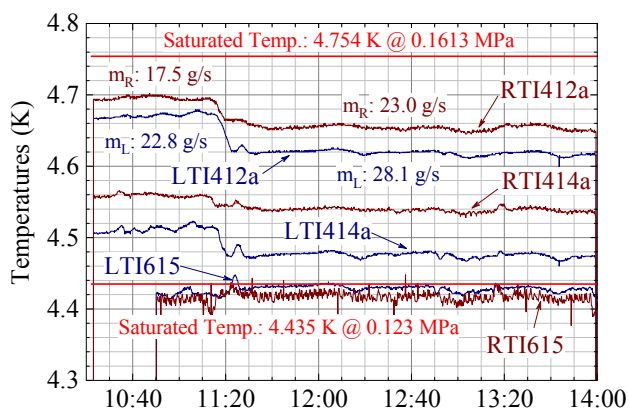


Figure 11: Measured temperatures and LHe flows of the QCS-L/R cryostat LHe vessels and subcoolers.

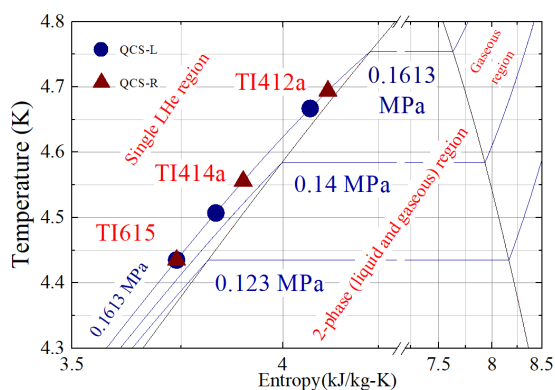


Figure 12: Cooling processes of the QCS-L/R cryostats in the helium T-S diagram.

5. QCS クライオスタットの単相 LHe 冷却

QCS クライオスタット内には、2 つの LHe 容器があり、これらの中には QCS 超伝導電磁石が設置されている。2 つの LHe 容器は、1 つの過冷却 LHe フローによって直列に冷却される。QCS クライオスタットの冷却は、等圧プロセスであり、クライオスタットへの侵入熱は、過冷却 LHe の温度上昇によって吸収される。このため、温度を測定することにより、熱負荷を計算し、LHe の過冷却状態を確認することができる。

後方部および前方部容器の LHe 温度は、Cernox 温度計 (感度: $\sim 80 \Omega/K @ 4.5 \text{ K}$) によって測定される。Figure 10 に LHe 容器の冷却フローと Cernox 温度計の位置を示す。測定された QCS-L/R クライオスタット内 LHe 容器の温度は Fig. 11 及び Fig. 12 (He の T-S 線図) に示す。QCS クライオスタットの入口温度としての過冷却器温度 (TI615) は、過冷却器圧力 (0.123 MPa) の飽和温度で、4.44 K である。過冷却 LHe の温度は、サービス容器の供給配管、後方部および前方部 LHe 容器の熱負荷により、上昇する。Figure 12 に示すように、後方部 (TI414a) および前方部 (TI412a) LHe 容器の温度は、クライオスタット圧力 (0.161 MPa) の飽和温度 (4.75 K) よりも低く、このことより、すべての QCS 超伝導電磁石は過冷却 LHe で冷却されていることが確認できた。

LHe の温度上昇より求めた QCS クライオスタットの熱

負荷を Table 3 に示す。この熱負荷分布の評価により、QCS-L/R 液体ヘリウム供給ライン、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 37.4 W/32.3 W であり、単相液体ヘリウムであるための最大許容熱負荷約 40 W よりも小さいことが分かった。以上の結果より、QCS 超伝導電磁石は単相液体ヘリウムに浸漬され、安定に冷却されていることを確認した。

QCS-L の LHe 容器の熱負荷 (Q2) は、QCS-R より大きい。これは QCS-L に働く電磁力が QCS-R のものより大きいため、断面積の大きなサポートロッドが用いられ、その熱伝導による侵入熱が大きいことによる。

Table 3: Measured Heat Loads of the QCS-L/R Cryostats

The QCS cryostats	QCS-L	QCS-R
mass flow rates (g/s)	22.6	17.4
Supply line (Q1, W)	12.5	14.9
Two LHe vessels (Q2, W)	24.8	17.4
Total heat loads (W)	37.4	32.3

6. 結論

2017 年 4 月～8 月にかけて、SuperKEKB 最終集束超伝導電磁石システムの 2 台の QCS-L・R クライオスタットは実運転状態で冷却され、磁石の励磁試験・磁場測定が行なわれた。QCS クライオスタットの冷却状態は冷却マージン (過冷却器のヒータパワー) と温度の測定より推測され、LHe の過冷却状態を確認することができた。その後、QCS 電流リードの改良工事、QCS-R 冷凍機の自動弁のシート漏れ修理 (2017 年秋) を行った。SuperKEKB 加速器の Phase II 運転前の 2018 年 2 月には、冷却システムの再度冷却試験を行い、クライオスタットがスムーズに冷却できるように自動制御のパラメータの調整を行うと共に再度の熱負荷測定を実施し、加速器の要素としての使用に問題がないことを確認した。

謝辞

本研究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、また三立機械設計株式会社の青木氏に支援を頂いたことを深く感謝致します。

参考文献

- [1] N. Ohuchi *et al.*, PAC2018, Paper: TUZGBE2.
- [2] 大内 他, PASJ2017, Paper: TUOM05.
- [3] 宗 他, PASJ2017, Paper: TUP064.
- [4] 大内、有本、川井、宗 他, CSSJ2017s, CSSJ2017a.
- [5] N. Ohuchi *et al.*, MT2017, Paper: Mon-Af-Pol.11-09.
- [6] 土屋、大内 他, 高エネルギー加速器セミナー-OHO' 87 (1987)、OHO' 97 (1997) .
- [7] Zhanguo Zong *et al.*, NIMA, Volume 830, p. 279-286.
- [8] Z. G. Zong *et al.*, Physics Procedia, Volume 67, 2015.