

SuperKEKB 加速器 Phase2&3ビーム運転における QCS 冷却システム CRYOGENIC SYSTEMS OF THE FINAL FOCUSING SC MAGNETS IN THE SuperKEKB ACCELERATOR PHASE 2&3 COMMISSIONINGS

宗 占国^{#, A)}, 大内 徳人^{A)}, 山岡 広^{A)}, 川井 正徳^{A)}, 有本 靖^{A)}, 王 旭東^{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)}, YAMAOKA Hiroshi^{A)}, KAWAI Masanori^{A)}, ARIMOTO Yasushi^{A)}, WANG Xudong^{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 SuperKEKB final focusing SC magnets (QCS) are assembled into two cryostats (QCS-L and QCS-R), which are cooled by two individual refrigerators. In the year 2016 and 2017, the QCS-L and QCS-R cryogenic systems were constructed and were commissioned to test their performance and operation functions. In 2018 and 2019, the QCS systems were operated with the SuperKEKB accelerator commissionings of Phase 2 (March 19 to July 17, 2018) and Phase 3 (March 11 to July 1, 2019) for beam collision tuning and physics data taking. The two QCS cryogenic systems were subjected to maintenance and improvement works for the accelerator commissionings. In this paper, the operation status and experience of the QCS cryogenic systems will be presented.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では、1999年から2010年まで運転した電子・陽電子衝突型加速器KEKBのアップグレードとして、SuperKEKB加速器を建設した。2018年に加速器ビーム衝突調整のための試験運転(Phase 2)を行い、2019年からは物理 run を行いながら、加速器性能向上を目指した調整運転(Phase 3)が行われている。KEKB加速器は、2009年に設計値の2倍を越える世界最高性能の $2.11 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のルミノシティ(衝突型加速器の性能)を達成した。SuperKEKBではKEKBに比べて、衝突点(IP)でのビームサイズをKEKB加速器の1/20(KEKBの $110 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ からSuperKEKBの $10 \mu\text{m} \times 50 \text{ nm}$ まで)に絞り込み、蓄積ビーム電流を2倍に上げることによって、KEKBで達成された最高ルミノシティの約40倍の $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を目指している[1]。

このビームサイズを実現するために、衝突点の一番近い位置に最終集束用超伝導電磁石システム(QCS)が設置されている。SuperKEKBのビーム最終集束用超伝導電磁石システムQCSは、55台のいろいろな種類の超伝導電磁石で構成されており、2台のQCS-L/QCS-Rクライオスタットに各々25台/30台が組み込まれた[2]。2017年4月に、QCS-L/QCS-R両クライオスタットをSuperKEKBビームラインに据付け、Belle II測定器の両側から挿入して合体させて、各自の冷却システムとの接

続(冷凍機と過冷却器)を行った。2017年5月~8月にかけて、QCS-L/R冷却システムは実運転状態で冷却され、冷却システムインターロック試験・超伝導電磁石の励磁試験・磁場測定が行なわれた。QCS冷却システムが、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。

SuperKEKB加速器のコミッショニングは、Phase 1、Phase 2、Phase 3の三段階で以下のスケジュールと内容のとおりに分けて行われた[3, 4]。

- Phase 1: 2016年2月1日から6月28日まで、QCSとBelle II測定器は設置されず、ビーム衝突も行わなかった。入射とビームで真空焼き出しなどの基本的なビーム調整を行った。
- Phase 2: 2018年3月19日から7月17日まで、QCSとBelle II測定器(VXD除外)は設置されるが、QCSを用いた状態で加速器ビーム入射、蓄積と衝突調整を行った。主な目的はナノビーム方式の検証、Belle II測定器に対するビームバックグラウンドの理解と低減、入射システムの確立である。
- Phase 3: 2019年3月11日から7月1日まで、物理実験を行いながら、SuperKEKB加速器の設計性能を目指して調整を進めた。

Figure 1にSuperKEKBのビームとQCS冷却システムの運転スケジュールを示す。SuperKEKB加速器のPhase 2&3において、QCSシステムは本格的に稼働した。本発表では、SuperKEKBのPhase 2&3ビーム運転におけるQCS冷却システム運転について報告する。

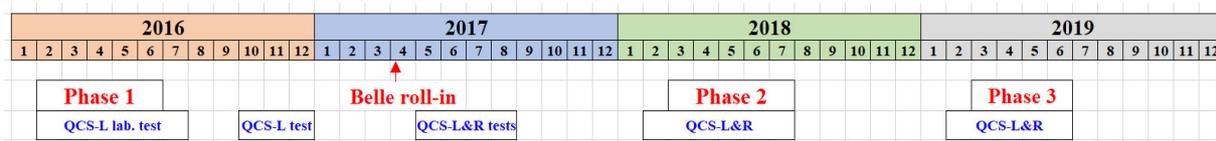


Figure 1: Schedules of the QCS systems and the SuperKEKB accelerator commissionings.

zhanguo.zong@kek.jp

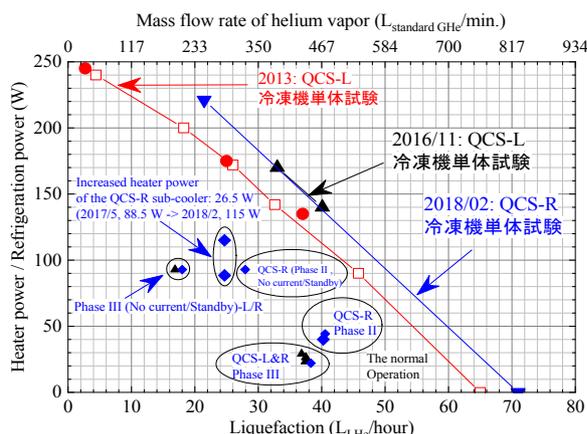


Figure 2: Cooling powers of the QCS refrigerators and working points.

2. QCS 冷却システムの試運転

SuperKEKB 加速器の QCS クライオスタットは、前のプロジェクト (TRISTAN と KEKB) の経験・運転実績を参照して、ヘリウム冷凍機と過冷却器の熱交換器により作られる圧力 0.16 MPa の単相過冷却液体ヘリウム (LHe) による強制循環で冷却される [5]。流量約 20 g/s の過冷却 LHe は液の顕熱 (~2.0 W/g/s: 4.45 K~4.76 K) により単相流状態で約 40 W の超伝導電磁石液体ヘリウム容器の侵入熱を吸収することができる。QCS 冷却システムの熱負荷は、超伝導電磁石 LHe 容器、サービス容器、低温配管の侵入熱と電流リード冷却用液体ヘリウム量 (抜出量) がある。

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 台の超伝導電磁石で構成され、トータル熱負荷: 75 W+29 L_{LHe}/h) を 1 台の冷凍機 (冷凍能力: 159 W+29 L_{LHe}/h) 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に 1 台が当たりの熱負荷は約 75 W+30 L_{LHe}/h になり、1 台の冷凍機では 2 台の超伝導電磁石クライオスタットの熱負荷を冷却することができない。また、QCS のクエンチ後の再冷却時間の短縮が加速器運転の条件になっていることから、SuperKEKB では 2 台のヘリウム冷凍機を使用して其々単独で冷却する事とした。TRISTAN 加速器の QCS 用に 1990 年に製作された 4 台の He 冷凍機 (冷凍能力は 4.5 K で 250 W または液化能力 70 L_{LHe}/h) のうちの 2 台を再利用することとした。

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 (Fig. 2) 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 月には冷凍機、過冷却器と 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た。

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し、5

月から冷却システムの動作確認と冷却及び加温試験、冷凍能力測定、インターロック試験を実施した。2017 年 5 月~8 月にかけて、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。その間に、QCS クライオスタットの熱負荷と冷却マージンを測定し、超伝導電磁石の過冷却状態を確認した [6, 7]。

3. QCS 冷却システムの調整

3.1 QCS-R 冷却システムの調整

QCS-R 冷凍機では、2017 年 5 月の冷却試験において、コールドボックス深冷部バイパス調節弁からの冷却ヘリウムガス (~7 K) のシートリーク (低圧部容器の圧力変化により計算で約 1 g/s) があったため、クライオスタットの冷却が 20 K で停滞し、また冷凍能力が建設時より約 20 W 程度少ない状態となった。そのため、Phase 2 運転開始までに修理・改良等を行い、2018 年 2 月に冷却システムの再冷却試験を実施し、20 K からの冷却状態を調べた。試験結果として、QCS-R 電磁石が 20 K まで冷却された時、冷凍機に戻る低温ヘリウムガス温度が冷却モードを進める設定値より高温であったため、冷却が停滞した。この温度設定値は KEKB の QCS 冷却システムで使用していた値であり、KEKB 用 QCS クライオスタットよりも、SuperKEKB 用 QCS クライオスタットのコールドマス及び熱負荷が増加したことが原因であった。この温度設定値を上げる (28 K から 32 K に変更) と、冷凍機が強制的に次の冷却モードに移行し、QCS クライオスタットから戻ってくる低温ヘリウムガスが、冷凍機の低温熱交換器を順番に経由するので、低温ヘリウムガスの顕熱を十分に利用する事ができ、冷凍機の冷凍能力は大幅に改善され、約 48 時間で超伝導電磁石を 4.5 K まで冷却し、55 時間で通電可能状態になった (Fig. 3)。

深冷部バイパス自動弁のシートリークの影響は、修理前後で過冷却器内蔵ヒーターの出力 (定常運転時の余剰冷凍能力) の変化 (液化能力の 24.6 L_{LHe}/h でヒーター出力が増加: 88.5 W->115 W) によって推定でき、約 26.5 W である (Fig. 2)。その後、QCS-R クライオスタットを接続しないで、冷凍機の単体性能試験を行った。QCS-L/R の 2 台の冷凍機は同じ冷却能力 (約 250 W または 70 L_{LHe}/h 液化能力) を有することを確認した。

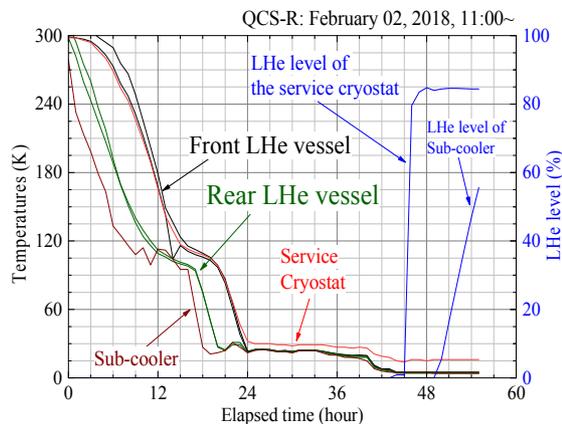


Figure 3: Cooling curves of the QCS-R cryogenic system.

Table 1: Monitored Parameters of the Main QCS-L&QCS-R Current Leads

QCS-L	Lead	I	Helium flow		ΔV	QCS-R	Lead	I	Helium flow		ΔV
			rate	temp.					rate	temp.	
			A	SLPM					K	mV	
QC1LP	J	1597	47.9	259	26	QC1RP	J	1596	45.4	261	27
	K		47.8	258	26		K		45.7	254	28
QC1LE	J	1581	46.7	258	24	QC1RE	J	1487	44.7	254	24
	K		46.6	260	24		K		43.8	257	24
QC2LP	J	877	29.9	272	27	QC2RP	J	880	27.1	270	27
	K		30.1	272	28		K		26.5	268	26
QC2LE	J	1001	30	276	30	QC2RE	J	1246	34.6	266	29
	K		29.4	276	29		K		34.9	266	28
ESL	LSA	390	20	269	23	ESR1	RSA	451	20.3	272	26
	LSB		19.4	267	22		RSB		19.3	266	24
	ELM		9.9	295	-		RS23		150	18.2	299

3.2 QCS 電流リードの冷却

QCS-L/QCS-R クライオスタットのサービス容器には、組み込まれた電磁石を単独励磁できるように 51 本/59 本のヘリウムガス強制冷却型電流リードが取付けられている。電流リードでは、室温にある電流源から液体ヘリウム温度 (~4.5 K) に冷却された超伝導電磁石などの機器へ電流を供給する装置である。液体ヘリウム温度に電流を導入するために、電流リードを介した伝導による熱と電流の通電によるジュール発熱が極低温へ侵入熱となる。電流リードは、電流リードからの侵入熱による蒸発ガスが電流リード本体を冷却し、電流リードの室温出口からヘリウム圧縮機入口に直接戻り、冷凍機の液化能力を消費する。1 台の QCS 用クライオスタットでは、設計定格で約 30 L_{LHe}/h の液化能力が必要になる。

8 台の 4 極超伝導電磁石、ESL 及び ESR1 は、市販の従来型の電流リードを使用した。ESR23 と補正磁石用の電流リードは KEK で開発し、1 ユニットに 8 本電流リードを持ちコンパクト化されたもので、リード低温端に高温超電導テープ線材 (Y 系 2G HTS) を使用している[8]。この結果、低温端の温度勾配が低くなり、液体 LHe への侵入熱を抑える。電流リードの冷却は、自動制御調節弁でヘリウムガス流量を制御し、室温端ガス出口の温度、電流リード本体の電圧降下などを安全パラメータとして測定・監視をしている。QCS-L/R の冷却システムでは、16 セット/17 セットの電流リード用ガス流量用の自動調節弁、ガス流量計と温度計がある。Table 1 には、SuperKEKB 加速器のビーム運転における、8 台の 4 極超伝導電磁石、ESL、ESR1 及び ESR23 の電流リードの実際の電流値、ヘリウムガス流量、室温端のガス温度、電圧降下などを示す。

QCS-L/QCS-R 冷却システムでは、電流リードを安定させるために、設計値の約 1.3 倍の 435 SLPM/450

SLPM (Standard Liter Per Minute) の冷却ガスを流し、QCS 冷凍機の冷却能力の約半分以上 (液化能力 70 L_{LHe}/h の 40 L_{LHe}/h) が電流リードの冷却に利用されることになる。QCS 超伝導電磁石が励磁されていない時 (メンテナンスの日など、Standby mode) に電流リードの過冷却を防ぐために、冷却用ヘリウムガス流量を減らすことで、過冷却器内蔵ヒーター出力値が大きくなった。

4. QCS 冷却システムの運転

4.1 QCS 冷却システムの冷却能力

Figure 2 に QCS-L/R 定常時の冷却能力を示す。横軸の液化能力は、QCS-L の 16 セット、QCS-R の 17 セットの電流リードの冷却ガス流量から計算した値である。縦軸の冷凍能力は、定常時の余剰冷凍能力として、過冷却器内蔵ヒーターの出力値である。QCS クライオスタットを接続しない場合の冷凍能力に比べて、その冷凍能力差は低温配管とクライオスタットの熱負荷と考えられる。

QCS-L 冷却システムは、Phase 2 に余剰冷凍能力が 20 W であった。Phase 2 運転終了後の 2018 年 7 月に、冷凍機の膨張タービンの運転関数の調整を行い、冷凍能力が約 50 W まで (しかし、タービン調整後、直ぐにシステムの加温を行った為、効果を確認した運転時間は短かった。) 増加した。Phase 3 運転では、余剰冷凍能力が 20 W になった。QCS-R 冷却システムは、Phase 2 に 40 W の余剰冷凍能力があったが、Phase 3 は 20 W になった。両冷却システムの熱負荷は約 20 W 増加した。現在、低温配管の表面温度が冷えていたことから、真空断熱性能が悪化し、低温配管の侵入熱により熱負荷の増加が影響していると考え、夏期メンテナンスの間に調査・対策 (低温配管の Baking など) をしている。

Table 2: Currents, Inductions, Stored Energies and Corresponding the LHe Volumes

Design	QC1P	QC1E	QC2P	QC2E	ESL	ESR1	ESR23
I, A	1800	2000	1000	1250	390	450	151
L, mH	0.88	2.19	7.32	13.3	2500	8000	140
E, kJ	1.43	4.38	3.66	10.38	190.13	810.0	1.60
V_{LHe}, L	0.66	2.02	1.69	4.78	87.64	373.38	0.74

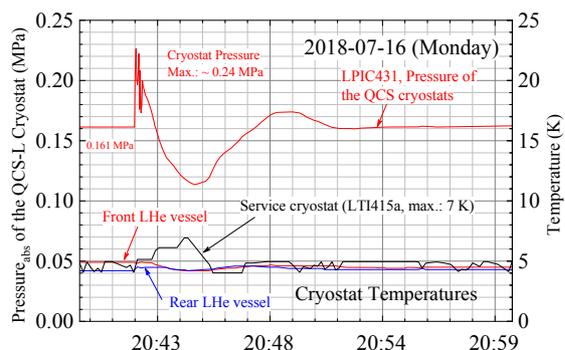


Figure 4: QCS-L pressure and temperatures after quench.

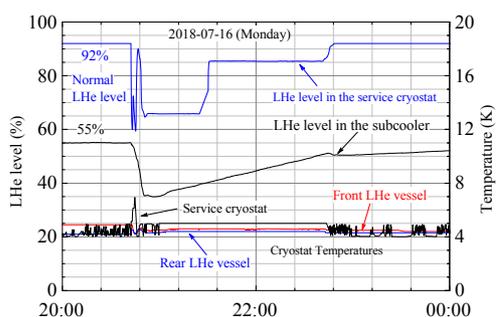


Figure 5: QCS-L recovery from quench.

4.2 冷却システムの超伝導磁石クエンチ復帰

SuperKEKB 加速器の QCS 冷却システムは、TRISTAN・KEKB の QCS 冷却システムの運転経験と実績から、プロセス制御計算機により、冷却制御及び監視を行っている。冷凍機を熟知した運転員でなくても運転ができるよう、冷却・加温・各種トラブルに対する処置をすべて自動化した。

SuperKEKB の QCS システムでは、Phase 2 運転の開始から、ビーム起因による QCS クエンチが問題となった。クエンチが発生しても超伝導 4 極電磁石と超伝導補正電磁石は蓄積エネルギーが小さくて (Table 2)、クライオスタットの圧力と冷凍機状態に影響しない。クエンチ発生後は、超伝導電磁石の超伝導コイルの電気絶縁、クエンチした時の電圧波形とクエンチの原因を確認して、すぐに再励磁ができる。超伝導補償ソレノイド (ESL・ESR1) は蓄積エネルギーが大きく、クエンチが発生したら、冷却システムは自動でクエンチ対応モード及び冷凍機復旧モードに入り、数分内でクライオスタットの圧力・温度が安定になり (Fig. 4)、約 3 時間 (Fig. 5, 2018 年 7 月 16 日に ESL 電源トラブルにより QCS-L 側全マグ

ネット電源遮断、自動でクエンチ復帰処理の実績)後に再励磁が行える。

Phase 3 中に QCS-R の ESR1 が 1 回クエンチした。冷凍機は自動制御により復帰モードへ移行したが、途中でヘリウム圧縮機が異常停止したため、正常に復帰ができなかった。この異常停止により QCS-R クライオスタットは 70 K まで温度上昇し、再冷却では定常になるまで 58 時間を要した。現在、ヘリウム圧縮機の異常停止と再冷却時間の超過に付いて原因を調査しており、結果について、今後報告していく。

5. 結論

SuperKEKB 加速器の Phase 2&3 に向けて、QCS-L/R 冷却システムは、QCS-R 冷凍機の調節弁シート漏れ修理、電流リード流量制御の改良、冷却システム運転制御ソフトの変更を行った。加速器 Phase 3 ビーム運転に先駆け、2019 年 1 月に QCS 冷却システムの再冷却試験を行い、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熱負荷測定を再度実施した。SuperKEKB 加速器の Phase 2&3 において、QCS 冷却システムは、加速器の要素として連続運転を行った。

今後の SuperKEKB 加速器に伴う長期運転に向けて、定期保安検査・経年劣化部品の点検と交換・冷却能力の保持を進めていく必要がある。また、SuperKEKB 加速器の性能増強に伴って QCS 冷却システムの性能向上にも検討しなければならない。

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、中村氏、吉井氏、白石氏、USI-エンジニア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] Kazunori Akai *et al.*, NIMA, 907 (2018) 188-199.
- [2] 大内 他, PASJ2017, Paper: TUOM05.
- [3] 船越 他, PASJ2016, Paper: MOOL02.
- [4] 大西 他, PASJ2018, Paper: WEOLP01.
- [5] 土屋、大内 他, 高エネルギー加速器セミナー-OHO' 87 (1987)、OHO' 97 (1997) .
- [6] 宗 他, PASJ2017, Paper: TUP064.
- [7] 宗 他, PASJ2018, Paper: THP003.
- [8] Zhanguo Zong *et al.*, NIMA, 830 (2016) 279-286.