研究論文

KEKB ビーム衝突点用冷却システムとその運転実績

川井 正徳^{*1,†}, 大内 徳人^{*1}, 近藤 良也^{*1}, 榎田 康博^{*1},
土屋 清澄^{*1}, 遠藤 友成^{*2}, 兼清 貴之^{*2}

Cryogenic System in the KEKB Beam Interaction Region and Operation Experience

Masanori KAWAI^{*1,†}, Norihito OHUCHI^{*1}, Yoshinari KONDO^{*1}, Yasuhiro MAKIDA^{*1},
Kiyosumi TSUCHIYA^{*1}, Tomonari ENDO^{*2} and Takayuki KANEKIYO^{*2}

Synopsis: Two types of superconducting magnets were installed in the beam interaction region of the KEKB accelerator. One was a QCS superconducting magnets for final focusing of the e^- and e^+ beams, and the other was a huge superconducting solenoid for the particle detector, Belle. While the two magnets had completely different cold masses, two refrigerators of the same cooling power were used during the long-term 12-year operation for the KEKB physics experiment. This paper briefly describes these two cryogenic systems, and reports the operational problems and development of the cryogenic systems for SuperKEKB.

Keywords: KEKB, beam interaction region, superconducting magnets, helium refrigerator, long term operation

(Some figures in this article may appear in colour only in the electric version)

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構つくばキャンパスの電子・陽電子衝突型加速器 KEKB と素粒子検出器 Belle は、B 中間子の崩壊現象から粒子・反粒子の対称性の破れを探究し宇宙から反物質が消えた謎を解明する為に建設された^{1,2)}。KEKB と Belle は、1999 年 10 月から物理実験の為に運転を開始し 2010 年 6 月のビーム衝突実験の終了までの 12 年間、年間 2 回の夏季・冬季のメンテナンスシャットダウンがあるものの、その他の期間は連続運転を行ってきた。この間、小林・益川理論が正しいことを示す実験データの収集・解析に大いに貢献した。KEKB の電子・陽電子ビームが衝突実験を行う筑波実験室には、ビームを最終収束する超伝導電磁石 (QCS) とビーム衝突により発生した粒子解析用の超伝導ソレノイドが設置された。QCS は、2 台の超伝導 4 極電磁石、2 台の超伝導ソレノイド、6 台の超伝導

補正磁石から構成され³⁾、Belle 超伝導ソレノイドはコイル内径が 1.8 m、長さ 3.91 m の巨大な超伝導電磁石で⁴⁾、冷却負荷として全く異なる為、個別の冷凍システムにより冷却された。QCS と Belle の冷凍システムに使用されている冷凍機は、前加速器「TRISTAN」の QCS 磁石の冷却用に 1989 年に 4 台製作されたもので⁵⁾、その内の 2 台を再利用した。KEKB では、負荷は異なるが、ヘリウム冷凍機は同じ性能のものをを用いてシステムを構成し運転を行った。本論文では、第 2 章で設備の説明を行い、第 3 章で QCS と Belle ソレノイド冷却システムの 12 年間の運転に於いて経験した運転実績、故障履歴、メンテナンスを纏め、第 4 章で現在建設中の SuperKEKB で使用されるこれらの冷却システムの進展について説明を行う。

2. 冷凍システムと冷却負荷

2.1 ヘリウム冷凍システム

Fig. 1 と Fig. 2 に QCS と Belle ソレノイドの冷却回路を Table 1 に冷却システムの仕様を示した。QCS と Belle ソレノイド冷却システムは、其々ヘリウム冷凍機、圧縮機、過冷却器、液体窒素貯槽 CE、計装空気圧縮機、低温配管、マグネットクライオスタットから構成されている。ヘリウム冷凍機は、2 台の膨張タービンを直列に接続した Claude Cycle 方式で、第 1 熱交換器冷却に液体窒素の寒冷を利用し、共に 250 W@4.4 K の冷凍能力を持つ。ヘリウムガスの圧縮・循環には、スクリー式圧縮機を用いている。圧

Received October 5, 2015

^{*1} 高エネルギー加速器研究機構
〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1
High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho,
Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

^{*2} (株)日立プラントメカニクス
〒744-0002 山口県下松市大字東豊井 794
Hitachi Plant Mechanics Co., Ltd., 794 Higashitoyoi, Kudamatsu,
Yamaguchi 744-0002, Japan
E-mail: masanori.kawai@kek.jp
DOI: 10.2221/jcsj.50.599

Table 1 Main specifications of the He refrigeration systems for QCS and Belle

	QCS System	Belle Solenoid System
Cold box: Type	Claude cycle	Claude cycle
Cooling power @ 4.4 K	250 W (using LN ₂)	250 W (using LN ₂)
Compressor: Type	Screw compressor	Screw compressor
Flow rate	1,250 Nm ³ /h	1,250 Nm ³ /h
Oil and impurity separators	#1, #2, #3 and #3b, #4	#1, #2, #3, #4, #5 and #6
Sub-cooler: Heat exchanger	Cu tube with fin, L=32 m ID/OD=18 mm/20.9 mm	Cu tube with fin, L=32m ID/OD=18mm/20.9mm
LHe vessel volume	100 L	160 L
He gas tank:	2.06 MPa, V=20 m ³ × 1 unit (400 Nm ³)	2.06 MPa, V=20 m ³ × 2 units (800 Nm ³)
Additional component:	Recovery GHe tank at quench (0.395 MPa, V=5 m ³)	LHe vessel for cooling current leads at quench (200L)
LN ₂ storage tank:	9800 L	10000L
Magnet: Type	2 quadrupoles, 2 solenoids, 6 correctors	Solenoid
Cold mass of magnets	400 kg (QCSL) + 440 kg (QCSR)	8000 kg
Cooling method	Subcooled LHe forced flow cooling	Conduction cooling with forced flow subcooled LHe
Heat load at 4.5 K	75 W + 29 L/h (current lead)	84 W + 26 L/h (current lead)
Stored energy	0.52 MJ in total	34 MJ
Cool down time (RT→4K)	35 hrs	150 ~ 160 hrs

Fig. 1 Flow diagram of the QCS cryogenic system.

Fig. 2 Flow diagram of the Belle solenoid cryogenic system.

Table 2 Separator configuration in the He compressors

	#1	#2	#3	#3b	#4	#5	#6
QCS	D	GF	GF	GF	AC + MS	—	—
Belle	D	GF	GF	—	AC	MS + CB	GF

D: Demister, GF: Glass fiber filter, AC: Activated charcoal (QCS=150 kg, Belle=202 kg), MS: Molecular sieve (QCS=40 kg, Belle=272 kg), CB: Ceramic ball (Belle=70 kg)

縮機吐出部のヘリウムガス圧力は 1.67 MPa で、吐出ガス量は 1250 Nm³/h である。冷凍機への設計循環ガス量は 970 Nm³/h である。ヘリウム冷凍機と圧縮機は、TRISTAN 加速器で使用され、既に 28,000 時間の運転を経たものを再利用した⁶⁾。TRISTAN 加速器運転時、粒子検出器用超伝導ソレノイドのヘリウム冷凍機に於いてヘリウムガス中の水によるトラブルが発生したことから⁷⁾、KEKB へ移行時にヘリウムガス中の不純物除去強化の為に QCS システムでは建設当初の#1～#4 の不純物セパレータに対して#3を増強し#3bを追加し、Belle システムでは#5 セパレータを追加し#4の機能を#4と#5に分離した上で、#4及び#5セパレータ内の粉末等の微粒子を捕捉する#6セパレータ（最終段セパレータ）を追加した。セパレータの構成を Table 2 に示した。QCS システムでは、#4 セパレータ出口での油分を赤外吸光法により測定し 50 wt. ppb 以下に除去されていることを確認した。

2.2 冷却負荷

Table 1 に冷却対象となる超伝導電磁石の冷却重量と定常運転時の冷却負荷を纏めた。Belle ソレノイドは、QCS 用電磁石に対して約 10 倍の冷却重量を持っている。この為、両者では室温から 4 K までの冷却、また 4 K から室温までの加温に要する時間は大きく異なる。Fig. 3 と Fig. 4 に各々の電磁石の冷却・加温曲線を示した。室温からの冷却には QCS システムでは 1.5 日、Belle システムでは 6～7 日を要した。加温では QCS は 2 日、Belle は 4 日を要している。Belle の加温時間が QCS と比べて比較的短いのは、ソレノイドコイルに最大 49 A の通電を行い、コイル本体をジュール熱により加温したからである。

定常運転での冷凍負荷は、クライオスタットと低温配管での熱負荷と電流リード冷却用液体ヘリウム量（拔出量）で示され、QCS が 75 W + 29 L/h、Belle が 84 W + 26 L/h である。冷凍機・過冷却器での冷凍能力試験から、QCS システムは 156 W + 29 L/h、Belle システムでは 186 W + 26 L/h の冷却能力があり、定常運転時は QCS が 81 W、Belle が 102 W のマージンを持って運転を行った。このマージンは過冷却器内ヘリウム容器の液面制御（ヒータ加熱）に使用した。

両システムの液体ヘリウム過冷却器では、4.4 K、0.157 MPa の過冷却液体ヘリウムを生成し、超伝導マグネットの冷却を行った。QCS システムではビーム衝突点を挟んで

Fig. 3 Cool-down characteristics of the QCS magnets and Belle solenoid. **Fig. 4** Warm-up characteristics of the QCS magnets and Belle solenoid.

各々 1 台ずつクライオスタットを設置している。各クライオスタットへは 10 g/s の過冷却ヘリウムを並列回路で流し、超伝導電磁石は必ず単相の液体ヘリウムで冷却される熱設計となっている。QCS の 2 台のクライオスタットの設計熱負荷 14.2 W と 13.8 W に対し、過冷却単相液体ヘリウムのクライオスタット入口から出口までの温度上昇の測定から求めた熱負荷は其々 12.1 W と 10.2 W であった。又、クライオスタット出口でのヘリウム温度は圧力 0.157 MPa に於いて 4.65 K と 4.60 K であり、QCS 超伝導電磁石は単相液体ヘリウムで冷却されていることを確認した⁸⁾。Belle システムでは、ソレノイドコイルに熱接触させた冷却配管に 10 g/s の過冷却液体ヘリウムを流し、伝導により冷却した。冷却配管内では 2 相流になっていると考えられる。ソレノイドの冷却配管内でボイド率が 1 となるヘリウム流量は 1.7 g/s と測定され、この測定結果より、マグネットクライオスタットの侵入熱は 31.8 W と計算されている。また、Belle システムでは、冷凍機故障時にソレノイドの貯蔵エネルギーを電源へ回生する。エネルギー回収には 40 分が必要で、電流リードの冷却を確実にする為にクライオスタット上部に 200 リットルの液体ヘリウム貯槽を持っている。

2.3 制御・監視システム

QCS と Belle ソレノイド冷却システムは、プロセス制御計算機 EX⁹⁾ により冷却制御及び監視を行った。Table 3 に

Fig. 5 Control system for the QCS and Belle cryogenic systems.

Table 3 Input/Output signals of QCS and Belle systems

	QCS	Belle
AI	209 (T=92, P=30, F=9, O=78)	95 (T=40, P=31, F=4, O=20)
AO	38 (V=37, H=1)	33 (V=31, H=2)
DI	56 (CS=21, QS=13, O=22)	37 (CS=29, QS=1, O=7)
DO	48	42

T: Temperature, P: Pressure, F: Mass flow, V: Control valve, H: Heater, CS: Cryogenic system status, QS: Quench status, O: Others

制御機器、観測対象及び点数を示した。総制御点数は、QCS システムが 351、Belle システムでは 207 である。制御システムの構成を Fig. 5 に示した。各冷却システムを制御する CPU を持つ MLC (Multi-Loop-Controller) は、QCS 用は筑波実験室地下 4 階に、Belle ソレノイド用は地下 1 階に設置されている。これら MLC は光ファイバーにより繋がれ、共通のモニターシステムにより冷却システムを監視した。モニターシステムは、両冷却システムのある筑波実験棟の地下 1 階のローカル制御室に設置されている他、約 1 km 離れた日光実験室の冷凍機中央制御室にも設置されている。日光実験室では、超伝導空洞冷却用の 6.5 kW 冷凍機及び制御システムがあり¹⁰⁾、KEKB 運転時には 3 冷却システムの運転制御を一か所で行った。

3. 運転実績

3.1 運転時間と故障履歴

QCS 及び Belle ソレノイド冷却システムは 1997 年から稼働し、2010 年 7 月に運転を終了した。累積の運転時間は、QCS が 74,123 時間、Belle ソレノイドが 75,985 時間である。各年毎の運転時間を Fig. 6 に示した。1997 年と 1998 年は、KEKB 加速器及び Belle 測定器の調整運転の為、運転時間は年間 3000 時間を越えていない。KEKB によるビーム運転が始まる 1999 年から 2008 年までは平均的な年

Fig. 6 Operating hours of the QCS and Belle cryogenic systems during the year.

間稼働時間は、QCS システムが 6473 時間 (269.7 日)、Belle ソレノイドシステムが 6657 時間 (277.4 日) である。2008 年は、KEKB・Belle グループが探究してきた「粒子・反粒子の対称性の破れ」が実験的に検証され、小林先生、益川先生がノーベル物理学賞を受賞された年である。2008 年以降も実験は続けられたが 2010 年 7 月 12 日に KEBK 全システムは運転を終了した。

Fig. 7 と Fig. 8 には QCS と Belle ソレノイドシステムの故障項目を示した。2+12 年間の運転期間の故障総数は、QCS が 175 件、Belle が 128 件である。この内わけを Table 4 に示した。最も多発したトラブルは、QCS システムではクエンチであり、Belle システムでは冷却水関連であった。Belle ソレノイドのクエンチは、全て電源の動作不良による電流遮断が原因している。QCS システムでは、KEKB ビーム運転初期の 1999 年～2000 年に於いてトラブルが最も多く、特に KEBK 加速器の他の機器からのノイズ、ビーム調整時にビームが超伝導電磁石に当ることによるクエンチが多発した。クエンチ発生から超伝導電磁石の再励磁までに要する時間は初期の頃は 4 時間を要したが、運転制御ソフト

Table 4 Number of problems arising during 12-year-operation

	QCS	Belle
Cold box	46	22
Compressor	16	23
Computer controller	8	27
Air compressor	10	4
Vacuum pump	7	6
Cooling water	22	29
Voltage drop or power failure due to lightning	10	7
Quench	58	10

トの改善により 2 時間まで短縮することが出来た。また、この 2 年間は加速器を 7 月中旬まで運転したが、7 月は落雷による瞬時電圧低下による電源遮断が 5 回発生し、他の加速器機器への影響も大きく 2001 年以降は 6 月末で加速器の運転を終了することになった。落雷による瞬時電圧低下では圧縮機が停止することはないが、停電になると圧縮機が停止し、循環ガスが停止するため冷凍機膨張タービンの温度は上昇する。その結果、定常運転への復帰には QCS システムでは 12.4 時間、Belle システムでは 16.1 時間を要している。加速器の運転再開は 9 月中旬であるが、この約 2 か月の休止期間に機器メンテナンスを行った。**Fig. 9** と **Fig 10** には、Table 4 に示した故障により KEKB 加速器及び

Fig. 9 KEKB operation downtime caused by the QCS system in a year.

Fig. 10 Belle operation downtime caused by the Belle solenoid system.

Fig. 7 Number of problems with the QCS system.

Fig. 8 Number of problems with the Belle system.

Belle 測定器の運転に影響を与えた時間を示した。総時間は、QCS システムが 253.4 時間、Belle システムが 294.2 時間で 1999 年から 2010 年までの各々の総運転時間の 0.36%、0.40%に相当する。外的要因で最も影響が大きいものが雷による停電であるが、物理実験の効率を向上するには、圧縮機停止からの復帰時間を短縮する必要がある。

3.2 故障事例

本節では、QCS システムと Belle ソレノイドシステムの物理実験に影響を与えた故障事例 2 件を紹介する。

3.2.1 QCS 圧縮機冷却水用配管の腐食

2004 年 1 月に発生したトラブルとして、QCS 圧縮機冷却水鉄配管内部の腐食による錆がストレーナーにつまり、冷却水量の低下とそれに伴うヘリウムガス温度の上昇により圧縮機緊急停止を 2 回行っている。QCS 及び Belle ソレノイド冷却システムには、共に 1989 年に製作された圧縮機を使用し、ヘリウムガス圧縮に伴う熱の冷却には筑波実験室に供給されている水を使用していたが、QCS システムだけにこのトラブルが発生した。**Fig. 11** と **Fig. 12** に QCS システム圧縮機と冷却水系内にある 2 か所のストレーナーにつまった錆を示した。錆が汚泥状態となりメッシュに堆積した結果、冷却水量の低下によりヘリウムガス温度が上昇し、圧縮機のインターロックにより停止した。ストレーナーの清掃後、配管内部の水の入替えを行ってもこの状

Fig. 11 He compressor for the QCS cryogenic system.

Fig. 12 Rust bank at the strainer due to corrosion on the inner surface of the cooling pipe.

態を改善することが出来ず、夏季メンテナンスまで一部冷却水をシステム外に放出し錆が蓄積することが無いように運転を行った。夏季メンテナンス時には全ての水配管を内面にプラスチックコーティングしたライニング鋼管に取替えた。配管交換後は、錆による冷却水のトラブルは発生していないが、水の汚れの確認を日常点検項目に入れ監視を行った。

3.2.2 Belle 冷凍機タービン熱交換器漏水事故

2005 年の運転中に、Belle 冷凍機第 2 タービンの断熱膨張仕事を熱として奪い去る冷却水熱交換器からタービン側への水の漏水事故が発生し、タービンが緊急停止をして、タービンの一部が破損する事故が発生した。タービン及び熱交換器は予備品と交換したが、KEKB の運転に 96.3 時間のダウンタイムを生じた。事故を起こした熱交換器については分解して調査を行った。**Fig. 13** に事故が発生したタービン熱交換器の写真を示した。

熱交換器はチューブ巻きされた銅配管で構成され、ケーシングの中に組み込まれている。銅配管の中を流れるヘリウムガスと、ケーシング内の冷却水が熱交換を行う。解体調査により漏洩箇所を特定し、その周辺の銅配管を切り取り観察を行った。また、銅配管表面に付着していた付着物及び使用していた冷却水も分析を行った。調査結果から、漏水は銅配管の表面から進行した腐食（孔食）が原因と判断

Fig. 13 Two turbines of the Belle solenoid cryogenic system (upper), heat exchanger for the #2 turbine (middle) and water leak point (shown by the red arrow) for the #1 turbine (lower).

された。孔食発生要因として、冷却水の水質に問題があると推定されたが、冷却水は純水を使用しており PH が 9.6 と高い事を除き、日本冷凍空調工業会基準規格（JAR-GL）の水質基準値に適合しているものであった。又、その後の調査で第 1 タービンも漏洩していることが判明した。

タービン熱交換器冷却用チラーは QCS と Belle では別々の機種を使用していたが、冷却水は同一系統の純水を補給して使用していた。QCS タービン熱交換器も内視鏡を使用してケーシング内の観察を行ったが、銅配管には腐食や付着物の発生はほとんど見られなかった。この調査結果より、冷却水の水質が原因で腐食が発生したと結論付ける事は出来なかった。

タービン熱交換器の漏水対策として、定期的に内視鏡を用いたタービン熱交換器ケーシング内の観察と漏洩確認

(He リーク試験)を実施している。また、長期停止時は水抜きを行い、内部を乾燥させ、窒素ガス封入して保管している。

3.3 冷却システムのメンテナンス

QCS 及び Belle 冷却システムは、前期は 1 月から 7 月初旬まで、後期は 9 月から 12 月にかけて運転が行われた。冷却システムのメンテナンスは夏季運転停止時に行われ、以下の項目が通常ルーチン作業として行われた。

- 1) 冷却システム：冷凍保安規則定期自主検査
- 2) 液体窒素貯槽：一般高圧ガス保安規則定期自主検査
- 3) 制御計算機：運転ソフト保存、制御ループ計器入出力値確認及び調整、計算機内電池等の交換
- 4) ヘリウム圧縮機：冷凍保安規則定期自主検査及び運転時間で決められている各部品の交換、回転部軸心調整、セパレータ保守、潤滑油成分検査と補給
- 5) 自動制御弁：作動量及び作動速度の測定、動作に異常が確認された場合は修理
- 6) 圧力伝送器：標準高精度圧力計による校正、誤差が大きい場合は出力調整
- 7) 低温配管：真空排気
- 8) 運転前作業：ヘリウムガス外部リーク検査、制御ソフトパラメータ確認、自動制御弁動作確認、温度・圧力確認
- 9) ヘリウムガス精製運転：超伝導電磁石冷却の最後の準備として、冷却システム系内の水分除去運転

上記 9) ヘリウムガス精製運転は、冷却運転直前に行うもので長期連続運転時に冷凍機内熱交換器表面に氷が付着し熱交換性能を劣化させることを防ぐための非常に重要な操作である。この運転には、非常設型の精製器が使用されている。精製器へのヘリウムガス量は $120 \text{ Nm}^3/\text{h}$ で、ガスは液体窒素で冷却され 1.57 MPa の圧力で精製される。冷却システムヘリウムガス精製時の水分露点の変化を Fig. 14 に示した。水分露点が -90°C 以下に到達後、精製器を切り離し超伝導電磁石の冷却を開始する。TRISTAN 加速器 QCS 冷却システムの運転経験から、空気、メタン等の不純ガスは精製運転開始後数時間で 1 ppm 以下となるが水分除去には数日を要したことから、KEKB の運転ではヘリウムガスの純化の度合いをヘリウムガス中の水分露点で管理を行った。QCS 冷却システムでは、水分露点 -90°C (0.1 ppm) 以下となるのに 10 時間を要し 60 時間後に於いても -96°C (0.03 ppm) である。これに対し、Belle 冷却システムでは 10 時間後には -96°C (0.03 ppm) となり 40 時間後には -108°C (計器表示値) まで下がっている。Belle システムは、QCS に比べ約 2 倍のヘリウムガスを保有しているにもかかわらず水分除去が非常に促進されているのは圧縮機 #5 セパレータに組込まれているモレキュラーシーブの効果が大きいと考えられる。水分露点は長時間運転には重要なパラ

Fig. 14 Change in the helium gas dew point during purification.

メータであることから、露点計は毎年夏季運転停止時に製作会社で校正されている。

また、特別な作業として、5 年毎に #4 と #5 セパレータ内の活性炭とモレキュラーシーブの交換を行った。この交換作業時、吸着剤が大気にさらされるため、出来るだけ湿度の低い天候を選んだ。詰め替え後、交換した吸着剤の水分及び不純物の除去の為、液体窒素貯槽から取り出した窒素ガスを加温し水分露点が -70°C 以下 (2.6 ppm 以下) になるまで吸着剤の活性化を行った。この時の窒素ガスは、#4 セパレータへは 120°C 、Belle の #5 セパレータへは 150°C まで加温した窒素ガスを流し活性化を行った。#4 セパレータでは容器にゴムの O リングを用いている為、温度を 120°C に制限している。

4. 次期加速器 SuperKEKB へ向けて

KEKB は 2010 年に運転終了後、現在は SuperKEKB へ性能向上の為の改造を行っている。ビーム衝突用超伝導 4 極電磁石は ¹¹⁾、KEKB の 2 台から 8 台に増え、超伝導補正磁石は 43 個、Belle ソレノイド磁場補正用の超伝導ソレノイドも 4 台組込まれる。総数 55 台の超伝導電磁石は、2 台のクライオスタットに組込まれる。Fig. 15 に建設中の QCS 冷却システムの概念図を示した。クライオスタット 1 台の設計熱負荷は $76.4 \text{ W} + 28.4 \text{ L/h}$ となり、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出来ない。この為、TRISTAN 加速器 QCS 用に製作した冷凍機システムを更に 1 台筑波実験室に移設し冷却システムの増強を行っている。この冷凍機システムは、KEKB 加速器運転中は保管されていたもので、20 年間のブランクの後、実動配備されることになる。ビーム衝突点の両側に設置されるクライオスタットは、各々 1 台の冷凍機で冷却するシステムとなる。冷凍機増設の為、冷却システム制御計算機の更新・増設も行われた。QCS 冷却システムの制御総点数は、KEKB の 351 から 765 に増加している。KEKB の QCS システムでは、マグネットクエンチが最も加速器の運転を中断させた要因となっている為、クエンチからの復帰時間を短縮する為に過冷却器内に保有している液体ヘリ

Fig. 15 QCS cryogenic system of SuperKEKB beam interaction region.

ウムの量を 100 リットルから 200 リットルに増加し、クエンチ後の再冷却時間を短縮出来るようにした。また、冷却システム全体で保有するガス量が増加することから、設計圧力 2.06 MPa、容量 20 m³ のタンクを各冷却システムに 1 台増設している。この 2 台のタンクも TRISTAN 加速器で使用したタンクの再利用である。

Belle ソレノイド冷却システムは、ソレノイド電源の更新を行った他、QCS 冷却システムとの運転の一体化を進める上で重要となる制御計算機 EX の更新を行った。

5. まとめ

KEKB 加速器ビーム衝突点に設置されたビーム最終収束用超伝導電磁石と粒子検出器超伝導ソレノイドの 2 基の冷却システムについて説明し、システム調整期間の 2 年を含めた 14 年間の運転で得られた故障歴、重大な事故、メンテナンスについて報告した。この長期運転実績では、冷凍機と圧縮機本体の機器については、加速器と粒子検出器の運転に影響を与えるトラブルは発生しなかった。重大なトラブルに至ったのは、冷却水関連で QCS の場合、圧縮機の冷却水配管内部の腐食であり、Belle ではタービン熱交換器の腐食であった。これらについては SuperKEKB の運転が始まって監視されることになる。QCS では、ビームによるクエンチが KEBK よりも多発すると考えられ、クエンチからの復帰時間の短縮が重要な課題となる。

SuperKEKB は、2017 年から物理実験の開始を計画しており、KEKB での経験を最大限活用したいと考えている。

本論文を纏めるにあたり、Belle 冷却システムの建設・運転に多大なるご尽力を頂いた春山富義氏、故土井義城氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) KEBK B-Factory Design Report, KEK Report 95-7, August 1995.
- 2) Belle Technical Design Report, KEK Report 95-1, April 1995.
- 3) K. Kanazawa, H. Nakayama, T. Ogitsu, N. Ohuchi, T. Ozaki, K. Satoh, R. Sugahara, M. Tawada, N. Toge, K. Tsuchiya, Y. Yamada, M. Yoshida and M. Yoshioka: "The interaction region of KEBK," Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A **499** (2003) 75-99
- 4) Y. Makida, H. Yamaoka, Y. Doi, J. Haba, F. Takasaki and A. Yamamoto: "Development of a superconducting solenoid magnet system for the B-Factory detector (BELLE)," Adv. Cryo. Eng. **43A** (1998) 221-228
- 5) K. Tsuchiya, N. Ohuchi, Y. Morita, R. Sugahara, A. Kabe, K. Endo, S. Kawamura and K. Matsumoto: "Helium cryogenic systems for the superconducting insertion quadrupole magnets of the TRISTAN storage ring," Adv. Cryo. Eng. **37A** (1992) 667-674
- 6) K. Tsuchiya, N. Ohuchi, Y. Morita, A. Kabe, R. Sugahara and T. Ogitsu: "Operational experience and reliability of the cryogenic systems for the TRISTAN insertion quadrupole magnets," Adv. Cryo. Eng. **41A** (1996) 719-726
- 7) 土井義城:「超伝導マグネット冷凍システムの長時間運転における不純物の問題 (高エネルギー物理学研究所での経験を中心として)」, 平成 4 年冷凍部会年間講演集、低温工学協会冷凍部会, pp4-7
- 8) N. Ohuchi, T. Ogitsu, K. Tsuchiya and S. Nakamura: "Cryostat for the KEBK IR superconducting magnets," Adv. Cryo. Eng. **45A** (2000) 787-794
- 9) EX is the process control computer by Hitachi High-Tech Solutions Corporation

- 10) H. Nakai, Y. Kojima, K. Nakanishi, K. Hara, K. Hosoyama, T. Honma, Y. Morita and T. Kanekiyo: "Large-scale helium refrigeration system for KEKB/TRISTAN superconducting cavities – operation experience for 27 years and next operation –,” TEION KOGAKU **50** (2015) 549-556 (in Japanese)

仲井浩孝, 小島裕二, 中西功太, 原 和文, 細山謙二, 本間輝也, 森田欣之, 兼清貴之: 「KEKB/TRISTAN 超伝導空洞用大型ヘリウム冷却システム-27 年間の運転実績と今後の運転」, 低温工学 **50** (2015) 549-556

- 11) N. Ohuchi, Y. Arimoto, N. Higashi, H. Koiso, A. Morita, Y. Ohnishi, K. Oide, H. Sugimoto, M. Tawada, K. Tsuchiya, H. Yamaoka, Z. Zong, M. Anerella, J. Escallier, A. Jain, A. Marone, B. Parker and P. Wanderer: "Design of the superconducting magnet system for the SuperKEKB interaction region,” Proceedings of NA-PAC (2013) 759-761

川 井 正 徳

1966 年 7 月 25 日生。1985 年文部省高エネルギー物理学研究所（現高エネルギー加速器研究機構）に入所。1993 年東京理科大学工学部第二部電気工学科卒業。トリスタン実験粒子検出器、Belle 粒子検出器、CERN ATLAS 粒子検出器等の超伝導電磁石と冷却設備の開発・運転に従事。

大 内 徳 人

1958 年 6 月 19 日生。1982 年大阪大学工学部電気工学科卒業、1987 年同大学院工学研究科電気工学専攻博士課程単位取得の上、退学。同年文部省高エネルギー物理学研究所（現「高エネルギー加速器研究機構」）勤務。現在、同機構加速器研究施設教授。国立大学法人総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科教授。主に、加速器用超伝導電磁石とその冷却システムの開発に従事。低温工学・超電導学会、日本加速器学会会員。工学博士。

槇 田 康 博

1962 年 8 月 2 日生。1985 年大阪大学工学部電気工学科卒業、1987 年同大学院工学研究科修士課程（電気工学専攻）修了。1987 年高エネルギー物理学研究所（現「高エネルギー加速器研究機構」）勤務。主に粒子検出器用超伝導電磁石開発に従事。2007 年より同機構 J-PARC センター勤務。主に超伝導磁石及び冷却装置開発に従事。低温工学・超電導学会会員。工学博士。

近 藤 良 也

1961 年 7 月 23 日生。1983 年茨城大学工業短期大学部電子工学科卒業。同年 4 月高エネルギー物理学研究所物理研究系低温グループに配属、以来ヘリウム冷凍機の運転に従事。冷凍システムの制御を担当。現在、高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所クライオジェニックスグループ。

土 屋 清 澄

1947 年 11 月 23 日生。1972 年名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了。1974 年同大学院工学研究科博士課程中退。1974 年高エネルギー物理学研究所（現高エネルギー加速器研究機構）物理研究系助手。1987 年同研究所加速器研究系助教授。1996 年同研究所共通研究系低温センター教授。2011 年同機構定年退職。2011 年同シニアフェロー。2012~2014 年同研究員。高エネルギー加速器研究機構、総合研究大学院大学名誉教授。主として超伝導電磁石、線材、冷却技術の開発に従事。低温工学・超電導学会、日本加速器学会会員。工学博士。

遠 藤 友 成

1973 年 4 月 27 日生。1992 年群馬県立前橋工業高等学校電子科卒業。1995 年日本工業大学システム工学科卒業。1995 年現在の(株)日立テクノロジーアンドサービス入社。高エネルギー加速器研究機構大型ヘリウム冷凍システムの運転維持管理業務に従事。2011 年(株)日立プラントメカニクスに出向、現在に至る。産業システムサービスグループ技師。

兼 清 貴 之

1962 年 7 月 21 日生。1981 年山口県立下松工業高等学校機械科卒業。1981 年現在の(株)日立プラントメカニクス入社。1984 年から京都大学ヘリオトロン核融合センター、日本原子力研究開発機構、JT-60 等のヘリウム冷凍システム据付検査、試運転に従事。1988 年から高エネルギー加速器研究機構大型ヘリウム冷凍システムの運転維持管理業務に従事。現在に至る。産業システムサービスグループ主任技師。