

SuperKEKB ビーム最終集束用超伝導電磁石(QCS) 及び Belle II 超伝導ソレノイド(Belle)冷却システム ヘリウム圧縮機の整備と管理計画

○青木和之^{A)}、近藤良也^{B)}

A)高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

B)高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

概要

SuperKEKB 加速器ビーム最終集束用超伝導電磁石システム(QCS)及び Belle-II検出器超伝導ソレノイド用(Belle)の2系統3基のヘリウム冷却システムは、前々期の TRISTAN 加速器ビーム衝突実験超伝導4極電磁石冷却用に1990年に建設された機器を改造し使用している。ヘリウム冷凍システムの運転時間は13万時間を超えている。特に機械的な回転部を有するヘリウム圧縮機システムは全体的なオーバーホールを計画しており、その一環として2023年にヘリウム圧縮機の動力源である電動機の整備を行った。今回は電動機整備を中心に報告をする。

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)つくばキャンパスでは SuperKEKB 加速器を用いた Belle-II実験が行われている。Belle-II実験は電子と陽電子を衝突させて生成される B 中間子反 B 中間子の崩壊現象から粒子、反粒子の対称性の破れや新物理現象を発見することを目的としている。SuperKEKB 加速器は周長3kmからなる電子用と陽電子用の2つのビームラインが並んで置かれ1点で衝突させて素粒子反応をみる衝突型加速器である。この衝突点である筑波実験棟には検出器用の超伝導ソレノイド電磁石を組込んだ Belle-II検出器と、ビーム最終収束用超伝導電磁石を組込んだ2台の QCS クライオスタット(QCSL、QCSR)が設置されている。図1に SuperKEKB 施設写真と概略図を示す。

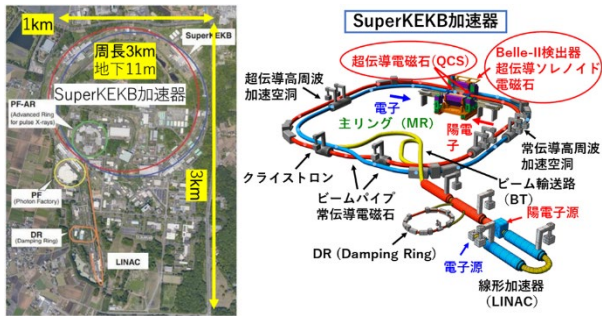


図1. KEK つくばキャンパス・SuperKEKB 概略図

Belle-II検出器と2台の QCS クライオスタットには超伝導電磁石が組み込まれており、超伝導状態を維持するために液体ヘリウムを供給するヘリウム冷凍機システムが計3基稼働している。

今回このヘリウム冷凍機システムの基幹であるヘリウム圧縮機に動力を供給する電動機の整備につい

a-aoki@post.kek.jp

て巻線交換の状況を中心に、併せて今後の管理計画を紹介する。

2. ヘリウム圧縮機電動機の整備

2.1 ヘリウム冷凍システム

SuperKEKB 加速器において筑波実験棟 Belle 及び QCS で運用しているヘリウム冷凍システムについて説明する。

冷凍システムは主としてヘリウム冷凍機、圧縮機、過冷却器、液体窒素貯槽、中圧タンク、計装空気設備、冷却水設備、低温配管等から構成されている。QCS 及び Belle の冷凍システムに使用されているヘリウム冷凍システムは前々加速器「TRISTAN」の1990年に4基建設されたもので、同じヘリウム冷凍機を流用し、改造、充当して現在まで運転を行っている。

ヘリウム冷凍システムはクロードサイクル方式で250W@4.4K(冷凍液化能力160W@4K+28.4L/h)の冷凍能力を持っており、20g/sの過冷却液体ヘリウムを作ることが出来る。冷凍システムは衝突点である筑波実験棟内に各1基の計3基が設置されており地上部には各々の圧縮機棟にヘリウム圧縮機が1基ずつ3棟に設置されている。図2参照。

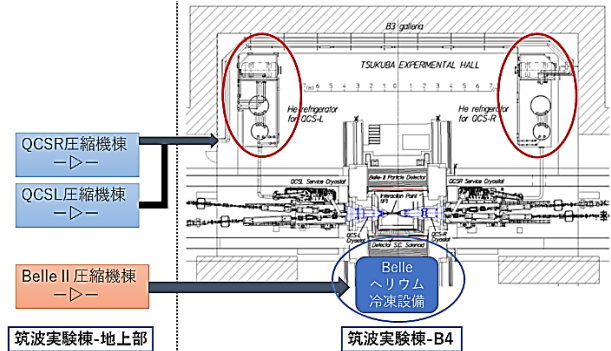


図2. 筑波実験棟概略図(上面より見た図)

ヘリウム圧縮機棟内にはヘリウム圧縮機を中心に冷却水設備、計装空気設備等の付帯設備が設置され

ている。図3に圧縮機棟内写真を示す。

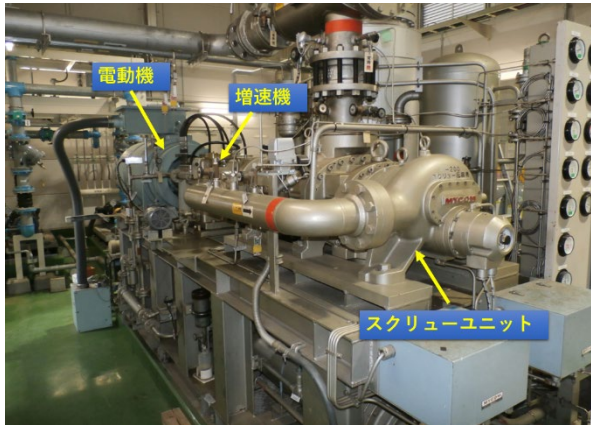


図3. ヘリウム圧縮機棟内

圧縮機は同一架台上にスクリーユニット、油分離器、水熱交換器等の機器が組み込まれており、スクリーユニットは増速機を介して動力源である電動機に接続されている。電動機の仕様について表1に示す。

表1. 電動機仕様

三相誘導電動機 規格・定格			
製造者	日立製作所	型式	EFOUN-KK
製造年	1990年	製造規格	JEC-37-1979
保護	JP22	冷却	JCO
出力	250kW・連続定格	電圧	6600V
電流	26.6A	周波数	50Hz
極数	2極	回転数	2955RPM
絶縁等級	F級	周囲温度	40℃(最大)
重量	1100kg		
製造番号：301904-1、301904-4			

2.2 電動機の運転状況と整備計画

本電動機整備状況として、Belleは2006年、2015年に、QCSLは2012年にオーバーホールをしているのみである。運転時間から考えると製造から現在までの累積稼働時間はBelle、QCSL共に13万時間を超えている。Belleは2006年8.3万時間、2015年10.4万時間経過時に、QCSLは2台2012年10.2万時間経過時にオーバーホールをしている。つまりBelleは9年おき3万時間前後でオーバーホールし、QCSLは12年3万時間の間オーバーホールを入れず稼働し続けた。圧縮機運転中は日常点検やメーカー指示に従い給脂を行い、運転停止時に圧縮機定期検査にて点検項目について諸数値の異常が無い事を確認している。

これまでの状況から圧縮機運転に関して大きな問題は発生していないが、高圧電動機の寿命は一般的に25~30年と想定されており、Belle・QCSLの両電動機ともに30年以上を経過しているため、電動機の交換を含めた整備を行うこととした。諸状況よりBelleが先行し、半年後QCSLの整備を行った。

当初は電動機を同規格新品と換装する事を計画したが、トップランナー制度のため、すでに同等規格品

は廃番、新品の購入は不可能となっていた。現状入手可能なトップランナー制度下の同等出力電動機は外寸がおよそ一回り大きくなっており、軸心位置が適合せず、整備に関しては現有電動機の巻線を交換する以外に方法が無い事が判明した。このためメーカーを始め、複数の電動機整備業者に整備の可否、納期、費用等について問合せを行い、入札仕様の策定を行った。

2.3 電動機分解・整備状況

電動機は特に固定子巻線の絶縁低下による不具合の発生が懸念されるため、今回の電動機整備は通常の分解点検と併せて、固定子巻線を新製・交換する重整備を行い、老朽化した部位を補修して新品同様の状態に修復することを計画した。また今後の整備計画に資するため巻線の詳細な絶縁診断を行うこととした。

整備の重要点として整備後の振動値が整備前の値を著しく超えない事を条件とした。本圧縮機は電動機の動力軸が増速比1.2倍の増速機を介し、その先のスクリーユニットに接続され、毎分3600回転で圧縮機構を駆動する高速回転機器であり、規定値を超える振動が発生した場合圧縮機運転に支障をきたすからである。

電動機の整備手順は大まかに以下の通りである。

- ① 入庫検査
- ② 電動機分解・細部確認、寸法取り
- ③ 固定子巻線取外し
- ④ 固定子・回転子清掃、補修
- ⑤ 固定子巻線組立
- ⑥ 巻線完成後、絶縁劣化試験
- ⑦ 消耗品等部品交換・組立
- ⑧ 外装品取付、再塗装
- ⑨ 試運転
- ⑩ 出庫

入庫検査にて各種整備データを取得後、電動機分解作業を行い、並行して巻線組立作業が行われた。

ここで入庫試験時の絶縁劣化試験について述べる。絶縁劣化試験には絶縁抵抗試験、直流吸収試験、交流電流試験、誘電正接試験、部分放電試験を行った。両電動機の入庫時の固定子巻線の診断結果を図4に示す。

試験項目	QCS			Belle		
	測定値	判定	判定基準	測定値	判定	判定基準
絶縁抵抗 (1000V・1分間)	2920	-	-	2600	-	-
成 果 指 数	D.C. - kV	-	2.0以上	-	-	1.0以上
	D.C. 6.0 kV	1.74	不良	2.87	良	2.0以上
成 果 指 数	D.C. - kV	-	10以上	-	-	30以下
	D.C. 6.0 kV	31.6	不良	6.9	良	30以下
絶 縁 抵 抗	D.C. - kV	-	-	-	-	-
	D.C. 6.0 kV	5940	-	36200	-	-
交 流 P I 1	(kV)	2.88	不良	3.89	良	F/F3以上
	(kV)	8.40以上	良	6.60	良	F以上
電 圧 Δ I 1 (E)	(%)	1.24	-	1.07	-	-
電 圧 Δ I 1 (E)	(%)	1.77	良	2.28	良	8%以下
空 荷 電 流	(mA)	118.0	-	128.0	-	-
誘 電 正 接	(%)	17.88	不良	9.67	不良	0.3~5%
Δ I a n d I 吸 収	(%)	1.01	-	-	-	-
誘 電 正 接	(%)	2.78	-	-0.64	-	-
誘 電 正 接	(%)	2.18	良	-0.64	良	6.5%以下
部 分 放 電	1000PC	0.02	-	1.83	-	-
	1000PC	2.70	-	1.73	-	-
成 果 指 数	Qma x	2920	良	4500	良	良 ≤ 2000pC
	I 2 / I 3	2920	良	5500	良	< 数倍 ≤
	I 2 / I 3	3020	不良	7000	-	4000pC < 不良
R C 値	(μF)	284	-	1810	-	-
静電容量(Ce)	(μF)	0.0155・0.0481	-	0.0501・0.0513	-	-
規定破壊電圧値	(kV)	14.0~24.0	-	14.6~24.3	-	-
(50%の95%信頼性)		18.5	-	19.5	-	-
実効電圧値	(kV)	29.0	-	29.0	-	-
設置場所	絶縁コイルエンドからコアヘフラッシュオーバー					

図4. QCS 絶縁診断結果/Belle 絶縁診断結果

・Belleについては固定子巻き線絶縁診断結果から誘

電正接 $\tan\delta$ が不良で絶縁層の吸湿や汚損が原因と推察される。

・QCSL 用として整備に出した電動機は 1990 年～1995 年まで稼働し 2.8 万時間経過した後、28 年間保管されていたものである。固定子巻き線絶縁診断結果から直流吸収試験、交流電流試験、誘電正接試験が不良であった。Belle と比較し $\tan\delta$ の値が倍高いこと、直流吸収試験結果の Pi 値から絶縁層は吸湿しているものと推察される。また 2012 年オーバーホール時の結果と比較しても、大地間絶縁の数値が悪い。吸湿と塵埃等の環境要因で絶縁劣化を来たしたものと考えられる。

巻線において余寿命を推定する残存破壊電圧曲線がある。これは入庫検査の最終段階で、固定子巻線の絶縁が破れるまで電圧を印加する破壊試験を行い、破壊へ至るまでの挙動と入庫試験時の諸データを解析し巻線の残存寿命の推定を行うものである。この試験方法・判定は工業規格等で制定されたものではなく、電動機整備会社の社内基準により大まかな寿命を推定するものである。その結果を下記に示す。

・Belle 電動機

試験の結果、現状における破壊電圧の推定値は、14.6-24.3 kV 間にあるとされ、実際の破壊電圧 29 kV であった。これから残存寿命の最低値は≒1-2 年間と判定された。

・QCSL 電動機 (日光 QCS 電動機)

試験の結果、現状における破壊電圧の推定値は、14.0-23.0 kV 間にあるとされ、実際の破壊電圧 29 kV であった。これから残存寿命の最低値は≒1 年間と判定された。

両電動機とも巻線の寿命はほぼ限界にあったものと判断され、交換時期としては適切なタイミングであったと思われる。

破壊試験後の巻線の様子を図 5 に示す。



図 5. 破壊試験後の放電の様子

図 5 は固定子コイルに絶縁破壊電圧まで印加したときの巻き線絶縁部の写真である。絶縁部内側が放電で破壊され外層絶縁が焼損しているのがわかる。

絶縁の劣化の要因には熱的、電気的、機械的な要因と使用する環境が大きく関わってくる。これらの要因からコイルの絶縁層内にボイドやクラックが生じ、そこを起点とし部分放電がおり、絶縁層を侵食しながらやがては絶縁破壊に至る。

この他 Belle と QCS に共通した不具合の整備部位としては、ファンカバーの破損や風仕切り板内部吸音材の劣化が見つかり、新品へ交換した。ファンカバーには清掃・洗浄処理、再塗装を施した。また軸心と

カップリングフランジとの嵌合が甘くなっていた。これは長期間の使用による発停の繰り返しで嵌合部が変形したものと推察される。対処としてはボス内部に肉盛りし機械加工を施し締り代 $20\mu\text{m}\sim 25\mu\text{m}$ を確保した。軽微な修正で済み機械的に大きな問題は無かった。加えて通常の定期点検時における軸受け等の消耗品も併せて交換した。

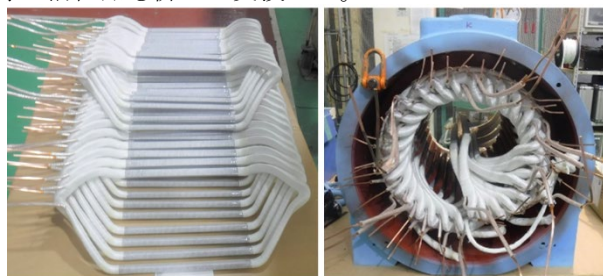


図 6. 形成した白コイル/固定子巻線組立工程の様子

図 6 左は形成された状態の巻線 (白コイルと呼ばれる) である。右はその巻線を固定子に組込んだ様子で、巻線がスロットに配列され、周囲に広がっている導線を接続して固定子巻線が構成される。この後ワニス含浸、真空加熱、絶縁処理を行い固定子巻線の完成となる。

巻線は組立後に十分な絶縁耐力を有している事を確認するため、絶縁耐圧試験を行う。規格上必要な試験電圧は $2E+1\text{ kV}$ (E :定格電圧)と規定されているため、交流電圧を 14200 V まで段階的に印加し、これを 1 分以上保持し異常がないかを確認した。他の試験項目と絶縁診断試験の結果、良好と判定された。

この後、軸の組付けや外装品の装着等、組立の最終工程を経て、整備工場のテストベンチにて試運転が行われ、Belle・QCS 共に合格、納品となった。

電動機の性能中、今回最重要視した振動について特に問題はなく仕様をクリア出来た。

測定箇所	実効(EQ-p-p)		速度(RMS)		管理基準値	判定
	VA-10	10Hz-10kHz	10Hz	10kHz		
電動機	AM1	4.3	0.6	mm/s	速度(RMS) 4.5 mm/s以下	良好
	HM1	6.7	0.7	mm/s		
	VM1	3.3	0.7	mm/s		
	AM2	4.2	0.7	mm/s		
	HM2	6.0	0.7	mm/s		
	VM2	5.4	0.7	mm/s		

圧縮機成容量 100 %
圧縮機最高容量 100 %
主電動機出力 250 kW

最終に使用した計測器
SD-C2020(マイクレンジ/フラット)

図 7. 実負荷運転時の振動値結果 (Belle)

整備後の電動機試運転結果について、両電動機とも整備完了・納品後、再び圧縮機架台上に据付け、試運転を実施した。図 7 は Belle の実負荷運転(試運転)時の振動値の結果である (QCS もほぼ同値につき省略)。両電動機共に整備前の測定値よりも良好な値となっている。

2.4 電動機の今後

Belle と QCSL についての整備は完了した。今後これらの電動機は10数年以上にわたり稼働する予定であるが、長期間の連続運転を安定的に継続するためには、メンテナンスが欠かせない。

ここで重要かつ長期的に問題となるのが巻線の絶縁劣化であるが、これまでの状況から電動機の設置環境は巻線寿命の重要なファクターであり、圧縮機棟内の温・湿度を適正に管理し、同時に塵埃を防ぐ措置を講じる事が必要である。特に QCSL 圧縮機棟は、圧縮機排出熱量に対して建屋容積が小さいため高温・多湿環境下にあり、特に夏季になると周囲温度が電動機の運転上限温度である 40℃ を超えてしまう。これを改善するため本年は棟内の換気扇を 4800 m³/h から 6060 m³/h と 1.25 倍へ増力した。これにより少なくとも環境改善が見込まれるのではないかと考えているが、将来的には空調の導入も検討している。また QCS では電動機への 6.6 kV の給電ケーブルが地中埋設であるため、埋設管内に滞留する水分によるケーブルの劣化を懸念している。Belle の給電ケーブルは上記の理由から地中埋設であったものを地上の屋内配線へ変更している。今回 QCS の電動機の脱着時にケーブルの絶縁抵抗値を計測したところ 1000 MΩ 以上あり、絶縁抵抗としては問題ないが、今後を考え地中埋設を廃しケーブルの配線経路を地上へ変更する事を検討している。

設備を安定的に稼働させるためには適切な間隔で検査・整備を行う事が欠かせない。ユーザー側における一般的な日常点検、振動・騒音等の測定は重要であるが、この他にも内部の精密な診断を定期的に行う必要がある。従前はこれらの検査を定期点検に併せて工場で行っていたが、現在は計測器システムを載せた診断車があり、現場で各種の診断を行える様になっている。工場持ち込みの様な大掛かりな作業を要せず適切な間隔で検査を行うことが容易で、検査費用を抑えられるメリットがあり、この様なサービスの利用はシステムの安定稼働の為には有用であると考えられる。

3. 今後の管理計画

本機構の前々加速器「TRISTAN」では主リング上に4つの実験棟があり、それぞれに検出器等を冷却・維持する冷凍機システムが設置されていた。

QCS の能力増強に伴い従前より大きな冷凍能力を求められたため現有の「SuperKEKB」では、QCSL、QCSR のクライオスタットを各々1基ずつのヘリウム冷凍機で冷却・維持している。

現状でも1基使用していないヘリウム冷凍ユニット

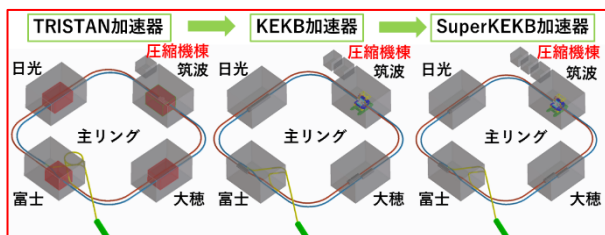


図8. 加速器実験棟経緯概略図

が存在している。図8を見て頂きたい。

これは図1の概略図を実験棟に置き換えた加速器プロジェクトの経緯を表しており、「KEKB」時に富士から筑波に冷凍システムを移設し、「SuperKEKB」ではさらに大穂から筑波に冷凍システムを移設して日光実験棟に稼働していない冷凍システムが保管されている。

QCS では今回、その1基の予備を計画に踏まえて加速器運転に差し障りのないように更新計画を立てた。図9に冷凍システム経緯と年次更新計画を示す。

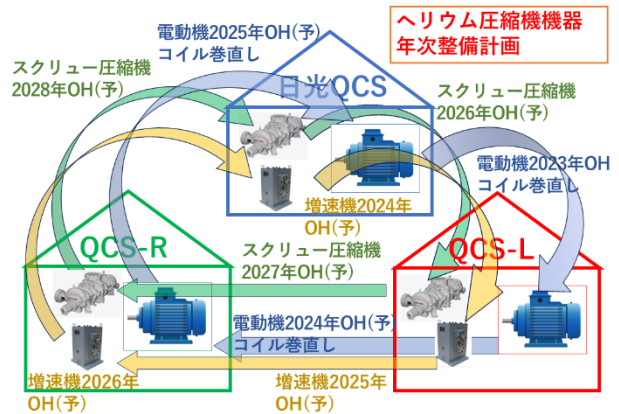


図9. 冷凍システム年次更新計画

今回整備した電動機は保管されていた1基の日光QCSヘリウム圧縮機から取外したものである。そしてQCSLで換装された電動機は圧縮機から降ろされているがこれは整備後に予備機として管理する予定である。この予備機を含め各冷凍機システム間で順次電動機のローテーションを行う予定であり、こうすれば常に点検整備済の電動機を1台予備機として保有する事になり、冷凍機システムの信頼性の向上及び加速器ビーム運転の長期停止を避けることが出来る。

圧縮機を構成する機器のうち、電動機と同様に新規品が購入できなくなったものとして、増速機がある。これは電動機の回転数である3000回転を3600回転まで増速してスクリーユユニットを駆動する重要機器であるが、既にメーカーが製造を取り止め、整備対応業者も1社に限られてしまった。新規品が手配出来ない以上、現有品を適切に整備して使い続けなければならない。増速機についても電動機と並行して3台を順次オーバーホールする計画である。

これらの状況を鑑み、電動機、増速機、スクリーユユニットの順に更新計画を立てた。これにはヘリウム冷凍機システムを含めた全体の長期的な整備計画が必要になるが、実現すればSuperKEKBの冷凍機システムについて、3基の圧縮機他に予備機が1基控える事になる。また、この予備機は今後の冷凍システムのR&Dへ充当する事も可能となるので、整備方法の検討を行っている。

4. まとめ

加速器運転の継続には冷凍機の安定的な長時間運転が望まれる。今回電動機を整備した観点から電動

機の事故は初期不良を除いて中長期的に見ると軸受け及び巻線等の絶縁劣化に起因する。定期点検や日常点検において差異を考慮しながら予防していく必要がある。ヘリウム圧縮機の各機器のオーバーホールは年次整備計画に則り順次整備する予定であるが、機器の著しい劣化が見られ運転継続が難しいと判断した場合はその限りではない。

昨今ヘリウムガスや液化窒素の価格のみならず電気代も上昇しているなか、我々は古い機器で構成されている現状の冷凍機システムをメンテナンスしながら、効率化、最適化を図り、今よりも省資源・省エネルギーな冷凍機システムの運転を目的とした改

造を検討している。

参考文献

- [1] 大内 徳人、他、「SuperKEKB 衝突点用超伝導電磁石システム」低温工学・超電導学会 2014年、3C-a01,3c-a04
- [2] 大内 徳人、他、「SuperKEKB 超伝導電磁石システム」低温工学・超電導学会 Vol.54 No.1
- [3] 川井 正徳、他、「KEKB ビーム衝突点用冷却システムとその運転実績」低温工学・超電導学会 Vol.50 No.12
- [4] 経済産業省資源エネルギー庁「交流電動機のエネルギー消費性能の向上に関するエネルギー消費機器等製造事業者等の判断の基準等」