

SuperKEKB 電磁石用電源

MAGNET POWER SUPPLIES FOR SUPERKEKB

中村衆#, 大木俊征, 安達利一

Shu Nakamura #, Toshiyuki Oki, Toshikazu Adachi

High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

The first beam commissioning of the SuperKEKB has finished in June 28. About ten times trouble of power supplies for magnets of SuperKEKB main ring interrupted the beam commissioning during the machine time. Almost all the magnet power supplies in SuperKEKB were reused ones of KEKB main ring. Some of the power supplies were improved to satisfy the requirements of optical design, and some of them were replaced by new power supplies. Several tests were performed for all of the power supplies to check the soundness. The total number of the power supplies is over 2000. Several failures of the power supplies were happened and they stop the beam operation during the first beam commissioning.

1. はじめに

KEKB 加速器は 2009 年にピーク luminositiy $21.083 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を達成したのち、2010 年 6 月に運転を終了した。その後 luminositiy を 40 倍に増強することを目的に、約 5 年半のアップグレード期間を得て、2016 年 2 月から 6 月 28 日まで、SuperKEKB 加速器として最初のビームコミッショニング (Phase1) を行った。

SuperKEKB の電磁石用電源はそのほとんどが KEKB 時代に使用していた電源の再利用である。Table 1 に SuperKEKB で使用する電磁石電源のうち、再利用する台数と新規に製作した台数を示す。偏向電磁石およびウィグラー電磁石用電源 (BM, Wiggler) は、今回新規に製作した。全周に配置している四極電磁石用の電源 (QM: large) は若干の改修を行って再利用している。直線部やアーク部のつなぎ目に配置している四極電磁石およびすべての六極電磁石用電源 (QM, SM: medium) は、必要な電源台数の増加にともない、増加分を新規に製作し、残りは再利用している。補正電磁石用電源 (Steer, etc.: small) も、担当する電磁石の台数増加分を新規に製作し、残りのほとんどは再利用である。

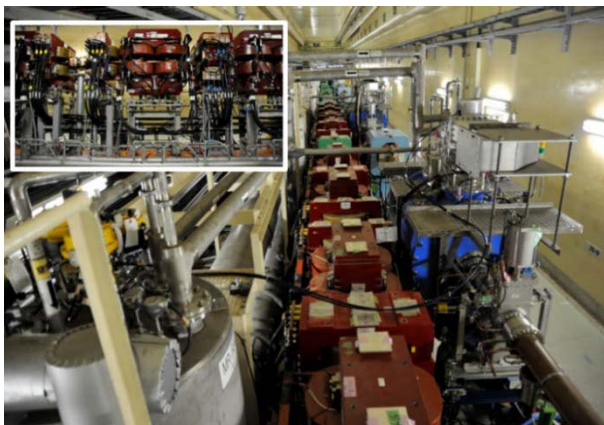


Figure 1: New wiggler magnets in NIKKO.

shu.nakamura@kek.jp

Table 1: The Number of Power Supplies

	new	reuse
BM, Wiggler (0.4 - 1 MW)	11	0
QM: large (0.1 - 0.5 MW)	0	18
QM, SM: medium (2 - 105 kW)	204	335
Steer., etc.: small (0.3 - 2.4 kW)	138	1681
QCS steering magnets (70 A, 10 V)	49	0
QCS main magnets (<2 kA, <15 V)	11	0
total	413	2034

2. 電磁石用電源

SuperKEKB の Main Ring (MR) 用電磁石電源は大電源棟 4 か所と小電源棟 4 か所に設置している。大電源棟には偏向電磁石用電源とウィグラー電磁石用電源、大型の四極電磁石用電源を設置している。これらは水冷電源であり、冷却水設備がある大電源棟にのみ設置している。そのほか、直近の直線部に配置されている電磁石用電源 (主に四極電磁石と六極電磁石用電源) を設置している。小電源棟にはアーク部の六極電磁石や 1 グループが少数の四極電磁石用電源、そして補正電磁石用電源を設置している。これらは空冷電源であるため、小電源棟には空調設備が完備されており、室温が上がりすぎないようにしている。

2.1 偏向電磁石およびウィグラー電磁石用電源

偏向電磁石用電源はトリスタン時代から使用していたこともあり、老朽化にともなう故障リスクの増加と、出力電流の安定度が SuperKEKB で要求する仕様を満たさないことから、新規に製作をおこなった。KEKB の時と同様に、電子リング (HER) は B2E、陽電子リング (LER) は B2P と命名し、一台の電源で一つのリングのすべての偏向電磁石に電流を供給している。電源と電磁石とをつなぐ電

力ケーブルは、そのほとんどは KEKB の時の物を再利用し、電磁石の配置が変更された一部分については新規にケーブル配線をおこなった。そのため、電源から出力した電流は電磁石を渡りながらリングを一周して電源に戻ることになり、大きなループ回路を形成したままとなっている。ウィグラー電磁石用電源はウィグラー区間の改造と新設により、ウィグラー電磁石の種類と台数が増加したため、偏向電磁石用電源と同規模の電源を 9 台製作した。新設したウィグラー電磁石と電源へは、新たに電力ケーブルを敷設した。このとき、既設のウィグラー電磁石やそのケーブル群はそのまま、それらの隙間をぬっての作業となったため、非常に困難な敷設作業となった。Figure 1 にウィグラー電磁石の新設を行った日光直線部の様子を示す。

2.2 四極電磁石用電源(大型電源)

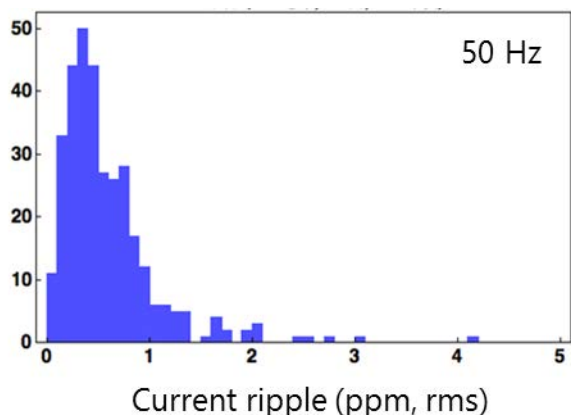
四極電磁石は、それぞれの種類ごとに一台の電源で運転している。これらの電源のうち、出力が大きいアーク部に設置している四極電磁石と一部の直線部に設置している四極電磁石に電流を供給している電源は、KEKB

時代の物を再利用している。再利用にあたり、いくつかの改造を実施した。

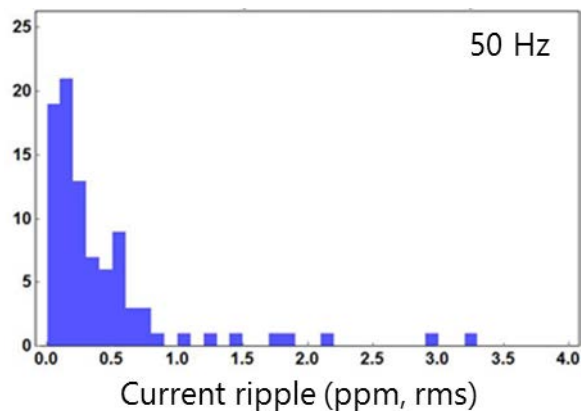
ひとつは電流値設定用の DAC の分解能を 16 bit から 20 bit へと変更した。これによって、電流の設定値は KEKB の時と比較して 1/16 の分解能で設定可能となった。また、電源内の出力電流検出器から制御基盤への信号線の配線ルートを、よりノイズの影響を受けないルートに変更した。それにより、電流設定値を 1 bit 刻みで上昇させた際の出力電流の変化を確認することができた。これらの改造、修正を行ったのち、それぞれの電源単独で実負荷への通電試験を実施し、所定の性能を満たしていることを確認した。

2.3 四極電磁石及び六極電磁石用電源(中型電源)

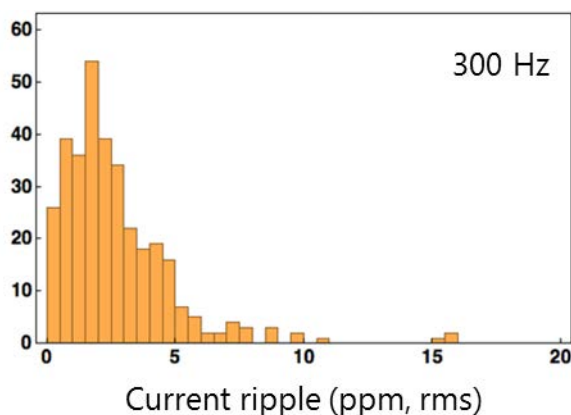
直線部やアーク部のつなぎ目に設置する四極電磁石や、全周に設置する六極電磁石においては、電磁石の台数、種類が増加したため、それらのための電源を新規に製作した。それ以外は KEKB の時の電源を再利用したが、それらはすべてオーバーホールした。このオーバーホールを実施するにあたり、KEKB の運転期間中に



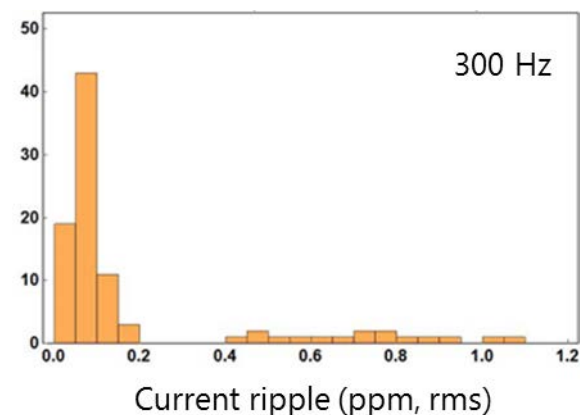
(a) Histogram of current ripple of 50Hz with power supplies manufactured in 1998.



(b) Histogram of current ripple of 50Hz with power supplies manufactured in 2014.



(c) Histogram of current ripple of 300Hz with power supplies manufactured in 1998.



(d) Histogram of current ripple of 300Hz with power supplies manufactured in 2014.

Figure 2: Histograms of current ripples of 50 Hz and 300 Hz. The current ripple is a relative value normalized by rated current of the each power supplies.

発生した中型電源の故障履歴から、交換する部品の選定をおこなった。今回交換を実施したのは、電解コンデンサ、AC-DC コンバータ、遮断機、可変抵抗器、スイッチング素子 (Intelligent Power Module: IPM) である。

これらの部品交換に加え、出力電流に重畳していたスイッチングリップルを削減するため、セラミックコンデンサ (1 μ F) を電源の出力端それぞれにアースに対して取り付けられた。このコンデンサの追加によってスイッチングリップルは 1/20 となった。

再利用した電源と新規製作の電源は、それぞれ実負荷に接続して通電試験を行った。その結果を Fig. 2 に示す。これは出力電流における 50Hz と 300Hz の電流リップルを横軸に電流リップルの大きさ、縦軸に電源台数を取ったヒストグラムである。電流リップルの大きさは各電源の定格出力電流で規格化している。1998 年に製作した KEKB からの再利用電源と、2014 年に製作した新規電源とで、50Hz 成分は大きな違いは見られないが、300Hz 成分においては、新規電源のほうが格段に小さくなっていることがわかる。これは新規電源の製作時に、回路定数の最適化を行った結果である。

2.4 補正電磁石用小型電源

ステアリング電磁石や各電磁石の補正コイルに電流を供給する小型電源の台数は、SuperKEKB においては約 1820 台である。このうち、新規に製作した電源は 138 台で、残りは KEKB からの再利用である。再利用電源のうち、オーバーホールを行ったのは 256 台にとどまっており、その他は模擬負荷における通電確認にとどまっている。オーバーホールでは電解コンデンサ、DC-DC コンバータ基板などの交換を実施した。模擬負荷への通電試験では予備電源も含めて 3% の電源で故障が発生した。

SuperKEKB においては、KEKB で使用した垂直ステアリング電磁石の多くが廃止となったかわりに、四極電磁石に巻かれている補正四極コイルを、個別の小型電源で励磁することとなった。これらは KEKB では小電源棟に設置した電源とリレースイッチの切り替えによって励磁していた。この追加した台数は約 500 台である。これらの補正コイルはインピーダンスが小型電源の使用範囲よりも小さいため、電源 ON 時の突入電流などによって電源が故障するなど、正常に通電できない現象が発生した。これを避けるため、追加のリアクトルを電源の出力部に負荷に直列に追加する必要がある。

3. ビーム運転中の故障事例と対策

電源の故障はインターロックとして 2 種類に分かれている。ひとつは「重故障」で、これが発生すると即座に電源は停止する。「重故障」はビーム運転に支障を与える、または安全に電源の運転ができない事象が発生したときに発報するもので、ビームをアボートするトリガとなる。もうひとつは「軽故障」で、これはただちにビーム運転に支障はないが、より大きな故障や電源性能の劣化の原因となりうる軽微な故障のことである。「軽故障」が発報しても電源運転は継続し、ビームアボートのトリガも発生しない。

2016 年 2 月から 6 月にかけての Phase1 において、ビーム運転中の「重故障」はのべ 35 回発生した。そのう

ち、偏向電磁石およびウィグラー電磁石電源で発生したのはのべ 15 回、中型電源で発生したものがのべ 10 回、補正電磁石用小型電源で発生したものがのべ 10 回であった。また、「軽故障」はのべ 16 回発生し、偏向電磁石及びウィグラー電磁石電源で 1 回、中型電源でのべ 10 回、補正電磁石用小型電源でのべ 5 回であった。Table 2 にこれらの内訳を示す。

Table 2: Trouble

BM, Wiggler (0.4 - 1 MW)	severity	total number
AC input Over Current	重	9
AC input Stop, CB Fault	重	6
Thermostat	軽	1
QM, SM: medium (2 - 105 kW)		
IPM Fault	重	6
Ext I/L	重	3
GND Fault	重	1
Tracking	軽	3
Thermostat	軽	7
Steer., etc.: small (0.3 - 2.4 kW)		
DC Fault, OV etc.	重	10
Current monitor error etc.	軽	5

3.1 偏向電磁石およびウィグラー電磁石用電源

交流入力過電流 (AC input Over Current) は電源の交流入力において、入力電流が閾値を超えた場合に発報する。のべ 9 回のうち 5 回は日光変電所のフィルタ動作時に発生した交流系統の電圧変動が原因で、日光変電所から受電しているウィグラー電磁石用電源群で発生した。このフィルタ動作は自動制御によるものであったが、その制御方式はトリスタン時代から変更されていないため、系統に接続している電源が大幅に変更された SuperKEKB においては、適切な動作をしているようにみえない。また、誤動作を疑われる動作もあった。そこで、電源の動作が一定であるビーム運転中は手動制御に変更し、系統変動が大きくなった場合は監視員が操作することとした。その後は同じ現象は発生していない。残りの 4 回は RF 高圧電源のクローバー動作による交流系統変動に起因するもので、B2P 電源で発報した。これらの交流系統の変動に起因する事象への対処として、各変電所のフィルタや制御ソフトの改修を順次行うこと、およびこれらの電源の入力交流リアクトルの増改築を検討している。

交流入力停電 (AC input Stop) と遮断機異常 (CB Fault) は特定の 2 電源で同時に 3 回、のべ 6 回発生している。うち 1 回は地震発生時に発報している。この故障は実際に発生しておらず、高圧受電盤の測定系またはインターロック信号を受信する電源制御盤の誤動作と考えている。しかし原因はわかっていないため、交流入力の電流、電圧およびこのインターロックの信号線をモニタしながら原因を調査中である。

3.2 四極電磁石用電源(大型電源)

四極電磁石用電源(大型電源)においてはビーム運転中の故障は発生しなかった。しかし、電磁石の初期化運転中に出力地絡検出が誤動作することが頻発した。これは地絡検出回路に想定以上のノイズが混入したことによる誤動作とわかっており、当面は検出閾値の調整で乗り切った。今後は検出器の接地や信号線の取り回しの見直し、検出回路へのフィルタ挿入によってノイズ低減を図ることで対処する。

3.3 四極電磁石及び六極電磁石用電源(中型電源)

IPM Fault とは電源内のスイッチング素子(IPM)の異常で、IPM が自身の保護回路で検出した異常信号をトリガとしている。経年変化による絶縁抵抗値の低下に伴う過電流によって、素子が壊れる現象が KEKB 時代から発生していた。1998 年製の中型電源で使用している素子は生産終了となっているため、予備品の確保を進めるとともに後継素子との互換性を調査中である。

今回のビーム運転中に発生した IPM Fault では、電源棟内の温度が上昇したことによるものがあつた。小電源棟には空調設備が設置されているが、大電源棟には換気扇しかないため、外気温の上昇にともなって室温も上昇する。地上約 2m に設置した温度計の記録によると、外気温にプラス 10 度した気温となっている。電源の吸気口温度が 40 度を越えるるとこの故障が発生したため、スポットクーラーによって、当該電源の吸気温度を下げる処置を行った。その状態でも、外気温が上昇した日に 1 回発生したため、電源棟内の室温を下げる方策を検討中である。

外部インターロック(Ext I/L)は、電源以外の要因で電源を停止させるためのインターロックで、今回は電磁石の冷却水流量が低下したことで発報した[1]。

出力地絡(GND Fault)は電磁石の初期化運転中に発生した。当該電源の出力ケーブルは、P 側と N 側とでそれぞれ 2 本ずつ使用しているが、そのうちの 1 本が電源棟から MR トンネルへの貫通孔入口において、金属製の貫通孔のエッジがケーブル外皮に食い込み地絡した。幸い運転電流値が低かったため、地絡した N 側出力ケーブルを取り外し、健全な 1 本だけで運転することが可能であった。定常運転時に異常発熱することはないが、電磁石の初期化運転時などに、機器の誤動作や操作員のミスにより電源の定格電流に近い電流値で長時間運転を行うようなことが発生すると、ケーブルが発熱、発火する恐れがあるため、この停止期間中に新たにケーブルを引き直す予定である。

追従性異常(Tracking)は電流偏差が閾値を越えた場合に発生する「軽故障」であるが、今回発生した 3 件とも出力電流がゼロとなったため、ビームロスによってビーム運転を停止させた。このインターロックはすべて、同じ電源で発生した。原因は当該電源の出力部にある転極器の異常であった。中型電源は単極性電源なので、ビームオプティクスの変更から電磁石の極性を変更する可能性がある電源には転極器を取り付けている。この転極器は出力電流がゼロの時のみ動作するように電源との間で協調をとり、転極器の動作中は電源の出力をゼロとする設計となっている。今回は転極器が動作中であることを示

す転極器位置検出回路が誤動作し、電源の出力電流が強制的にゼロとなったと考えられる。Phase1 において、この電源の極性を変更する予定がなかったため、転極器の駆動モータを固定し、転極器位置検出回路からの信号を電源から切り離れた。

もうひとつの「軽故障」である恒温槽異常(Thermostat)は、電源内の高精度制御基板の温度コントロール用恒温槽の異常である。5 台の電源で発生し、そのうちの 4 台はビーム運転中のメンテナンス日に修理を行った。冷却用のペルチェ素子の交換が 3 台、温度調整基板の交換が 1 台であった。この恒温槽異常によって、室温の変動と同期した出力電流の変動が観測されており、その大きさは電源によるが、定格電流に対して数 ppm から数十 ppm であった。この故障は KEKB 時代には 1 件しか発生しなかったため、アップグレード期間のオーバーホールには含んでいない。今後、同様の故障が増加することが考えられるので、交換用の予備品の手配を進めている。

3.4 補正電磁石用小型電源

「重故障」の DC-DC 基板異常(DC Fault)や出力過電圧(OV)などは、主に電源内の基板の故障によるもので、電源自体を予備電源と交換することで対処した。ビーム運転前の通電試験において、模擬負荷での通電試験で問題なかった電源であっても、実負荷での通電や電磁石の初期化運転で故障する事例が多発した。ビーム運転の開始前に通電試験を実施したことで、潜在的に故障しやすい電源を交換することができたと考えている。

「軽故障」の電流モニタエラー(Current monitor error)は電源の出力電流モニタ端子に接続するコネクタの接触不良などが原因である。点数が多いため、すべてのエラーを対処しきれていないが、接触不良が疑われるコネクタは再加工するとともに、全数の再点検を行う予定である。

4. Phase2 に向けて

Phase1 では電子ビームと陽電子ビームの衝突は行わないため、電子・陽電子ビーム衝突に関わる電磁石用電源の多くは未整備であった。現在、衝突点の超伝導電磁石用電源群(QCS main magnets & steering magnets)の整備を進めている[2]ほか、衝突制御のための Dithering システム[3]や iBump システムの整備を進めている。これらのうち、Dithering システム用の電磁石と電源は Phase1 前に用意、設置していたため、短時間ではあるがビーム試験の時間をもらい、Dithering コイルへの通電とビームの励振試験をおこなった。Dithering コイルは LER の衝突点の左右 4 か所ずつの計 8 か所に設置しており、そのうち衝突点に近い 4 か所は水平と垂直の二方向、それ以外は垂直方向へ励磁するための電源を接続している。

Dithering コイルを 10 Hz から 990 Hz までの周波数で一定の電流振幅で垂直方向に励磁した場合の、それぞれの周波数における水平方向のビーム振幅の減衰率と、円形ダクトを仮定した渦電流による磁場減衰率[4]を Figure 3 に示す。ビーム振幅の減衰率は、10 Hz での振幅を 1 とした。真空ダクトの形状は Dithering コイルの設置場所によって異なり、Figure 3 で励磁した Dithering コイ

PASJ2016 TUOL07

ルを設置している場所の真空ダクトは、グラフ中に示すように水平方向に側室が付いたアンテナチャンバーである。アンテナ部の影響で円形ダクトを仮定した場合よりも周波数による減衰率が大きいと考えられる。

Dithering システムの励磁周波数は 77 Hz を予定しているので、この減衰は問題とならない。しかし iBump システムの励磁周波数は約 1 kHz を想定しているため、Phase2 までに iBump 用電磁石を設置する箇所の真空ダクトによる磁場の減衰率を測定する予定である。

謝辞

KEKB から SuperKEKB へのアップグレードにおいて、偏向電磁石やウィグラー電磁石用電源の新規製作に関する検討、および現地試験調整は末野毅氏の多大な貢献なしにはなしえませんでした。また、各種電源オーバーホールにおける重点項目の洗い出しや、再立ち上げは徳田登氏の貢献が大きく、限られた費用の中で故障率の大きい部品を重点的に交換するなど、Phase1 での電源故障がこの件数におさまったのは徳田氏の地道な仕事によります。おふたりとも定年退官されましたがここに御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 植木 竜一 他, TUP106 “SuperKEKB 主リング電磁石システムの運転報告”, 第 13 回加速器学会年会, 千葉, 2016.
- [2] 大木 俊征 他, TUOL08 “SuperKEKB 用高安定度電磁石電源”, 第 13 回加速器学会年会, 千葉, 2016.
- [3] Y. Funakoshi *et al.*, “INTERACTION POINT ORBIT FEEDBACK SYSTEM AT SuperKEKB”, Proceedings of IPAC2015, Richmond, VA, USA, 2015.
- [4] A. W. Chao and M. Tigner, Editors, “Handbook of Accelerator Physics and Engineering”, World Scientific, Singapore, 1999, P.268.

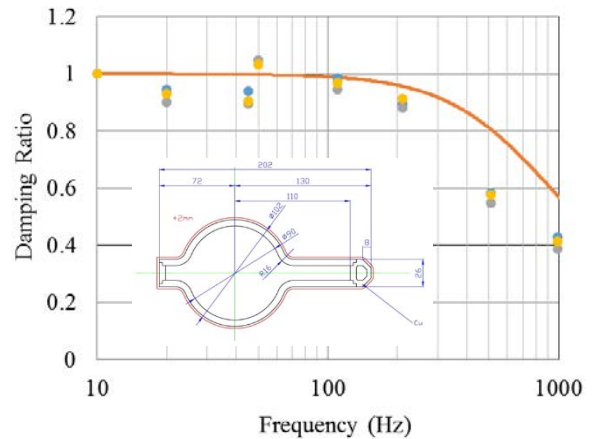


Figure 3: Damping ratio of a beam modulation. Line is a dumping ratio of magnetic field due to eddy current. Symbols are sinusoidal amplitude measured by beam position monitors with turn by turn mode.