

電磁石電源

1. はじめに

SuperKEKB 加速器[1]では、高いルミノシティを目指すべく、これまでにない細いビーム同士の衝突を実現し、それを如何に安定に維持するかが課題である。いくつかの電磁石電源には、2 ppm/日といった高い出力電流安定度が要求されるため、24 ビット分解能のデジタル帰還電流制御方式を新たに開発して採用している[2-4]。また、高い積分ルミノシティを達成するためには、各電磁石電源を適切に維持管理し、必要があれば改修を行い、安定に稼働させる必要がある。本講義では、これら SuperKEKB 加速器主リングを構成する電磁石電源システムの概要、開発、維持管理について紹介する。

2. 電磁石電源システムの概要

電磁石電源システムは、負荷である電磁石と電力ケーブルで接続された電磁石電源、交流電力を電磁石電源に供給する分電盤、電源を遠隔操作するための遠隔操作システム、電源の出力電流を計測する電流モニターシステム、電磁石に通電できる状況にあることを示すパトライトを加速器トンネル内と電源棟で点灯させるシステム、負荷および電源の異常情報を統合して電源を保護停止させるインターロック統合システムからなる。また、ビームベースド・アライメント (BBA) 電源の出力を補正コイルへ継電するための BBA リレー盤や、電源周囲温度などを記録するための計測機器も用意してある。これらの機器を設置した電源棟の配置図を Fig. 1 に示す。典型的な例として、衝突点最終収束系 (QCS) 超伝導電磁石[5-7]の電源システム概略図を Fig. 2 に示す。

電磁石電源の一覧を Table 1 に挙げる。常伝導電磁石電源は、全周主偏向電磁石大型電源および日光/大穂直線部ウィグラー電磁石大型電源、全周主四極電磁石大型電源および日光/大穂直線部四極電磁石大型電源、各種二/四/六極電磁石用中型電源、ステアリングや補正電磁石用両極性小型電源

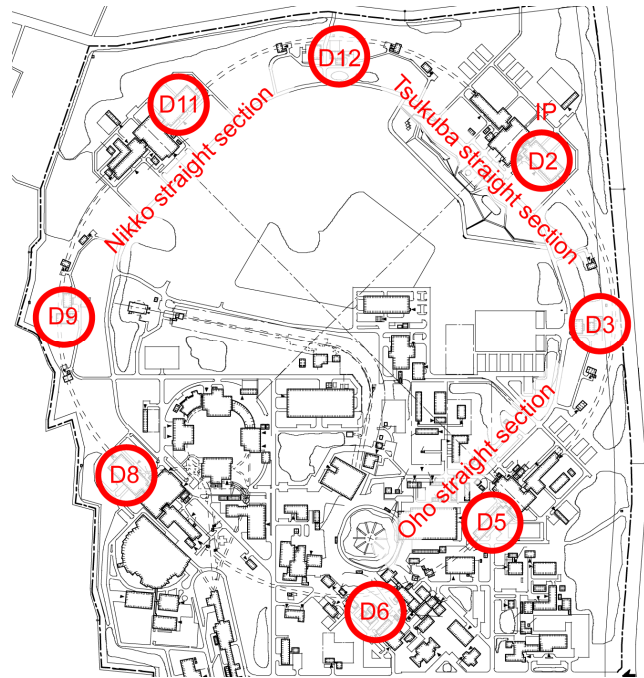


Fig. 1. 電源棟配置図。D2, D5, D8, D11 の各大電源棟と D3, D6, D9, D12 の各小電源棟に分散して機器を設置してある。

からなる。また、QCS 超伝導電磁石電源は、主四極電源、ソレノイド電源、補正電磁石用両極性電源からなる。

Table 1 には、各電源の主な負荷電磁石、受電電圧、定格出力、冷却方式、整流/制御方式、電流安定度とリップルの仕様値、電流設定分解能、電源台数を示す。KEKB で使用してきたものを（一部はオーバーホールを行って）再利用しているもの、新たに SuperKEKB 加速器のために設計製作したものの区別も示す。

3. KEKB から SuperKEKB への高度化

3.1 アップグレード概要

KEKB 加速器[8-9]は、 $2.1083 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ という当時世界最高のピーク・ルミノシティを達成した電子・陽電子衝突型加速器であった。その 40 倍のルミノシティを目指すべく、2010 年 6 月末に運転を停止し、高度化計画として SuperKEKB 加速器への大規模な改造を始めた。

Table 1:主リング電磁石電源一覧

常伝導電磁石電源

負荷電磁石	受電電圧		定格出力		冷却方式	整流方式 制御方式 電流安定度仕様値 リップル仕様値	電流設定 分解能 (bits)	電源台数	
	AC (V)	DC (A)	DC (V)	DC (kW)				(A)	(B)
全周主偏向	6,600	860	1,100	946	水冷	IGBT 整流 IGBT スイッチング 2 ppm/day 1 ppm (rms)	24	0	2
ウィグラー	6,600	800	500	400	水冷	IGBT 整流 IGBT スイッチング 2 ppm/day 1 ppm (rms)	24	0	1
ウィグラー	6,600	1,400	350 – 750	490 – 1,050	水冷	IGBT 整流 IGBT スイッチング 2 ppm/day 1 ppm (rms)	24	0	8
全周主四極他	420	500	260 – 930	135 – 465	水冷	サイリスタ整流 トランジスタ・ドロップ 20 ppm/8 hrs. 10 ppm (rms)	20	18 [#]	0
二/四/六極他	420	200 – 1,250	10 – 120	8 – 105	空冷	ダイオード整流 IGBT スイッチング 20 ppm/8 hrs. 10 ppm (rms)	16/20	330 [#]	93
BBA	420	±30	±200	6	空冷	ダイオード整流 IGBT スイッチング 20 ppm/8 hrs. 10 ppm (rms)	16	4 [#]	0
ステアリング/ 補正	210	±5 – ±60	±50 – ±120	0.3 – 3	空冷	MOS-FET スイッチング 100 ppm/day 50 ppm (rms)	16/20	1,681	257

QCS 超伝導電磁石電源

主四極	420	2,000	15	30	水冷	ダイオード整流 IGBT スイッチング 2 ppm/day 1 ppm (rms)	24	0	8
ソレノイド (ESR1)	420	455	45	20	水冷	ダイオード整流 IGBT スイッチング 5 ppm/day 5 ppm (rms)	24	0	1
ソレノイド (ESL)	420	410	30	12	水冷	ダイオード整流 IGBT スイッチング 5 ppm/day 5 ppm (rms)	24	0	1
ソレノイド (ESR23)	420	155	15	2	水冷	ダイオード整流 IGBT スイッチング 5 ppm/day 5 ppm (rms)	24	0	1
補正	210	±70	±10	0.7	空冷	MOS-FET スイッチング 5 ppm/day 5 ppm (rms)	20	0	43

(A): 再利用 ([#] オーバーホール済)

(B): 新規製作

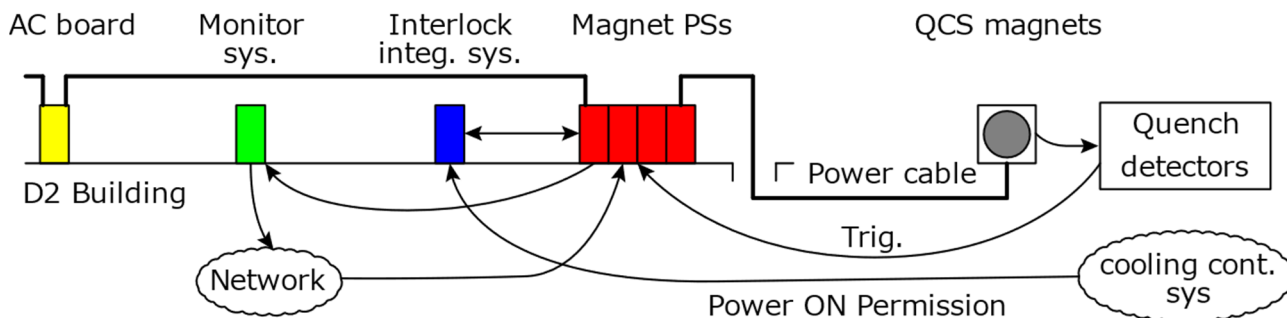


Fig. 2. システム概略図 (衝突点最終収束系超伝導電磁石電源の例)

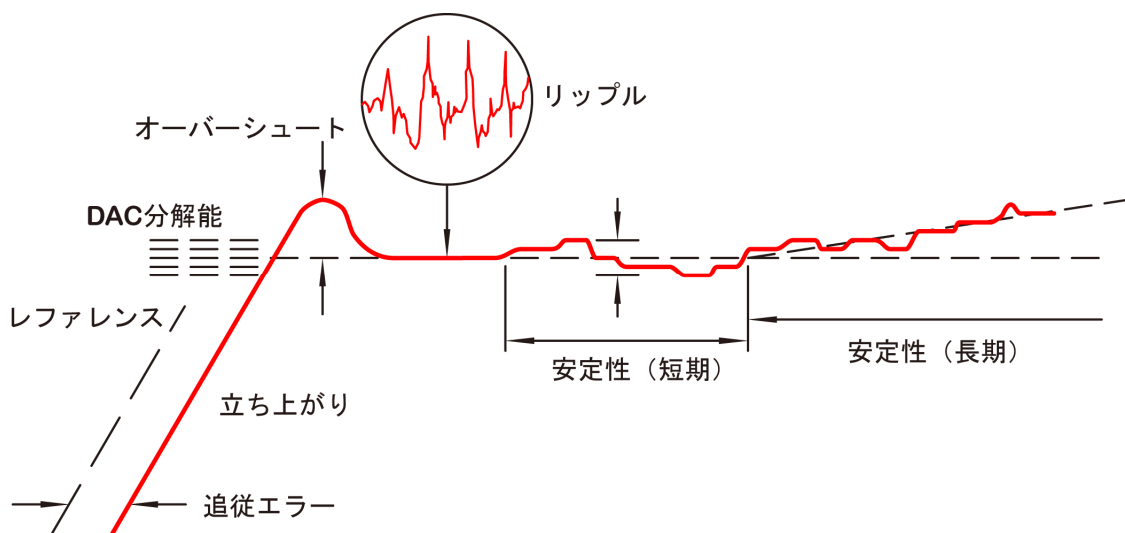


Fig. 3. 電源出力電流の性能を特徴づける指標

電磁石に関する主な改造内容は以下のとおりである。(1) 衝突点でのベータ関数を絞り込むために、いわゆる砂時計効果を回避する必要から、衝突交差角を約 5 度と大きくとり、かつ、最終収束系や局所色収差補正系など全面的に光学系を改造するために、QCS 超伝導電磁石を含む筑波直線部の全電磁石を再配置する。(2) 磁束密度をより小さく、曲率半径をより大きくして、水平方向のエミッタンスを小さくできるよう、LER 偏向電磁石を全長 0.9 m から 4 m の長いものへ更新する。(3) LER については従来の二連極ウィグラーに加えて、新規に製作した単極および半極のウィグラー電磁石を導入することで周期を半分にし、HER については二連極ウィグラー電磁石を新たに設置して水平方向エミッタンスを下げる。(4) 全周主偏向電磁石と QCS 超伝導主四極電磁石については、安定度が 2 ppm/日程度の高安定度な磁場とする。

これらに基づき、またおよそ 10 年間の加速器運転で支障が無いよう、次のように電磁石電源システムを高度化するための改造に取り組んだ。

- (1) 24 ビット制御基板とデジタル帰還制御による高分解能高安定度電流制御方式を開発。
- (2) 高安定度電流制御方式を適用した全周偏向電磁石大型電源、ウィグラー電磁石大型電源、QCS 超伝導主四極電磁石電源を製作し、既設の電源を更新。
- (3) 中型電源を製作し、大幅に光学系を改造した衝突点近傍の筑波直線部の電磁石電源として、その 70%を配置。
- (4) 小型電源の追加製作。
- (5) 既設の全周主四極電磁石大型電源と中型電源のオーバーホール。
- (6) 光学系改造に伴う、電力ケーブル撤去と敷設、および、既設電源の配置変更。
- (7) 電源棟の増設、受電設備の更新と増強。筑波直線部電磁石電源用の D2 電源棟では、電源数増加に対応できるよう、外気導入システムを設置し、ケーブル・ピット蓋をメッシュ化。
- (8) 老朽化

したインターロック統合システムの更新。(9) 新規製作電源による電流制御高分解能化に対応した制御系の改修。

これらの電磁石電源システムのアップグレード、改造内容について順に述べてゆく。

3.2 電源の開発

電源出力電流の性能を特徴づける指標を Fig. 3 に示す。陽子加速器のように入射、加速、取り出しを繰り返す運転と異なり、SuperKEKB 加速器では立ち上がりの追従性やオーバーシュートに対する要請は厳しくない。その代わりに、如何にビームを安定に周回、蓄積させるかが要となる。各種ビーム帰還制御が機能するといえども、その制御範囲は有限であり、電磁石電源出力の電流安定度と電流リップルがビームの質を左右する重要な鍵となる。

全周偏向電磁石大型電源、ウィグラー電磁石大型電源、QCS 超伝導主四極電磁石電源では、特に高い電流安定度 2 ppm/日以下が要求されることから、3.2.1 と 3.2.2 で紹介するように、24 ビット制御基板とデジタル帰還制御による高分解能高安定度電流制御方式を開発した。また、これら以外の電源でも、SuperKEKB 加速器で新規に製作した電源では、3.2.3 で紹介するようにリップルとノイズを低減するよう注意して設計した。

3.2.1 高分解能制御基板の開発

KEKB 加速器の電磁石電源では、主に 16 ビット分解能での電流制御を行っていた。その例として KEKB ウィグラー電磁石 BW1OLP_48 電源 (1 kA, 700 V) について、その電流指令値を 1 ビット (~15 mA) 変えた時の出力電流の応答を、Fig. 4 に示す。

開発する電源では、目標の電流安定度が 2 ppm/日であることから、その 10 分の 1 程度の電流設定分解能が必要になるため、24 ビットの制御を目指すことにした。複数の DAC を組み合わせて高分解能化を目指す検討はいくつかあり、Spring8 では 2005 年に 16 ビット DAC を 2 個組み合わせて 18 ビットとする方法が提案されていた[10, 11]

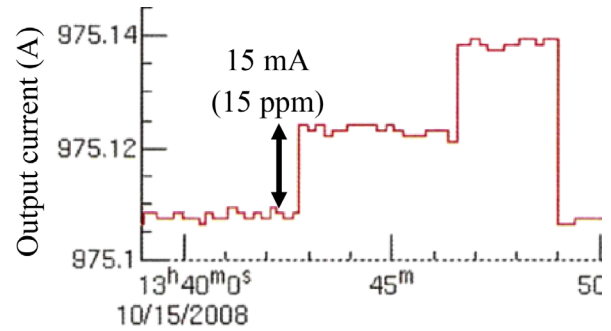


Fig. 4. 16 ビット分解能の KEKB ウィグラー電磁石大型電源 (1 kA, 700 V) で電流指令値を 1 ビット変えた時の出力電流の応答

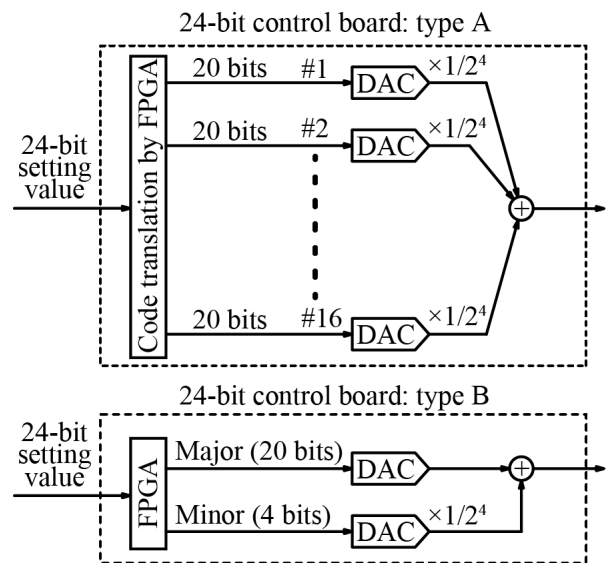


Fig. 5. 開発した 2 種類の 24 ビット制御基板の概念図

ので、そうした方法で開発を進めることにした。幸い、開発当初の 2010 年 7 月にアナログデバイス社から単調性のある 20 ビット DAC、AD5791 [12] が発売された。これを複数個組み合わせることで 24 ビット制御を実現する方法として、Fig. 5 に示すような 2 つの方法が考えられる。すなわち、A タイプでは 24 ビットの電流指令値を 20 ビット \times 16 ($=2^4$) セットに分割して 16 個の DAC に入力し、DAC の出力をそれぞれ 16 分の 1 にしたものを加算する。B タイプでは、24 ビットの電流指令値を 20 ビットの粗調と 4 ビットの微調に分け、2 つの DAC にそれぞれを入力し、微調用 DAC の出力を 16 分の 1 倍して粗調用 DAC の出力に加算する。B タイプの方法では DAC の数が

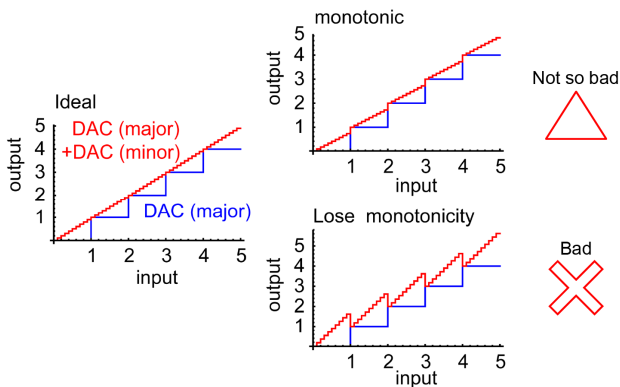


Fig. 6. Bタイプの24ビット制御基板では、粗調用DACのINLが ± 0.5 LSB以上であると、粗調用DACが繰り上がる際の単調性が失われる。

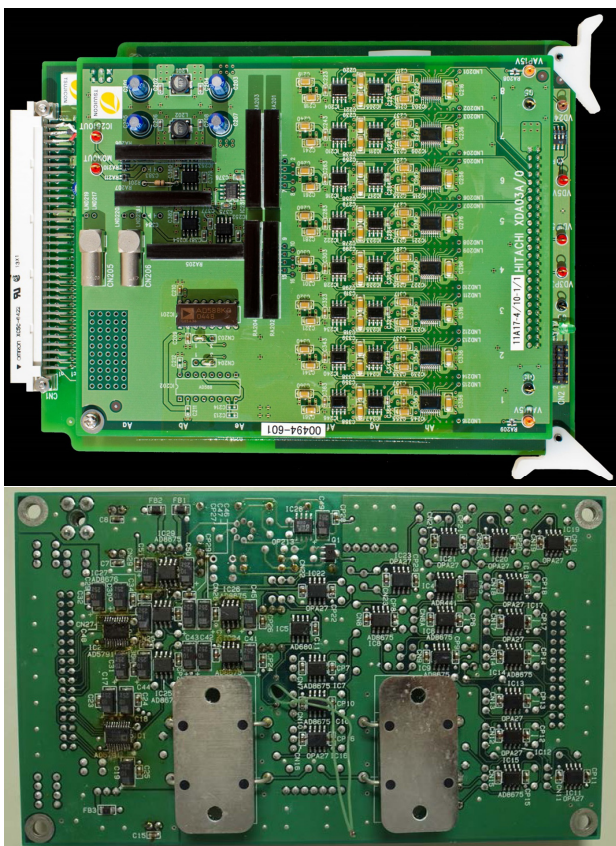


Fig. 7. 開発した2種類の24ビット制御基板。Analog Devices AD5791BRUZAがタイプ(上)には16個、Bタイプ(下)には2個使っている。

少なくとも済むが、単調性の問題がある。つまり Fig. 6 示すように、粗調用DACが1最下位ビット(least significant bit, LSB)増え、微調用DACのビットがすべて1からすべて0に変わる際に、粗

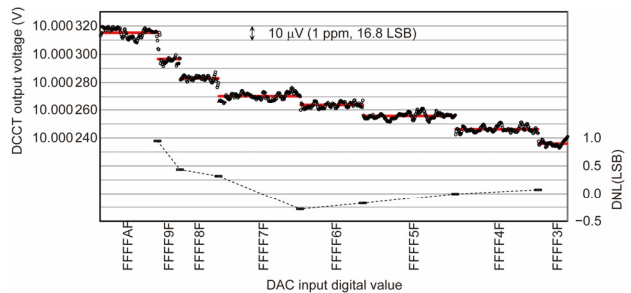


Fig. 8. Aタイプ24ビット制御基板を採用したBWDNLPウィグラー電磁石大型電源の電流設定分解能試験結果。出力は1400 A。黒丸は測定値を示し、各入力値に対応する区間での平均値を赤線で示す。各区間での揺らぎの幅は、標準偏差で $2 \mu\text{V}$ 、 0.2 ppm 程度。

調用DACの積分非直線性誤差(integral non-linearity, INL)が ± 0.5 LSBよりも大きい場合、単調性が失われてしまう。しかしAD5791BのINLは十分小さく、仕様値(typ.)で ± 0.5 LSB、AD5791の評価ボードEVAL-AD5791SDZでの試験結果で -0.2 から $+0.6$ LSBであるので、そうした心配はない。先行して製作した全周主偏向電磁石大型電源およびウィグラー電磁石大型電源では、念のためAタイプの方式を採用することにしたが、QCS超伝導主四極電磁石電源ではAD5791Bを2個組み合わせてBタイプの24ビット制御とすることにした。開発したAタイプおよびBタイプの24ビット制御基板の写真をFig. 7に示す。

Aタイプの24ビット制御基板を採用したBWDNLPウィグラー電磁石大型電源で行った電流設定分解能の試験結果をFig. 8に示す。定格1400 A出力付近において、約30分ごとにDACへの入力値(16進数)をFFFF AFからFFFF 3Fまで16 LSBずつ下げ、入力値を変えた直後の10分から15分程度の間に出力量を100サンプル程度記録し、その変化を測定した。試験結果から、およそ1 ppmに相当する16 LSBの段差ははっきりと現れていて、さらに高い設定分解能が期待できる。

Bタイプ24ビット制御基板を採用したQCS超伝導主四極電磁石電源で行った電流設定分解能の試験結果をFig. 9に示す。DAC入力デジタル

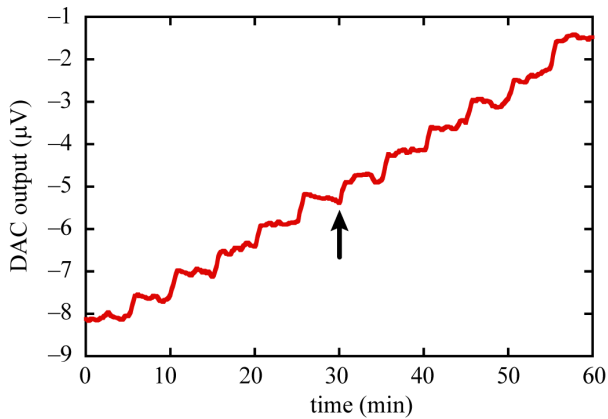


Fig. 9. Bタイプ24ビット制御基板の試験結果。入力デジタル指令値を1 LSBずつ増加させたときの、出力アナログ値をKeithley Model 2002 デジタル・マルチメーターで計測した。矢印は粗調用DACが繰り上がるときを示す。

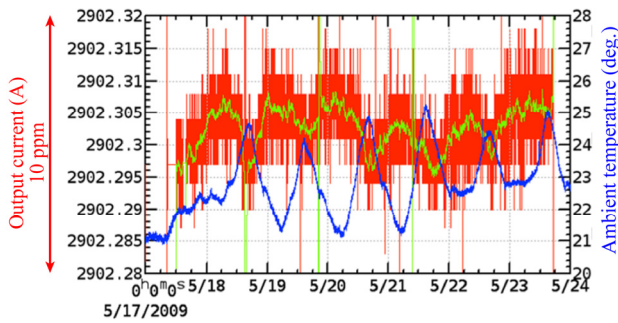


Fig. 10. KEKB 加速器の QCS 超伝導主四極電磁石電源 (定格 4 kA, 15 V) の出力電流安定度。出力電流 (赤線) と電源周囲温度 (青線) を 1 週間計測した。緑線は出力電流の移動平均値。

値を 300 秒ごとに 0x00001F から 0x000020 へ 1 ビットずつ上げてゆき DAC 出力アナログ値を Keithley Model 2002 デジタル・マルチメーターで計測した。粗調用 DAC のビットが 1 つ増え、微調用 DAC のビットがすべて 1 からすべて 0 に変化する位置を図中矢印で示す。1 LSB のステップが見え、24 ビットの分解能があり、粗調用 DAC が繰り上がるときの単調性があることがわかる。

3.2.2 高安定度電流制御方式の開発

KEKB 加速器の電磁石電源には、出力電流の変動を抑え込むために、直流電流検出器 (DCCT)

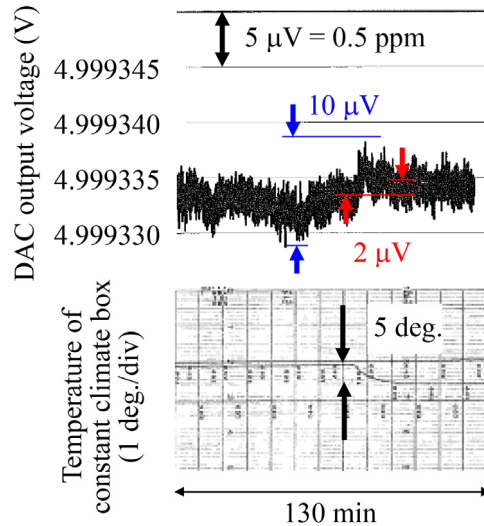


Fig. 11. EVAL-AD5791SDZ 評価ボードを使って測定した AD5791 の出力安定度。変動は 1 ppm/130 分程度。周囲温度を 5°C 変えた時の出力変化から、温度係数は 0.04 ppm/K 以下。

で出力電流を計測して、指令値との誤差を補正するアナログ電流帰還制御が行われてきた。そうした例として、Fig. 10 に KEKB 加速器の QCS 超伝導主四極電磁石電源 (4 kA, 15 V) の出力電流を 1 週間計測したものを示す。この図では電源周囲の温度として室温もあわせてプロットしてあるが、このように室温に影響されて出力が変動し、10 ppm/1 週間程度の安定度となっていた。この電源には、温度係数の小さい DAC、高精度抵抗、オペアンプ、基準電源 IC などの素子と、それらを納める恒温槽を使用していたが、それでも 0.4 ppm/K 程度の温度係数となっていた。

また、DAC の出力は温度以外の要因でも有限の揺らぎがある。Fig. 11 に AD5791 の評価ボード EVAL-AD5791SDZ を使った測定結果を示す。バッファアンプには AD8675 および AD8676 オペアンプを、基準電源には AD688ARWZ を使っている。DAC の出力を Keithley 2002 デジタルマルチメーター (20 V レンジ、積分時間 10 PLC) で 130 分間にわたって計測し、途中で評価ボードを納めた恒温槽の温度を 5°C 変えた。このように温度変化に対する変動は $2 \mu\text{V}/5 \text{ K} = 0.04 \text{ ppm/K}$ と小さいが、揺らぎ幅自体は 130 分間で $10 \mu\text{V} = 1 \text{ ppm}$ 程度もある。素子の温度変化の他、こうし

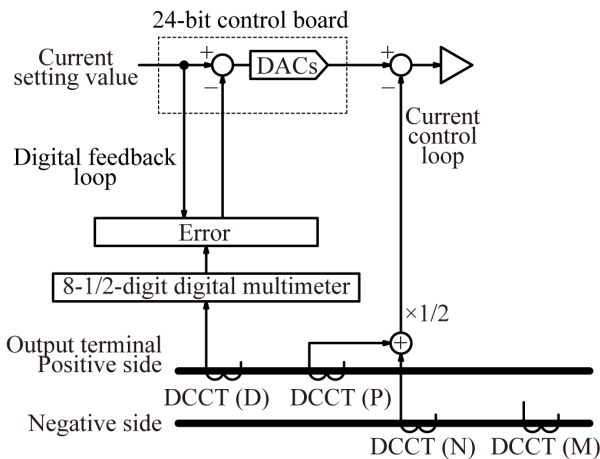


Fig. 12. デジタル帰還制御の概略図。アナログ制御用 DCCT (P)および DCCT (N)の平均値でノーマル・モード制御を行い、デジタル制御用 DCCT (D)でデジタル帰還制御を行う。モニター専用 DCCT (M)は電流制御系と独立に設けてある。

た揺らぎによる変動を抑え込み、目標の安定度を指すために、Fig. 12 に示すデジタル帰還制御を行うことにした。

図に示すように電源出力端子の P 側と N 側には、それぞれにアナログ制御用 DCCT (P)および DCCT (N)を設けてある。これらの信号の平均をとってノーマル・モード成分のアナログ帰還制御を行う。このアナログ帰還制御に加えて、デジタル帰還制御を行うためにデジタル制御用 DCCT (D)を設け、その出力を 8.5 桁の Keithley model2002 デジタル・マルチメータで高精度に計測し、得られたデジタル値を電流指令値のデジタル値と比較して偏差を DAC の入力へ帰還する。なお、このデジタル帰還制御は、数十秒毎に行う非常に遅い帰還制御であるので、アナログ帰還制御の速い制御と干渉しない。また、直流成分の補正を行うため、コモン・モード成分の寄与がないことから、P 側と N 側の平均処理を行う必要はない。

このデジタル帰還制御では、DCCT (D)とデジタル・マルチメータが制御の基準になる。採用した Hitec TOPACC DCCT の仕様は、定格出力が 10 V、帯域が DC-500kHz、温度係数が 1.5 ppm/K 以下、直線性誤差が 2.5 ppm 以下、リップルが 0.3 ppm (< 100 Hz)、1.5 ppm (< 10 kHz)

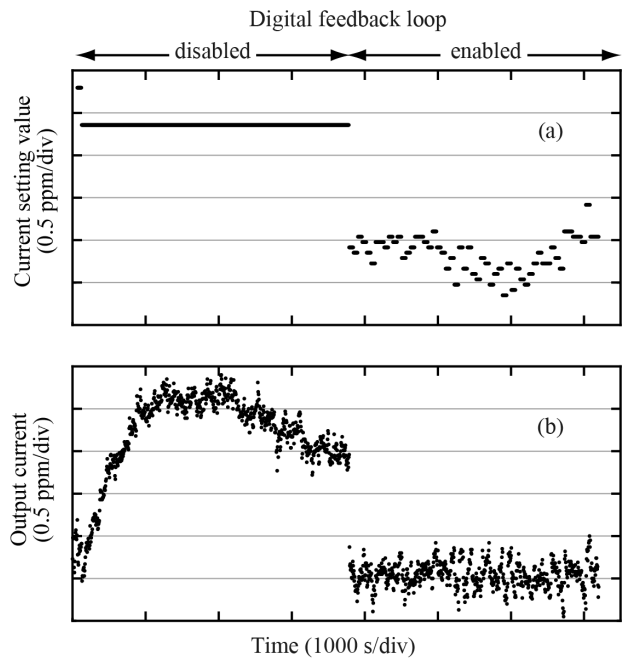


Fig. 13. モデル電源(500 A, 15 V)で行ったデジタル帰還制御の試験結果。(a) 電流指令値 (デジタル値をアナログ値に変換してプロットしてある)と、(b)出力電流の測定値。デジタル帰還制御を無効にした場合と有効にした場合を示す。

である。また、Keithley model 2002 デジタル・マルチメータの仕様は、温度係数が 0.3 ppm/K、ノイズレベルが 0.06 ppm (20 Vレンジ、10 PLC)である。これらを恒温槽に入れて温度コントロールすることで、1 ppm 以下の電流制御を行うことができる。

また、アナログおよびデジタル制御用 DCCT の他に、制御とは回路系が独立したモニター専用の DCCT (M)を N 側に備える。これらはあらかじめ、電源外部に設けた基準 DCCT と共に出力電流を比較計測し、基準 DCCT と同様に正しく電流を計測できるよう校正してある。

このようにして開発したデジタル帰還制御の試験結果を Fig. 13 に示す。この試験では主回路に KEKB 中型電磁石電源 (500 A, 15 V) を使用し、24 ビット制御基板には Fig. 7 の B タイプのものを使用し、電源出力電流と DAC へ入力する電流指令値をおよそ 2 時間にわたって計測した。比較のため、最初の 1 時間はデジタル帰還制御を無効にし、その後から有効にしてある。デジタル

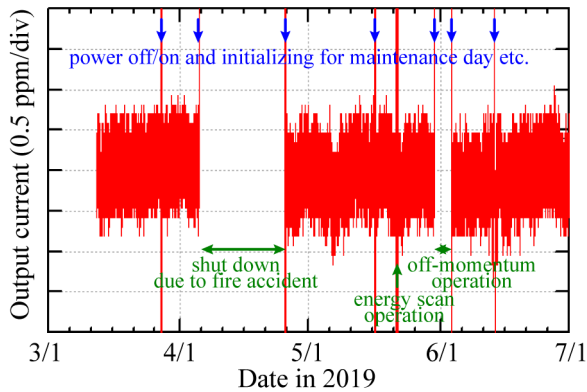


Fig. 14. B2E 全周主偏向電磁石大型電源（定格 860 A、1100 V、運転電流値 618 A）の出力電流安定度。赤点の測定データを緑線をつないで表示した。青矢印が停止や再立ち上げなどしたタイミングを示す。桃色矢印の期間は、運転停止や運転電流値を変えて運転した期間。全期間にわたって 2 ppm の安定度が得られた。

帰還制御が無効の場合には、電流指令値が一定であって、出力電流がドリフトする様子が見られる。一旦、デジタル帰還制御を有効にすると、出力電流のずれを高精度に検出して、60 秒毎に 24 ビットの分解能で電流指令値を補正し、その結果として出力電流の変動が 1 ppm（標準偏差 0.16 ppm）に抑えられていることが分かる。

なお実機の製作にあたっては、QCS 超伝導主四極電磁石電源は Fig. 12 の通りであるが、全周主偏向電磁石大型電源およびウィグラー電磁石大型電源については、整流器に IGBT を用いているため遅い周波数のコモン・モード成分が十分小さいことが期待できたので、DCCT (P) を省略し、DCCT(N)だけでアナログ制御ループを構成した。

こうして開発した高安定度電磁石電源の例として、全周主偏向電磁石大型電源の出力電流をおよそ 3 カ月間にわたり測定した結果を Fig. 14 に示す。この期間には、2 週間ごとの加速器メンテナンス日（当日朝に電源を下ろし、夕方再立ち上げて、0 A から定格電流 860 A まで上げる初期化運転を 5 回繰り返した後に、運転電流値 618 A で運転する）や、入射器棟火災による加速器運転停止（4/11–4/22）、ビームエネルギーをずらした衝突実験に応じて運転電流値を変えた期間（5/21、

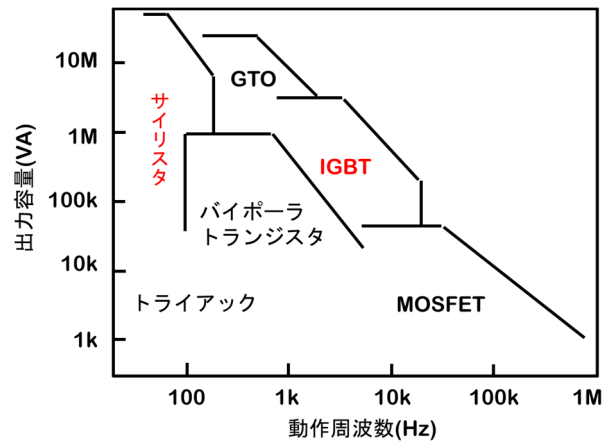


Fig. 15. 各種スイッチング素子の動作領域

5/30–6/3) を含む。これら再立ち上げ前後でも出力電流値の再現性が良く、全期間にわたって 2 ppm の安定度が得られた。

3.2.3 低リップル電源の開発

電流リップルは、安定度と同様にビームの質を左右する。Fig. 15 に各種スイッチング素子の典型的な動作領域を示すが、素子の性能向上によって動作領域が拡大され、従来から電磁石電源に使用されてきたサイリスタが、近年では IGBT や MOS-FET に置き換えられてきた。そのスイッチング動作による高調波ノイズやリップルの理解が重要であると認識されつつあって、コモン・モードとノーマル・モードとの結合や配線の対称化などと話題になっている。

ところで、電磁石とビームの間にはビームダクトがある。ビームダクトの材質は、加速器の種類によって適切に選択される。例えば、J-PARC RCS は、25 Hz の速い繰り返しのシンクロトロンなので、時間的に変化する磁場に応答できるようにセラミックダクトが採用された。また、2 秒程度かけてゆっくりと磁場を上げ、加速する J-PARC MR では、ステンレスが採用された。一方、SuperKEKB 加速器では、磁場は一定でよいが、むしろ放射光によるダクトの発熱、二次電子やガスの放出を小さくする必要から、銅あるいはアルミが採用されている。

電磁石電源の電流リップルによって生じる磁場リップルは、ビームダクトによって減衰される

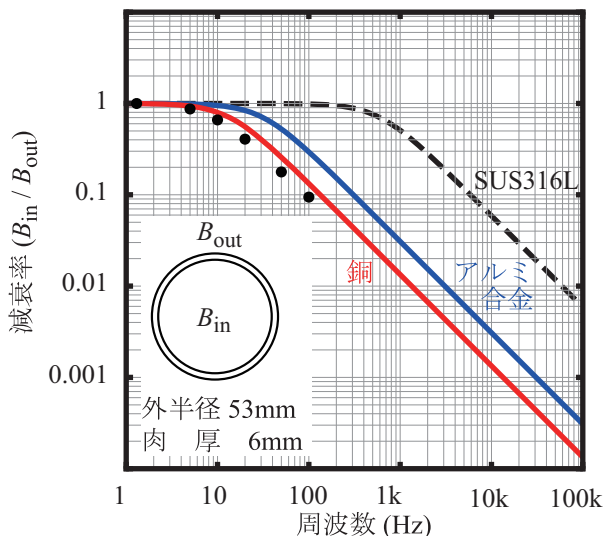


Fig. 16. ビームダクトによる磁場リップルの減衰率。ダクト内外の磁場の比である減衰率は、 $1/\sqrt{1+(\mu_0\pi fbt/\rho)^2}$ に従う [13]。 μ_0 : 真空の透磁率、 f : 周波数、 b : 外半径、 t : 肉厚、 ρ : 体積抵抗率。形状は、KEKB 陽電子リングのウィグラー電磁石部ダクトを想定した。黒丸は実測値（銅ダクト）。

が、減衰の程度はダクトの材質と形状で定まる。Fig. 16 は、銅、アルミ、ステンレスの同一形状のダクトにおける、磁場リップルの減衰率を比較したものである。ダクトの材質が銅やアルミの場合には減衰の効果が大きいので、電流リップルに対する要請はそれほど厳しくなくて済む。ステンレスダクトの KEK PS では、ダクトの渦電流でクロマティシティの変化が生じたが [14]、KEKB 加速器では、電流リップルでビームの性能が制限された経験はないとのことである。

しかしながら、ビームに対する影響が小さいからと言って、電流リップルやスイッチングによって生じるノイズに注意しなくていいというわけではない。電磁石電源の周囲には、制御システムなど電磁ノイズの影響に敏感な機器や、数十年間使用されてきた遮断器など高調波許容電圧の低い機器が共存するので、受電側と出力側の双方にノイズや高調波電圧を発生することがあってはならない。一般に電磁石システムは、静電容量を介して大地や他のケーブルなどと結合し、閉じた

系になっていない。このため、交流側と直流側の双方にノイズをまき散らし、外部機器に影響を与えてしまう。例えば、PF-AR の偏向電磁石電源では、交流側のサージアブソーバーを損壊するトラブルが報告されている [15]。

SuperKEKB 加速器で新規に製作した電源では、リップルとノイズを低減するために、接地に対して対称な回路構成とし、コモン・モードとノーマル・モードとの結合を解いて、それぞれのパッシブ・フィルタが十分機能するよう注意して設計した。

そのような低リップル化の設計例として、QCS 超伝導主四極電磁石電源を挙げる。まず負荷である QCS 超伝導主四極電磁石のインピーダンス測定例 (QC1LP を NF FRA 5097 で測定) を Fig. 17 に示す。このように、制御帯域である 10 kHz 以下の帯域では、ノーマル・モード・インピーダンスの大きさが数十 Ω 以下と小さく、スイッチング周波数の帯域である 10 kHz 以上の帯域では、対地容量によりコモン・モード・インピーダンスが数百 Ω 以下と小さいことが分かる。さらに、QCS 超伝導電磁石が設置されるビーム衝突部のビームパイプは Belle II 検出器 [16] へのバックグラウンドを下げるためにタングステンでできており [17]、銅やアルミ製ビームパイプで期待できるような交流磁場の減衰 [13, 18] が小さい。このように負荷のインピーダンスが小さく、ビームパイプの渦電流による磁場減衰が期待できないので、電源の低リップル化が本質的であり、工夫が必要になる。そこで、3つの事柄に注意して設計を行った。すなわち、(1) ノーマル・モード/コモン・モードを区別して電流検出する、(2) 主回路やフィルタを接地に対して対称な構成とする、(3) 高周波トランスの 1 次-2 次間浮遊容量を低減するためのシールドを行う。このようにして開発した電源の回路図と写真を Fig. 18 および Fig. 19 にそれぞれ示す。DCCT は Fig. 12 の通り合計 4 台設置してある。主回路接地端子 E は QCS 超伝導電磁石を納めるクライオスタットに専用の接地線で接続してある。この E に対して P 側と N 側が対称な回路構成になるよう、フィルタや単位電源

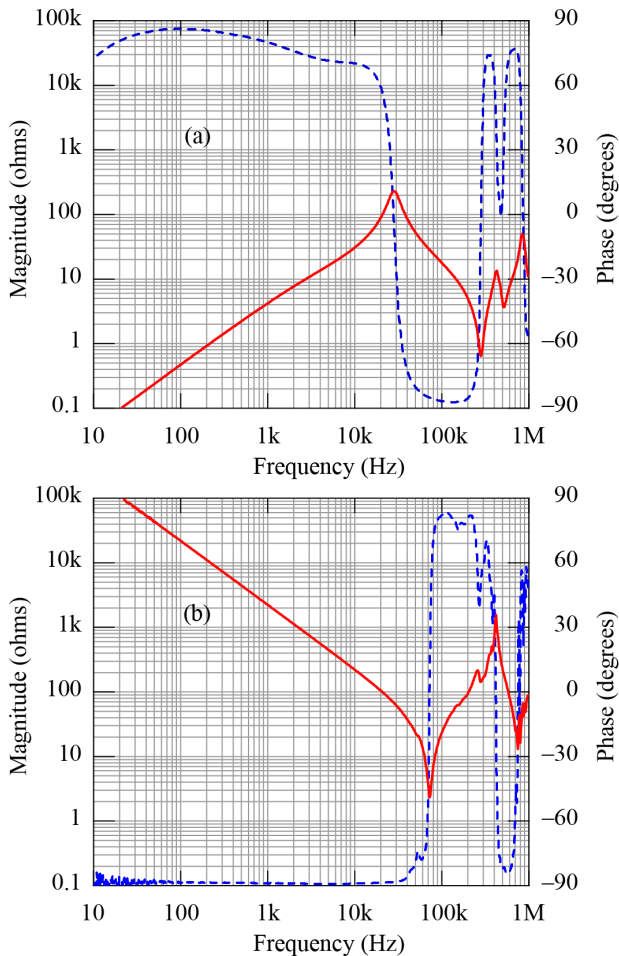


Fig. 17. QC1LP 超伝導主四極電磁石インピーダンス測定結果。インピーダンスの絶対値（実線）と位相（破線）を、(a) ノーマル・モードと(b) コモン・モードについて示す。

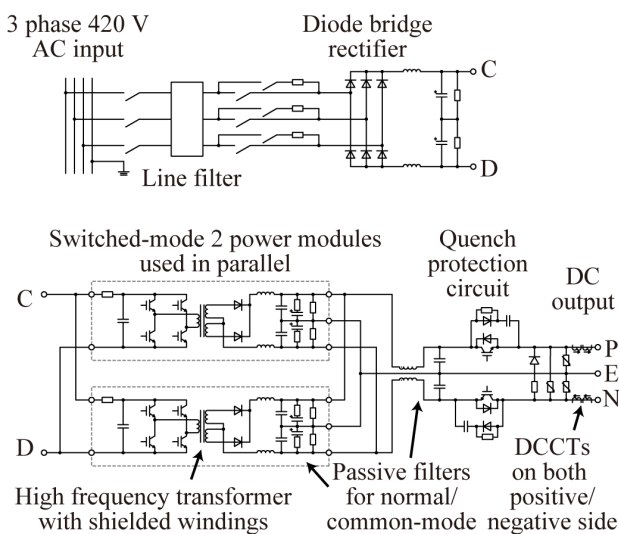


Fig. 18. QCS 超伝導主四極電磁石電源の概略主回路図

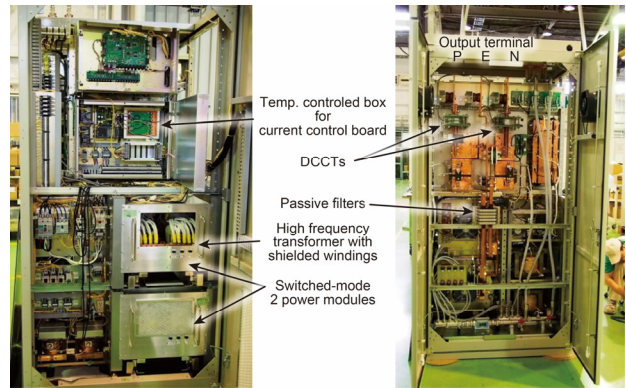


Fig. 19. QCS 超伝導主四極電磁石電源の写真。前面（左）と背面（右）の扉を開けたところ。単位電源、パッシブ・フィルター、DCCTが、それぞれ接地に対して正極側と負極側に対称になるよう配置してある。

モジュールを設けてある。単位電源モジュール内の高周波トランスにはシールドを設け、シールドは E 端子に接続してある。

このようにして開発した電源で、QC1LP 超伝導主四極電磁石を 1800 A で励磁したときの、ノーマル・モード電流リップル測定結果を Fig. 20 に示す。試験では PN 間の電圧リップルを小野測器 CF-7200A FFT アナライザおよび LeCroy 44MXi オシロスコープで測定し、QC1LP 超伝導主四極電磁石のノーマル・モード・インピーダンス (Fig. 17 (a)) で割って電流リップルを得た。制御帯域である 10 kHz 以下の成分の自乗平均和は 1.08 ppm (rms)、19 kHz のスイッチング成分は 0.09 ppm (rms)、より高次の高調波成分も最大で 0.52 ppm (rms) となっており、期待通り低い値になった。スイッチング成分と、その高調波成分については、ノーマル・モードだけでなく、コモン・モードについても計測した。試験は LeCroy 44MXi オシロスコープで PE 間と NE 間の出力端電圧を測り、その和の値からコモン・モード電圧リップルを得て、コモン・モード・インピーダンスで割って電流リップルを得た。結果は最大で 57 kHz、0.46 ppm (rms) と十分小さな値であった。

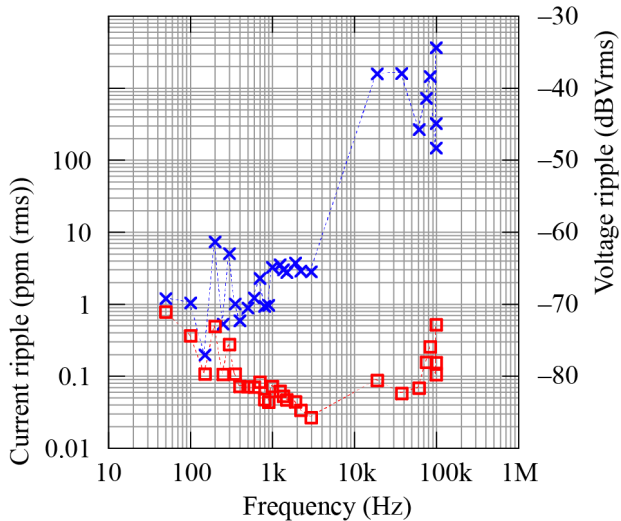


Fig. 20. QC1LP 超伝導主四極電磁石を 1800 A で励磁したときの、ノーマル・モード電流リップル測定結果。測定した電圧リップル (×) を、Fig. 17 (a)に示す負荷インピーダンスで割って、電流リップル (□) を得た。スイッチング周波数は 19 kHz。



Fig. 21. D5 電源棟に設置したウィグラー電磁石大型電源と屋外機器

3.3 電源の製作

新たに SuperKEKB 用に設計製作した電磁石電源は Table 1 に挙げたが、これらについて順に紹介する。

3.3.1 全周主偏向電磁石大型電源、ウィグラー電磁石大型電源

全周主偏向電磁石大型電源 (860 A, 1100 V)、および、ウィグラー電磁石大型電源 (800–1400 A, 350–750 V) は、いずれも 6.6 kV 受電、変圧器降圧、IGBT スwitching 整流、IGBT スwitching PWM 制御の電源である。Fig. 5 の A タイプに示す 24 ビット制御基板とデジタル帰還制御を用いて電流安定度 2 ppm/日を目指した[19]。D5 電源棟に設置したウィグラー電磁石大型電源と、その屋外機器を Fig. 21 に示す。

3.3.2 QCS 超伝導電磁石電源

QCS 超伝導主四極電磁石電源 (2000 A, 15 V) は、420 V 受電、ダイオード整流、IGBT スwitching PWM 制御の電源である。Fig. 5 の B タイプに示す 24 ビット制御基板とデジタル帰還制御を用いている。これも電流安定度の仕様が 2 ppm/日と厳しく、しかも負荷のインダクタンスが 0.9–13.3 mH と小さいので如何にリップルを小さくするかが課題であった。そのため、まずフルスケールのプロトタイプを先行して製作[20, 21]し、3.2 で紹介したような開発を行ってから実機を量産した。

QCS 超伝導補正電磁石電源 (70 A, 10 V) は、210 V 受電、MOS-FET スwitching PWM 制御の両極性電源である。出力電流安定度に対する仕様は 5 ppm/日と比較的厳しく、やはりプロトタイプを製作[22]してから量産した。プロトタイプでは、ノーマル・モードをコモン・モードと区別して検出できるように、QCS 超伝導主四極電磁石電源と同様に DCCT を制御用に 2 台使用し、それらの出力を加算して平均を取るようにした。しかし、補正電源は定格電流が 70 A と小さくて出力ケーブルが細く、DCCT の最大入力電流値にも余裕があったので、コモン・モードを打ち消して

ノーマル・モードのみを検出できるように、P側の出力ケーブルと、N側の出力ケーブルを1台のDCCTに通すことができ、1台のDCCTでノーマル・モードの検出ができるのではないかと考えた。比較試験の結果、謙遜が無いことが確認でき、Fig. 22に示すように量産機でその方式を採用した。補正電磁石電源は予備2台を含めて45台と多いので、高価なDCCTの使用数を減らすことで大幅なコストダウンができた。

QCS超伝導ソレノイド電源は、420V受電、ダイオード整流、IGBTスイッチングPWM制御の電源である。Belle II超伝導ソレノイド[23]がビーム軸上に発生させる磁場を積分値としてゼロに補償するためのものである。出力電流安定度に対する仕様が5 ppm/8時間と比較的厳しいことに加えて、ソレノイド・コイル両端の間に設けた中間タップで区分される2つのコイルを独立に制御できるような3端子出力の電源となっている[24]。

これらQCS超伝導電磁石電源はD2電源棟に設置した。その様子をFig. 23に示す。

3.3.3 中型電源

中型電源は、420V受電、ダイオード整流、IGBTスイッチングPWM制御の電源である。KEKB加速器の中型電源と要求仕様は変わらないので、およそ同じ回路構成である。ただし、(1)従来使われてきた16ビットDACに変えて、近年採用が増えた20ビットDACを使用した、(2)リップルとノイズを低減するために、電源筐体と電源を収めるラックを絶縁し、電源は交流入力側と直流出力側にそれぞれ独立した接地極を設け、接地に対して対称な回路構成とし、コモン・モードとノーマル・モードとの結合を解いて、それぞれのパッシブ・フィルターが十分機能するよう注意して設計した。なお、新規に製作した中型電源は93台であるが、その7割は、大幅に光学系を改造した衝突点近傍筑波直線部の電磁石電源として配置した。

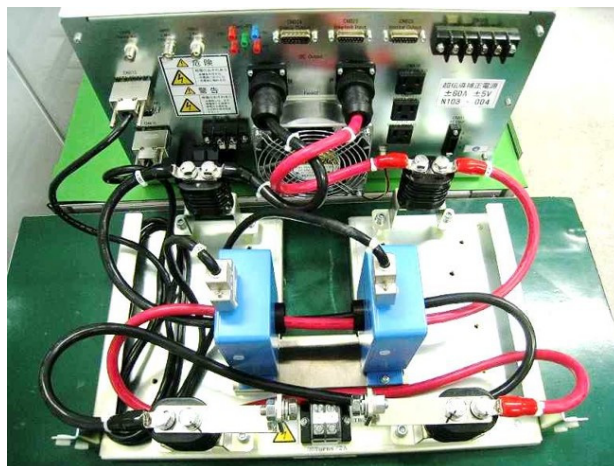


Fig. 22. QCS超伝導補正電磁石電源量産機の制御用とモニター用各1台ずつのDCCT(青色)。DCCTにP側出力端子から負荷へ向かうケーブル(赤)と、負荷からN側出力端子へ戻るケーブル(黒)を、コモン・モードを打ち消すように通すと、1台でノーマル・モードを検出できる。なお、直流値は2倍になる。

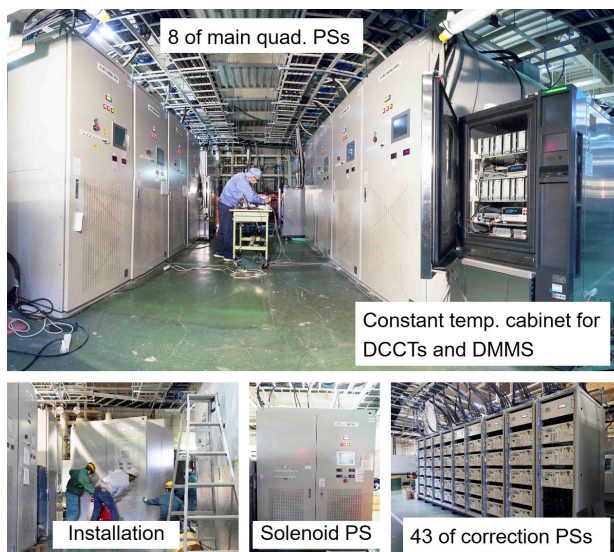


Fig. 23. D2電源棟に設置したQCS超伝導電磁石電源

3.3.4 小型電源

小型電源は、210V受電、MOS-FETスイッチングPWM制御の両極性電源である。KEKB加速器の小型電源と要求仕様は変わらないので、これもおよそ同じ回路構成である。

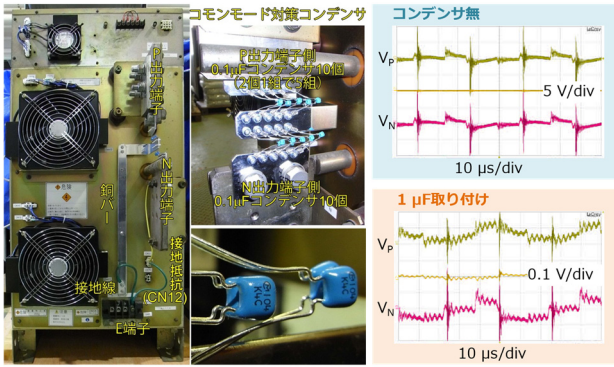


Fig. 24. 中型電源出力部に追加したコモン・モード・フィルター用コンデンサー。19 kHz のスイッチングによるコモン・モード電圧が 1/50 程度に小さくなった。

3.4 オーバーホール

KEKB 加速器で使用してきた電磁石電源システムの構成要素の内、多くのものを SuperKEKB 加速器でも再利用している。ここでは KEKB から SuperKEKB への改造時に実施したオーバーホールについて紹介する。

3.4.1 電磁石電源

全周主四極電磁石大型電源 (LER 用 7 台、HER 用 7 台)、および、日光/大穂直線部四極電磁石大型電源 (LER 用 2 台、HER 用 2 台) は、ベータトロン振動数をより精度よく調整できるように、電流設定分解能を従来の 16 あるいは 18 ビットから、20 ビットに高める改造を行った。また、電流モニター出力にノイズが乗る既知の問題があったので、電源盤内の配線取り回しを変更して解決した。さらに、電源盤と床との間に絶縁板を挟み、また、冷却水配管も母管との間に絶縁カラーを挟むことで、多点接地にならずに接地線だけで接地が取れるように改修した。

中型電源 (BBA 電源を含めて計 334 台) は、KEKB 加速器での故障履歴や耐用年数を考慮して、実に多くの回路部品を交換した。交換した部品は、各種制御用 AC-DC コンバーター、電解コンデンサー、可変抵抗器、恒温槽用ペルチェ素子、漏電遮断器、電磁開閉器、IGBT モジュールなどである。これらの部品を交換し、錆落としを含む内部清掃を行い、通電試験による動作確認とイン

ターロック閾値の調整を行った。また、電源出力端には、リード・インダクタンスに注意をしながら、Fig. 24 に示すようにコモン・モード・フィルターとしてセラミック・コンデンサーを追加した。また、電源を収めるラックが床に直置きであったので、ラックと床との間に絶縁板を挟み、接地線で接地が取れるように改修した。

小型電源は台数が多く、オーバーホールできたのは予算の都合で全体の 14% に過ぎない。このため予備機の健全性を確認するためのテスト・ベンチを構築し、故障した際に予備機と交換できるようにしている。

3.4.2 インターロック統合システム、電流モニター盤

インターロック統合システムは、KEKB 加速器では Modicon 社製プログラマブル・ロジック・コントローラー (PLC) を使用してきたが、機器の老朽化に伴い、横河電機 FA-M3 の PLC へ更新した。

電流モニター盤に使用している Keithley Model 2002 デジタル・マルチメーターと Model 7001 スイッチ・システムは、メーカーでオーバーホールを実施し、電解コンデンサーなどの交換と校正作業を行った。

3.4.3 BBA リレー盤

ビームベースド・アライメントに使用する BBA リレー盤は、内蔵するパワー・リレーの交換を行った。

3.4.4 電源移設、ケーブル作業

光学系改造に伴う、電源の配置変更作業、および、電力ケーブル撤去と敷設を行った。特に衝突点のある筑波直線部のケーブルは一切をいったん撤去し、総延長 50 km 以上のケーブルを敷設しなおした。その様子を Fig. 25 に示す。また、QCS 超伝導電磁石用には、衝突点の左右それぞれに、主四極電磁石用 NH-CE 2C×200 sq が約 30 本、接地線 EM-CE 1C×100 sq が数本、補正電磁石用 NH-CET 60 sq が約 20 本、その他信号線 20 本からなるケーブルを、地上の電源棟から衝突点

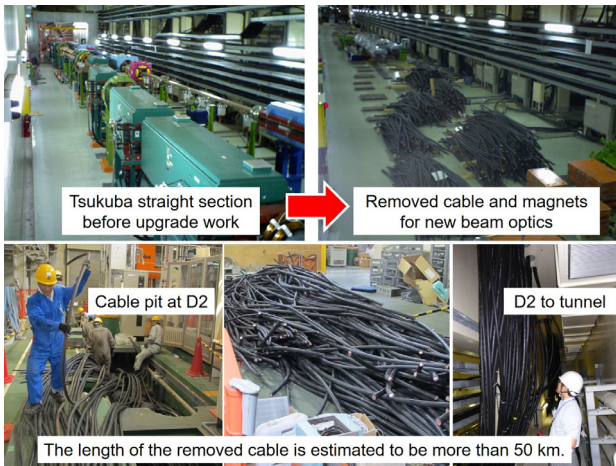


Fig. 25. 筑波直線部と D2 電源棟でのケーブル撤去の様子



Fig. 26. D11 電源棟受電設備の分電盤。8つの各電源棟で 279 個の遮断機を更新した。

の QCS 超伝導電磁石が設置されたコンクリート製架橋下まで敷設し、架橋に貫通孔をあけて通したホローコンダクターへ接続した。

3.4.5 電源棟改修

電源棟でも多くの改修を行った。受電設備の分電盤に備わる漏電遮断器や配線用遮断器は、老朽化による誤動作を防ぐため、また、一部の古い 420 V 定格の漏電遮断器の高周波許容電圧は、数 kHz で数 V 程度と低いことから、ほとんどを更新した。例として D11 電源棟の分電盤を Fig. 26 に示す。また、D2 電源棟では、電源数増加に対応できるよう、受電設備を増強し、棟内温度を下げるために外気導入システムを設置し、ケーブル・ピット内温度を下げるために一部のピット蓋を鉄板

からエキスパンド・メタルの蓋に変更した。また、小電源棟も電源設置スペースが逼迫していたので増築した。

3.4.6 遠隔操作システム

遠隔操作システムでは、新規製作電源による電流制御高分解能化に対応した制御系の改修を行った。これに伴い、電源側インターフェースであるアークネット・ボードを、新規に設計製作した上位互換のものに順次更新している。

4. 運転と維持管理

SuperKEKB 加速器への改造を終え、現在では段階的にビーム・コミッショニングを進めている [25]。試験運転を 2016 年 2 月から 6 月まで行ってビーム周回を確認し、ビームが衝突しない状態で各リングのビーム光学系の基本性能を確認し、ビームが放出する放射光によってビームパイプからのガス放出率を下げるためのいわゆる焼きだし運転などを行い (Phase 1)、筑波実験棟にある衝突点に QCS 超伝導電磁石と Belle II 検出器を導入して、ビーム衝突運転を 2018 年 3 月から 7 月まで行った (Phase 2)。その後、Belle II 検出器への崩壊点検出器の導入と、ビームコリメーターの増強など設計ルミノシティを目指した作業を行い、2019 年 3 月から本格的なビーム衝突運転および物理実験 (Phase 3) を進めている。

これら加速器運転期間中には、電磁石電源システムの安定な運転継続が要求される。ひとたび故障が発生すれば、即座に原因を調査して修理し、復旧させる必要がある。比較的時間をかけて保守作業ができるのは、およそ 2 週間に一度あるメンテナンス日の半日だけである。その日の朝には、電磁石電源だけでなく、各グループによる保守作業も行うために、電磁石電源を立下げ、日中に作業を行い、夕方には初期化運転を経て立上げる。

夏と冬のシャットダウン期間には、定期的な保守作業と、運転中に対処療法しかできなかった問題の解決を行う。定期的な保守作業の概要は次のとおりである。

(1) 電源：エアフィルター交換、盤内清掃、目視点検、締付確認、インターロック閾値調整、通電試験、インターロック動作確認などを行う。必要があれば、空冷ファン動作点検、制御電圧の確認、ゲート波形の確認なども行う。点検周期は全周主偏向電磁石大型電源およびウィグラー電磁石大型電源は、SuperKEKB 加速器のために新規に製作した新しい電源なので2年に1回実施。KEKB 加速器からの再利用電源である全周主四極電磁石大型電源は毎年実施。中型電源は台数が多く、予算が限られているので毎年全数の1/3 ずつ実施。寿命が5年程度の空冷ファンや機器のバッテリーなどは計画的に交換する。また経年変化で電流指令値とモニター値の偏差が大きくなってきた電源については、基準としているDCCT を使用して校正作業を行う。

(2) 屋外機器：6.6 kV 受電の全周主偏向電磁石大型電源およびウィグラー電磁石大型電源では、高圧受電盤と変圧器からなる屋外機器があるので、毎年これらの機器の点検を行う。変圧器は絶縁油の化学分析を行い、経年変化を注視する。

(3) インターロック統合システム：入出力モジュールの点検を行い、試験として電磁石冷却水流量スイッチを作動させ、インターロック統合システムの動作確認をサンプリングで行う。PLC のラダー・プログラムとデバイス・データのバックアップを適宜行う。電源棟間を通信する光ケーブルの劣化程度を判定するために光量測定を行う。

また、運転中に対処療法しかできなかった問題の対応として、シャットダウン期間に実施した例を4つ挙げる。

(1) ケーブル地絡：運転期間中、QLA2LE 電源が通電中に出力地絡のインターロックで保護停止する問題が起きた。調査の結果、N 側出力ケーブル2本中1本が地絡していることが判明。Murray loop 法で地絡位置を探查したところ、全長250 m のうち電源側から30 m ±10 m 程度の範囲、およそ電源棟のケーブル・ピットのあたりと見積もれた。運転期間中には修復は困難であったことと、幸い運転電流値がケーブル1本の許容電流値を下回っていたので、1本で通電を継続



Fig.27. QLA2LE ケーブル地絡箇所調査の様子

することにした。シャットダウン中に、調査結果をもとにケーブルが錯綜するピット内を探索して、地絡箇所を発見した。Fig. 27 に示すように電源棟から加速器トンネルへの貫通孔鉄管の縁にケーブルが押し付けられることで被覆が損傷し、地絡していたことが分かったので、ケーブルを張り替える作業を実施した。他の同様な個所が無いのか、各電源棟ピット内貫通孔のケーブル敷設状況を点検した。

(2) 受電電圧変動時の保護停止：D11 ウィグラー電磁石大型電源が時折、IGBT 整流器への交流入力過電流のインターロックで保護停止してしまう問題があった。調査の結果、施設変電所の進相コンデンサーが自動制御で入り切りされたり、RF システムのクローバーが動作したりすることによって、受電電圧が変動し、その際に電源のIGBT 整流器がチョッパユニットへの出力直流電圧を一定に保とうと制御して、整流器への入力電流が保護閾値を超えてしまうという現象で理解できた。これを免れるために、交流入力部にリアクトルを追加する作業を行ったところ、こうした問題は起きなくなった。

(3) 電流指令値変更時のオーバーシュート：デジタル帰還制御を行っている電源で、ある電流値から別の値へ電流指令値を変更した際に、出力がオーバーシュートする問題があった。デジタル帰還制御は1分ごとに補正をかける遅い制御なので、本来はこうしたことが起きないように、電流指令値を変えて電流掃引する際には、自動的に帰還制御を止めて、直前まで格納している補正量で補正を継続し、掃引が完了して、デジタル帰還制御用の電流計測値が落ち着いてから、リアルタイ

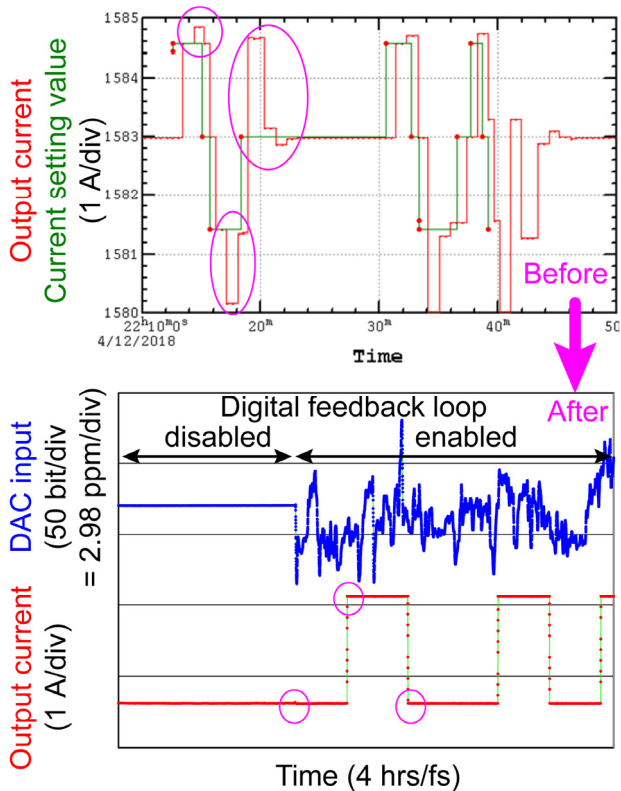


Fig. 28. QC1LE 超伝導主四極電磁石電源で電流指令値を変えた時の応答。改修前（上）には、電流指令値（緑）を変えると出力電流（赤）がオーバー/アンダーシュートした。改修後（下）には、デジタル帰還制御を無効から有効に切り替えるときも含めて、そうしたことなくなくなっていることがわかる。

ムの補正を再開するように設計してあった。ところが制御プログラムにバグがあり、掃引中の補正量を、直前まで使っていた補正量ではなく、単にゼロにしてしまっていたことが調査の結果わかった。このバグを修正して、Fig. 28 に示すように問題を解決した。

(4) QCS 超伝導主四極電磁石電源の受電変動による出力変動：受電電圧が数 V 変動するのに応じて、出力電流が数 ppm 程度変動してしまう問題があった。その例として、Fig. 29 に QC2RE 超伝導主四極電磁石電源の出力電流が受電電圧の影響を受けていることを示す。QCS 超伝導主四極電磁石電源は Fig. 18 に示すように整流器にダイオードを用いており、整流器出力部の直流電圧の変動に影響を受けていることが分かった。一方、

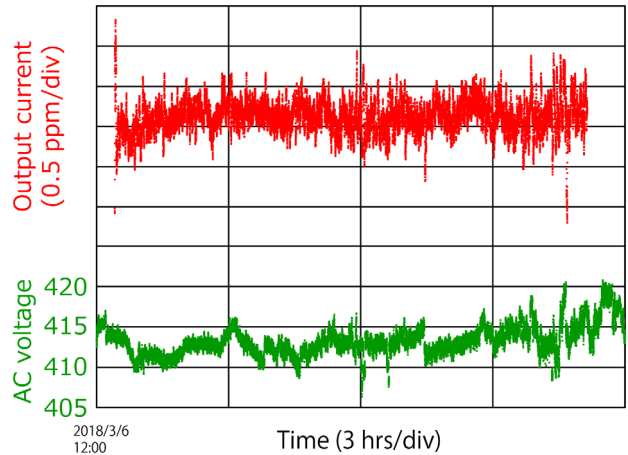


Fig. 29. QC2RE 超伝導主四極電磁石電源の出力電流（赤）と受電電圧（緑）。受電電圧が施設変電所の進相コンデンサの動作や所外電気炉工場の運転によって変動すると、出力電流が影響を受ける。

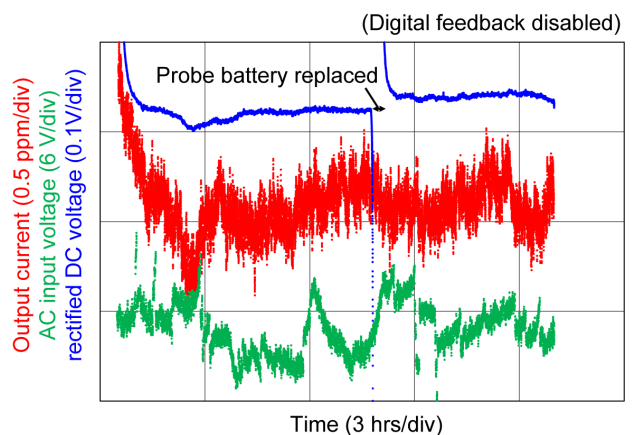


Fig. 30. QC1LP 超伝導主四極電磁石電源で行った、直流安定化電源でダイオード整流器を置き換えた時の試験結果。出力電流に受電電圧の影響は見られない。なお、試験開始直後にドリフトが見られるのは、デジタル帰還制御を無効にしてあるため。

IGBT 整流器を用いた全周主偏向電磁石大型電源およびウィグラー電磁石大型電源ではそうした問題は起きておらず、それを参考に、市販の直流安定化電源をダイオード整流器に置き換えて試験した。その結果、Fig. 30 に示すように改善が期待できることがわかったので、改造作業を計画している。

5. おわりに

磁場の質はビーム性能の要であり、したがって電磁石電源は加速器構成要素の中でも最も重要な要素の一つである。世界に類を見ないピーク・ルミノシティを目指す SuperKEKB 加速器では、電磁石電源の開発はもちろん、安定な運転を継続するための高度な維持管理が要求される。どの装置でも同様だろうが、特に電磁石電源では台数が他と比べて多いことから、定期的な保守作業だけでなく、多種多量の予備品の分類整理や、故障記録の更新などシステムティックな維持管理が必要である。故障した際に如何に早く復帰できるかは、異常時の現象の記録が鍵になるので、故障記録データベースが陳腐化しないよう継続的に更新してゆく。また、普段の様子をよく観察し、如何に普段と違うことに気づけるかが重要になる。もちろん各種インターロックによって状態監視はされているものの、例えば小型電源用ラック・ファンに異常な発熱がないか、サーモ・ビューワーで定期的に調べたり、台風時に電源棟の雨漏り状況を逐次調べたり、そうした地道で綿密な状態監視によって、いつもと違うことに気づき、故障を未然に防ぐことができる。

このようにして今後も機器の安定な動作を維持してゆくと共に、これまで予算と時間の都合で省略した機器の更新を順次進めることで更なる信頼性を向上する。例えば今回、1997 年製の 334 台の中型電源をオーバーホールして SuperKEKB 加速器に再利用するが、電解コンデンサーや AC-DC コンバーターは交換したものの、制御基盤の予備はなく FPGA の書き換えもできない状況である。14 台ある全周主四極電磁石大型電源は、曲線部の主四極電磁石を励磁する重要な役割を担っているが、製作から 20 年が経過しており、更新を視野に入れた開発が必要である。

そうした更新のための開発のほかに、性能向上を目指す開発も進める。例として今回は時間の都合で省いたが、デザリング・システム[26-28]が挙げられる。SuperKEKB 加速器では衝突点でのビームサイズが絞られることにより衝突保持がより困難になることから、軌道保持帰還制御システ

ムとして、従来の iBump システム[29]に加えて、新たにデザリング・システム（水平方向）と、速い iBump システム（垂直方向）[30]を導入している。特にデザリング・システムは、今後ビームサイズを設計値に向けて絞り込んでいくにつれて重要な役割を担うことになる。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi, et al.: "Accelerator design at SuperKEKB," *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2013 03A011 (2013); <https://doi.org/10.1093/ptep/pts083>
- [2] T. Oki, et al.: "High-stability magnet power supplies for SuperKEKB," in: *Proceedings of the 13th meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji (2016)*. 大木俊征 ほか: 「SuperKEKB 用高安定度電磁石電源」、第 13 回日本加速器学会年会講演概要集 (2016)
- [3] T. Oki, et al.: "High-stability magnet power supplies for SuperKEKB," in: *Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference, IPAC'17, Copenhagen, Denmark (2017)* p. 3391-3393; <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2017-WEPVA057>
- [4] T. Oki, et al.: "Magnet Power Supplies for SuperKEKB," *TEION KOGAKU (J. Cryo. Super. Soc. Jpn.)*, Vol. 53, No. 3, p. 146-153 (2018). 大木俊征、中村衆、"SuperKEKB 電磁石電源"、*低温工学*、2018、53 巻、3 号、p. 146-153; <https://doi.org/10.2221/jcsj.53.146>
- [5] N. Ohuchi, et al.: "Design of the superconducting magnet system for the SuperKEKB interaction region," in *Proc., NA-PAC'13, Pasadena, California, USA, 2013*, p. 759.
- [6] B. Parker, et al.: "Superconducting corrector IR magnet production for SuperKEKB," in: *Proc. NA-PAC'13, Pasadena, California, USA, 2013*, p. 1241.
- [7] H. Yamaoka, et al.: "Solenoid field calculation of the SuperKEKB interaction region," in: *Proceedings of the 3rd International Particle Accelerator Conference, IPAC'12, New Orleans, USA (2012)*, p. 3548-3550; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2012/papers/thppd023.pdf>
- [8] T. Abe, et al.: "Achievements of KEKB," *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2013 03A001 (2013); <https://doi.org/10.1093/ptep/pts102>

- [9] T. Abe, et al.: "Commissioning of KEKB," *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2013 03A010 (2013); <https://doi.org/10.1093/ptep/pts101>
- [10] H. Takebe: "Development and installation of high resolution power supply for spring-8 steering magnet," in: *Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Tosu, Japan (2005) p. 591-593; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2_lam30/Proceedings/21P028.pdf
- [11] 武部英樹、「高分解能電磁石電源と電源制御手法の考察」、第9回加速器電源シンポジウム、Spring8, (2008)
- [12] AD5791 data sheet; <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5791.pdf>
- [13] A.W. Chao and M. Tigner, Editors, *Handbook of Accelerator Physics and Engineering*, Second printing, World Scientific, Singapore (1998), p. 264.
- [14] 外山毅:「主リング偏向電磁石中の真空パイプの渦電流の効果」、KEK PS 加速器報告書 SR-474 (1999).
- [15] 尾崎俊幸ほか:「PF-AR 偏向電磁石電源の更新」第4回 加速器学会年会 (2007).
- [16] Belle II Technical Design Report, KEK Report 2010-1 (2010); <http://www-superkekb.kek.jp/documents/B2TDR.pdf>
- [17] H. Nakayama, et al.: "SuperKEKB Background Simulations, Including Issues for Detector Shielding: " in: *Proceedings of the 55th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High Luminosity Circular e+e- Colliders - Higgs Factory*, HF2014, Beijing, China (2014) p. 110-113; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/HF2014/papers/frt3a1.pdf>
- [18] T. Oki, et al.: "Measurement of current ripple across KEKB main-ring magnets," in: *Proceedings of the 7th meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Himeji (2010). 大木俊征 ほか:「KEKB 加速器における電磁石励磁電流リップルの分布測定」、第7回日本加速器学会年会講演概要集 (2010); http://www.pasj.jp/dai7kainenkai/proceedings/P_4PM/P_EH_4PM/WEPS079.pdf
- [19] T. Oki, et al.: "Development status of magnet power supplies for the SuperKEKB," in: *Proceedings of the 9th meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Osaka (2012), p. 474-477. 大木俊征 ほか:「SuperKEKB 用電磁石電源の開発状況」、第9回日本加速器学会年会講演概要集 (2012)、p. 474-477; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/WEPS/WEPS043.pdf
- [20] T. Oki, et al.: "Full-scale prototype power supply for superKEKB final focus superconducting magnets", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 26, Issue 4, 2016; <http://ieeexplore.ieee.org/document/7394134/>
- [21] T. Oki, et al.: "High-stability magnet power supplies for SuperKEKB," in: *Proceedings of the 13th meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Chiba (2016). 大木俊征 ほか:「SuperKEKB 用高安定度電磁石電源」、第13回日本加速器学会年会講演概要集 (2016); http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/TUOL/TUOL08_oral.pdf
- [22] T. Oki, et al.: "Prototype Power Supply for SuperKEKB Final Focus Superconducting Corrector Magnets," in: *Proceedings of the 7th International Particle Accelerator Conference, IPAC'16*, Busan, Korea (2016) p. 3537-3539; <http://dx.doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2016-THPMW003>
- [23] Y. Makida, et al.: "Development of a Superconducting Solenoid Magnet System for the B-Factory Detector (BELLE)," in: Kittel P. (eds) *Advances in Cryogenic Engineering. Advances in Cryogenic Engineering*, vol 43. Springer, Boston, MA (1998) p. 221-228; https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9047-4_25
- [24] T. Oki, et al.: "Development of SuperKEKB superconducting magnet power supply -current control for positive/middle/negative output system-," in: *Proceedings of the 14th meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Sapporo (2017), p. 500-503. 大木俊征 ほか:「SuperKEKB 超伝導電磁石用電源の開発—中点のある系の電流制御方式—」、第14回日本加速器学会年会講演概要集 (2017)、p. 500-503; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/TUP0/TUP066.pdf
- [25] T. Oki: "Phase 3 beam commissioning of SuperKEKB," in: *Proceedings of the european physical society conference on high energy physics, EPS-HEP 2019*, Ghent, Belgium (2019); <http://eps-hep2019.eu>

- [26] 大木俊征ほか：「SuperKEKB における水平方向衝突軌道保持制御システムの実証試験」、第15回日本加速器学会年会 (2018)
- [27] M. Masuzawa, et al.: "Early commissioning of the luminosity dither system for SuperKEKB," in: Proceedings of the 7th international beam instrumentation conference, IBIC2018, Shanghai, China (2018);
<https://doi.org/10.18429/JACoW-IBIC2018-TUPC13>
- [28] Y. Funakoshi et al., "Early Commissioning of the Luminosity Dither System for SuperKEKB", in Proceedings of the 62nd ICFA advanced beam dynamics workshop on high luminosity circular e+e- colliders, eeFACT2018, Hong Kong, China (2018);
<https://doi.org/10.18429/JACoW-eeFACT2018-WEXBA04>
- [29] M. Masuzawa, et al.: "IP orbital feedback for collision tuning at KEKB," in Proceedings of the 7th European Particle Accelerator Conference, EPAC2000, Vienna, Austria (2000);
<https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/e00/PAPERS/TUP4A16.pdf>
- [30] 福間均：「ビーム・ビームキックによる衝突点軌道フィードバックシステム」、OHO2019 テキスト