

# FOUR-DIMENSIONAL POWER SUPPLY SYSTEM FOR SACLA BENDING MAGNETS

Hideki Takebe<sup>1A)</sup>, Toru Hara<sup>A,B)</sup>, Kenji Fukami<sup>B)</sup>, Yutaka Kano<sup>C)</sup>, Yuji Otake<sup>A,B)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo, Hyogo, 679-5148

<sup>B)</sup> JASRI, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo, Hyogo, 679-5198

<sup>C)</sup> SPring-8 Service Co. Ltd, 1-20-5 Kouto, Shingu, Tatsuno, Hyogo, 679-5165

## Abstract

In order to adjust the current of a bunch compressor chicane bending magnet, four-dimensional power supplies (4D-PSs) have been installed in SACLA/SPring-8 in January 2011. We use two types of 4D-PSs, a PWM switching type and a transistor dropper type. We confirmed a stable operation of the 4D-PS with both types, and the required current stability and ripple were achieved. Major and minor characteristics of these two types and difficulties are described in this paper, for example an isolation between PSs, free wheel diode voltage and current capacity of the main PS, current control constant adjustment between main PS and 4D-PSs. The history of 4D-PS development in accelerators are also described.

## SACLA偏向電磁石補正用 4 象限電源の設計と製作

### 1. はじめに

理化学研究所がSPring-8サイト内に建設したX線自由電子レーザー施設、SACLA (SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser) は2011年2月からビーム調整を行い、6月にはレーザー発振を確認した。

熱電子銃から取り出されたビームは、3箇所の磁気バンチ圧縮用シケイン部(BC1, BC2, BC3)で、それぞれの4台の偏向電磁石により、百フェムト秒以下程度にまで圧縮される。このシケイン部と50MeVビームダンプ、光源棟シケイン部、及びビームライン切替用の偏向電磁石(B-MS)には、主励磁用電源の他に微調整用の4象限電源が接続されている。

SPring-8蓄積リングでも、直列に接続した四極電磁石の補正用に同様の4象限電源を使用しているが、SACLAではその経験を踏まえ、シケイン部の4台の偏向電磁石全てに4象限電源を接続し実用に供している。このシケイン部バンチ圧縮器の各偏向電磁石に設置した4象限電源は、下流のエネルギー分散関数を補正するために用い主電流20Aの5%である±1A

で微調するためトランジスタドロップ型を採用した。またビームエネルギーが高い光源棟で使用する4象限電源には、主電流130Aの9%、±12AをIGBTを使ったスイッチング方式を用いて微調している<sup>[1]</sup>。

ここではスイッチング方式の4象限電源の電力吸収抵抗の発熱を抑えるための回路方式やトランジスタドロップ型の特徴などについて述べ、また過去の4象限電源の開発・設置の経緯と、今回設置調整時に判明した問題点、安定度やノイズなどの性能試験結果などについて報告する。

### 2. SACLAの電磁石電源の種類

SACLAで使用する電磁石には偏向、四極、ステアリング、ソレノイドの各電磁石があり、その電源はバイポーラ電源、ユニポーラ電源、及び4象限電源の三種類に分類される。また定格別には14種類で合計370台の電源を用いている。電流安定度の許容値は100ppm P-P (U7のみ10ppm)、リップル許容値は100ppm RMS (U7のみ10ppm)である。

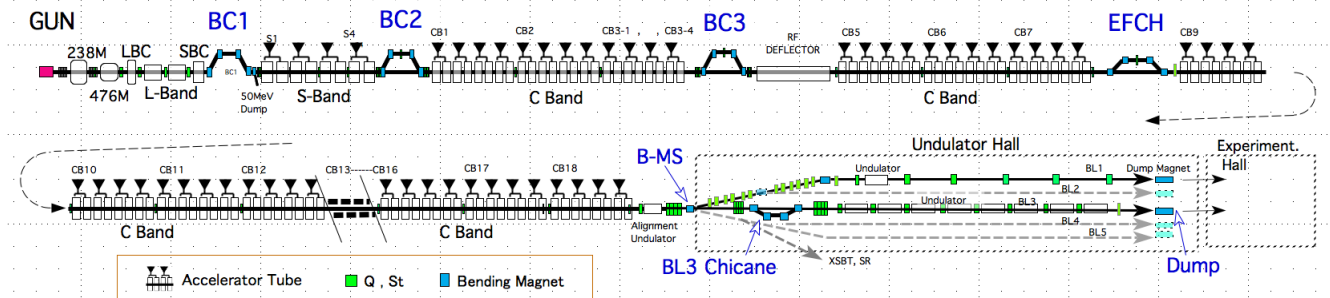


図 1 : SACLA主要機器とシケイン (BC1, 2, 3, EFCH, BL3-C) 用電磁石の配置

偏向電磁石、Magnetic Lens、及び四極電磁石にはユニポーラ型を、Steeringと一部の四極電磁石に

はバイポーラ型を使用する。

線形加速器棟には、ビームバンチ圧縮用のBC1、

<sup>1</sup> E-mail: takebe@spring8.or.jp

BC2, BC3の3カ所と、暗電流除去用のEFCH、及び光源棟BL3の各1カ所にシケイン部がある(図1)。シケイン部の偏向電磁石4台は1台の電源で直列に通電され、各電磁石に±1Aのトランジスタドロップ型の補正用4象限電源(Aux1)が接続されている(図2)。またBC2, BC3はビームを曲げずに直線で通過させることもあるため、残留磁場を消す目的でもAUX1電源が用いられる。

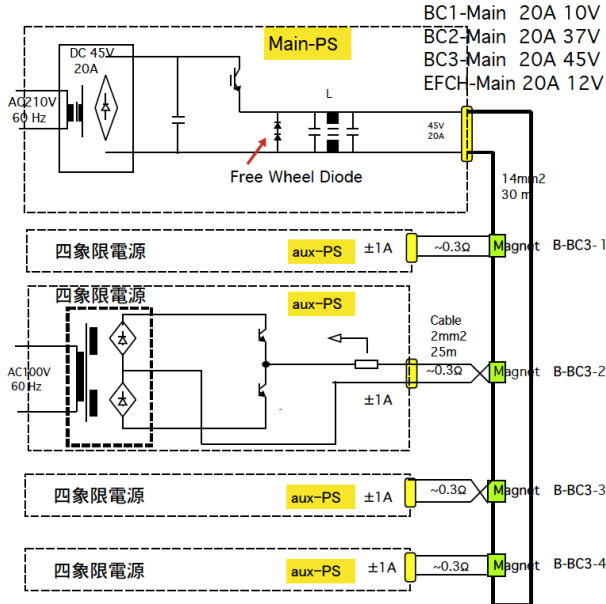


図2: BC1, 2, 3の電磁石と4象限電源の接続

表1: 偏向電磁石の主および4象限電源一欄

場所	Magnet Name	Magnet Type	L (mH)	PS Type	Cabl Ω	Meas.R Total (Ω)	定格 V	定格 A
BC1	B_BC1_1-4	4台直列	66	u5	0.09	0.39	12	20
BC1	B_BC1_1	D-a	16.5	aux1	0.50	0.58	±7	±1
BC1	B_BC1_2	D-a	16.5	aux1	0.50	0.58	±7	±1
BC1	B_BC1_3	D-a	16.5	aux1	0.50	0.58	±7	±1
BC1	B_BC1_4	D-a	16.5	aux1	0.50	0.58	±7	±1
BC1	B_BC1_dump	1台	219	u5	0.07	0.46	12	20
BC1	B_BC1_dump	D-b	63	aux1	0.30	0.69	±7	±1
BC2	B_BC2_1-4	4台直列	588	u6	0.09	0.97	42	20
BC2	B_BC2_1	D-c	147	aux1	0.50	0.72	±7	±1
BC2	B_BC2_2	D-c	147	aux1	0.50	0.72	±7	±1
BC2	B_BC2_3	D-c	147	aux1	0.50	0.72	±7	±1
BC2	B_BC2_4	D-c	147	aux1	0.50	0.72	±7	±1
BC3	B_BC3_1-4	4台直列	1600	u6	0.09	1.89	42	20
BC3	B_BC3_1	D-d	400	aux1	0.50	0.95	±7	±1
BC3	B_BC3_2	D-d	400	aux1	0.50	0.95	±7	±1
BC3	B_BC3_3	D-d	400	aux1	0.50	0.95	±7	±1
BC3	B_BC3_4	D-d	400	aux1	0.50	0.95	±7	±1
EFCH	B_EFCH_1-4	4台直列	48.4	u5	0.09	0.43	12	20
EFCH	B_EFCH_1	D-h	12.1	aux1	0.35	0.44	±7	±1
EFCH	B_EFCH_2	D-h	12.1	aux1	0.35	0.44	±7	±1
EFCH	B_EFCH_3	D-h	12.1	aux1	0.35	0.44	±7	±1
EFCH	B_EFCH_4	D-h	12.1	aux1	0.35	0.44	±7	±1
MS	B_MS_SW	1台	54	u7	0.0028	0.04	25	300
MS	B_MS_SW	D-e	54	aux2	0.16	0.20	10	±12
BL3.0	B_BL3_0_1-4	4台直列	7.6	u9	0.0090	0.18	30	130
BL3.0	B_BL3_0_1	D-f	1.9	aux2	0.15	0.19	±20	±12
BL3.0	B_BL3_0_2	D-f	1.9	aux2	0.15	0.19	±20	±12
BL3.0	B_BL3_0_3	D-f	1.9	aux2	0.15	0.19	±20	±12
BL3.0	B_BL3_0_4	D-f	1.9	aux2	0.15	0.19	±20	±12

光源棟のBL3用シケイン部の偏向電磁石4台は130Aの電源(U9)で直列励磁され、各電磁石には±12Aの

IGBTを使ったスイッチング方式の4象限電源(Aux2)が接続されている。これらシケイン部とビーム振り分け電磁石の主電源(u5~u9)、及び4象限電源(aux1, aux2)の一欄を表1に示す。

なおシケイン部4台の偏向電磁石の内2、3台目の磁場は逆方向になっているので、Aux電源を逆極性に接続し、同じ極性電流で同じ方向にビームを偏向するようにしている(図2参照)。また光源棟のBeam Lineの切替を行う振り分け電磁石(B-MS)にも、300Aの主電源の他に残留磁場調整のための±12Aの4象限電源(Aux2)が接続されている。

4象限電源の安定度やリップルの許容値は、主電源に比べてその定格電流の比率で緩和され、10E-3である。

### 3. 4象限電源の方式と特徴

#### 3.1 4象限電源の利用の経緯

加速器における4象限電源の利用に先立ち、理研の初代リングサイクロトロン(K=540, RRC)では、4つのセクター電磁石の主コイルが1050Aの主電源(M2)により直列励磁され、各セクターの主コイル間での微調用に100Aのトランジスタドロップ型のBypass電源を利用していた(1986年)。これは電源の台数や電力を減らすためであり、またトリムコイルについても同様の方式をとっていた。

SPring-8の蓄積リング(SR)の全周48セルには10系統の四極電磁石480台が設置されているが、それぞれ1つの系統で48台の四極電磁石が1台の500Aクラスの電源で直列励磁され、そのうちの数台の磁石が4象限電源(QA(±12Aや±18A、±35V)で微調整できるようになっている(図3)。これは500Aという大電流電源(Main-PS)を大量に製作する場合に比べ、コスト及び、配線ケーブルロスの電力も含めて格段に経済的であるためである(1996年)<sup>[5]</sup>。また付随効果として電流調整分解能も上げられる。

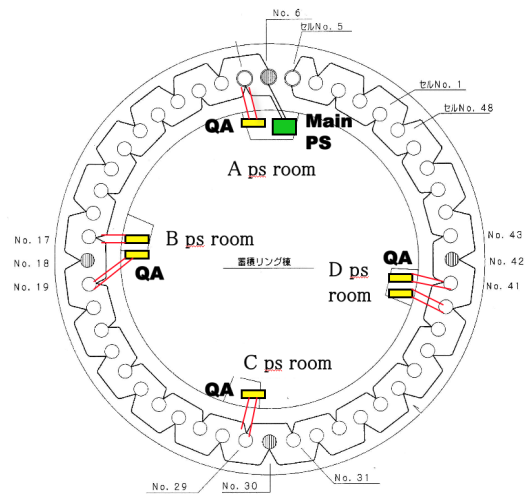


図3: SRのQ電磁石と主電源及びQAの接続図

SPring-8で4象限電源を採用したのは、電流吸収

のみのBypass電源に比べて運転の利便性が向上するためである。またちょうどステアリング磁石用電源にスイッチング方式のバイポーラ電源が使われはじめた時代であったため、4象限電源についても同じスイッチング方式を採用したが、電流吸収時の内部素子の過電圧を抑える必要があり、そのための吸収抵抗が必要である(3.4で後述)。

SACLAのシケイン用4象限電磁石電源は、線型加速器棟ではドロップ方式、光源棟の電磁石にはスイッチング方式を採用している。この2種の方式の長短について以下に述べる。

### 3.2 ドロップ方式4象限電源

SACLAのBC部に使われている4象限電源は、トランジスタドロップ型のバイポーラ電源である。これは±12V, ±1Aという小出力であるためである。また負荷となる磁石の主電源電圧も高くないため、回路の絶縁も容易である。電流吸収時にはバイポーラ電源のマイナス側のトランジスタが働く(図4)。ちなみにSPRING-8蓄積リングの四極電磁石微調用4象限電源(±35V±18A)をトランジスタドロップ型にした場合、スイッチング方式の約2倍の体積になった。

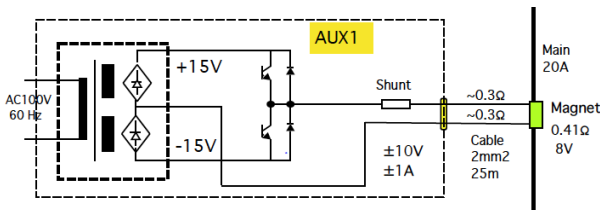
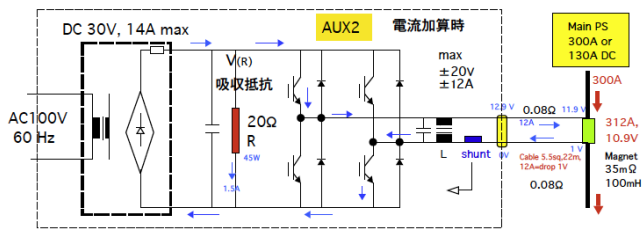


図4: ドロップ方式4象限電源

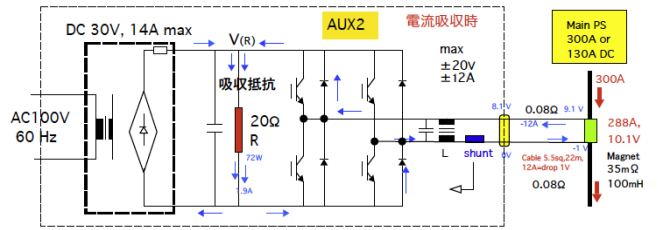
### 3.3 スwitching方式4象限電源

トランジスタドロップ型のバイポーラ電源は、大きな出力を得ようとすると変圧器やトランジスタバンク(放熱フィン)の体積が大きくなるが、スイッチング方式の場合体積は半分になる。しかし電流吸収時にはスイッチング素子の電圧が上昇するため、吸収抵抗を設けなければならない(図5a, b)。



電流加算時は負荷に多く流れるのでV(R)は下がるが  
0A時は 30V / 20Ω = 1.5A。0A時でも45Wの発熱

図5a: スwitching方式4象限電源(加算時)



電流吸収時は負荷からの電圧が加算され  
(30V+8.1V) / 20Ω = 1.9A。-12A時には72Wの発熱

図5b: スwitching方式4象限電源(吸収時)

交流型4象限電源の場合はエネルギーを一時的にコンデンサーに貯められるが、直流で使用するとスイッチング素子にかかる電圧が上昇してしまうので、吸収抵抗が必要である。

この抵抗値が低ければ吸収時の発熱は小さいが、抵抗値が低いと電流加算の為の供給電圧により発熱が大きくなる。そのため抵抗値は中間をとることになる。図6はAUX2利用時に主電流の違いによる4象限電源の電圧と電流の違いを表している。主電流=300Aの場合、AUX2=0Aでも10.5Vの電圧になり、-12Aでも+8.1Vである。

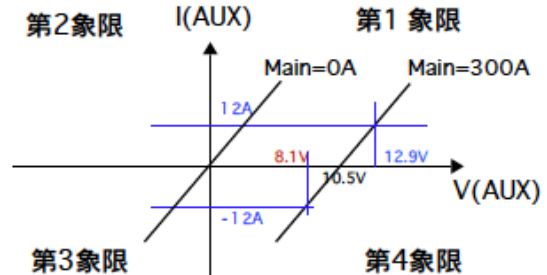


図6: 運転電流と電圧の象限

### 3.4 電力吸収抵抗の発熱の低減

SPRING-8の蓄積リングの初代4象限電源(QA: ±35V, ±18A)はスイッチング方式を取った。吸収抵抗は300W以上の大きな容量となるため、図7に示す様にDC供給電圧を吸収しないようにして、スイッチング素子が過電圧になる前に吸収する保護回路を設けて発熱を小さく抑える工夫をした。

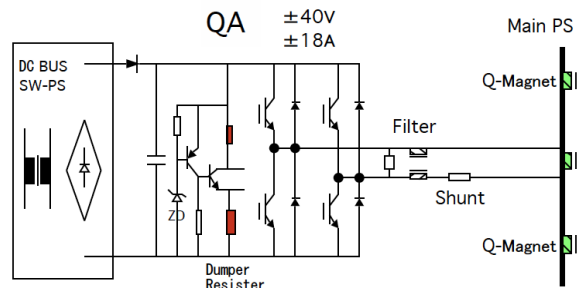


図7: スwitching方式電源吸収抵抗の工夫

#### 4. 設計製作の留意点・まとめ

主電源と4象限電源の電流制御定数の調整は、リップルによる発振などを防ぐためにも重要である。SPRING-8ではその系統の全ての電磁石に4象限電源を設置した時には発振などの問題が見られたが、SACLAではその経験を設計に取り入れた結果、シケイン部の4台の偏向電磁石全てに4象限電源を接続しても問題無く動作している。4象限電源の試験通電を工場で行った際、接続される電磁石やケーブルに近い抵抗値やインダクタンスに近い模擬負荷を使用したため、現地の実負荷での再調整は簡単であった。なおヨークに純鉄ブロック材を用いた電磁石のインダクタンスは、120HzのLCRメータで測定した値と計算値がかなり異なっており、リップル調整の値はLCRメータの測定値に近かったが、電源遮断時の時定数は計算値に近い値を示している(表2)。

表2:偏向電磁石のインダクタンス

磁石 Type	冷却	定格		インダクタンス(1台)		比較	電源 type
		電流 (A)	計算値 (mH)	実測@120Hz (mH)	計算/実測		
D-a	空冷	20	16.5	3.28	5.03		U5, aux1
D-b	空冷	20	219	63.3	3.46		U5, aux1
D-c	空冷	20	147	18.3	8.03		U6, aux1
D-d	空冷	20	400	52	7.69		U6, aux1
D-f	水冷	130	7.6	8	0.95		U9, aux2
D-h	空冷	20	12.1	4.5	2.69		U5, aux1

BC部の主電源はユニポーラ型電源であるため、電源遮断時の保護の為に4象限電源にはFree Wheel Diodeを付けている。また0A時にも4象限電源に電圧がかかる事があるので、2段型Diodeにして順電圧を高くしている(図2参照)。磁石の時定数によりFree Wheel Diodeの容量を決定するが、LCRメータでの測定の際はインダクタンスが大きく出るので注意を要する(表2参照)。

4象限電源の2次側(出力側)は接地電位から浮かせなければならない。SACLAの2ch(2台)収納型電源では、遠隔制御用のボード(i-DIO)のチャンネル間はphoto-couplerで絶縁している<sup>[6]</sup>。しかし±1Aの4象限電源(AUX1)では、FAN Alarm信号のプリント基板に間違いがあり、2ch間に50mAの漏れ電流があった。これは内部の電流モニターでは観測されない流路であったため、電源の試験では判明しなかったが、電磁石磁場の測定の際に発見された。

4象限電源が大型になる場合は、スイッチング方式を採用し、3.4に示した工夫を行うのが合理的である。また運転状態や吸収電流値、ケーブル抵抗値によっては2つの象限しか使わない場合もあり、バイポーラ型でも1次側の電源を小さくできることも可能である(図6)。

今回の製作結果では安定度とリップルの性能は、

共に仕様を十分満足しており(30-50ppm)、発振の問題も起きなかったが、スイッチングノイズ対策用のLCフィルターについては十分余裕を持った設計が重要であった。

最後に、電磁石磁場の微調には磁石に補正用コイルを巻くことも可能であるが、4象限電源を使えばコイルの数が減るため安価になる場合もあり、特に多極電磁石などではその差は大きい。また直列接続した多数の電磁石の一部(任意の磁石)を補正するような場合には特に有利であり、今後の加速器設計に取り入れることは十分検討に値する。

#### 5. 謝辞

SACLAの4象限電源では、工藤電源KKと株式会社IDXの2つのメーカーのご協力ですべてスイッチング方式とトランジスタドロップ方式で実績を積み、無事電源が完成したことに感謝の意を表明したい。また、加速器の全体設計者には経済性を鑑み今後加速器製作で多いなる利用の検討をお勧めする。

#### 参考文献

- [1] Kano, et al., "Energy dispersion correction of electro-magnets chicane", in this proceedings.
- [2] H.Takebe, et al., "Power supply Design for the XFEL/SPRING-8 Magnet", (FP51) Proceedings of the 4th Accelerator Symposium in Japan, Wako, Aug. 3, 2007.
- [3] H.Takebe, et al., "Power Supply System for the XFEL/SPRING-8 Magnet", (TPMGA02) Proceedings of the 6th Accelerator Symposium in Japan, Tokai, Aug. 6, 2009.
- [4] H.Takebe, et al., "Power Supply System for the XFEL/SPRING-8 Magnet", (THPS056) Proceedings of the 7th Accelerator Symposium in Japan, Himeji, Aug. 5, 2010.
- [5] <http://acc-web.spring8.or.jp/~takebe/ann-rep/QA-Desy2006.pdf>.
- [6] H.Takebe, et al., "Power Supply Control System for the XFEL/SPRING-8 Magnets", (TUP067), Proceedings of the 6th ICALEPCS'09 in Japan, Kobe Oct. 13, 2009.