特集 粒子加速器に関する日立システム技術

# シンクロトロン加速器用高精度電磁石電源

Highly-Stabilized Power Supply for Synchrotron Accelerators —High Speed, Low Ripple Power Supply—

■ 佐藤健次*	Kenji Satô	古関庄一郎****	Shôichirô Koseki
熊田雅之**	Masayuki Kumada	久保 宏*****	Hiroshi Kubo
深見健司***	Kenji Fukami	金沢 徹******	Tôru Kanazawa



大型放射光施設"SPring-8"の入射系施設の全容 SPring-8の入射系は,リニアック(直線部,長さ約180m)とシンクロトロン(だ円形部,周長約400m)で構成し,上図の施設内に設置されている。

近年,シンクロトロン加速器は医療装置,放射光利用 設備などへの応用が急速に進展している。これらの加速 器では,高エネルギービームを有効に利用するために, 1秒から数秒の短周期で加速,取り出しを繰り返して運 転する。このような短周期の通電パターンに対して,ビ ーム軌道を安定に保って加速するために,電源は10<sup>-3</sup>以 下の誤差で電流を追従させるトラッキング性能が要求さ れる。さらに,外部に取り出すときのビームの強度,均 て低いリプルが必要とされている。

このような高速応答,低リプルの特性を持つ電源を開 発し,科学技術庁放射線医学総合研究所の重粒子線がん 治療装置"HIMAC"(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)および日本原子力研究所大型放射光施設 "SPring-8"用シンクロトロンに適用した。前者では1994 年3月から運転を開始しており,仕様を上回る高性能が 得られ,現在,がん治療の研究に利用されている。

77

一性を保持するため、出力電流は10-5から10-6ときわめ

\*大阪大学 理学博士 \*\*科学技術庁放射線医学総合研究所 理学博士 \*\*\*日本原子力研究所 工学博士 \*\*\*\*日立製作所 日立工場 工学博士 \*\*\*\*\*日立製作所 日立工場 \*\*\*\*\*\*日立エンジニアリング株式会社

# 1. はじめに

医療装置,放射光利用設備などにシンクロトロン加速 器が利用されている。この加速器には,高エネルギービ ーム軌道での安定した加速と,外部取り出し時でのビー ムの強度,均一性の保持が求められている。このニーズ にこたえて,高速応答,低リプルの電磁石電源を開発し た。ここでは,シンクロトロン加速器用電磁石電源の 低リプル化,高トラッキング化のための手法について述 べる。

## 2. シンクロトロンの応用例

シンクロトロンは主に素粒子研究用に利用され,最近では医療装置,放射光発生装置などにも応用されている。

#### 2.1 医療用加速器

科学技術庁放射線医学総合研究所では、1994年3月に



図1 重粒子線がん治療装置 "HIMAC" の鳥かん図 シンクロトロンは上下2セットあり,周長約130mのリング内に 電磁石電源を設置している。

式を開発し、40 µsの追従性能を達成した。一方、電流リ プルについては電子がリングを1周回する時間内でビー

重粒子線がん治療装置"HIMAC"を完成させ,重粒子に よるがん治療の研究を進めている。この装置は,各種イ オンをリニアックで核子当たりエネルギー6 MeVに加 速後,シンクロトロンで最高800 MeVまで加速し,加速 ビームをがん細胞に照射して治療するものであり,重粒 子線加速器としては世界最大級である。装置の鳥かん図 を図1に示す。この装置は,強度,均一性を保ってビー ムをゆっくりと外部に取り出すため,電磁石電流のリプ ルを極小にする必要がある。この電源では,従来にない コモン モード フィルタの採用などにより,10<sup>-6</sup>以下と きわめて小さな電流リプルを達成し,ほかの補助的手段 に頼ることなく主電源単独で高品質のビームの取り出し に成功した。

#### 2.2 放射光発生用加速器

日本原子力研究所では,理化学研究所と共同で大型放 射光施設"SPring-8"の建設を進めている。シンクロト ロン加速器は,電子を光速近くまで加速し,放射光を発 生する蓄積リングに入射する装置である。

SPring-8は,放射光施設では8GeVと世界で最大級の エネルギーを誇り,1998年に放射光を供給開始する予定 である。入射系シンクロトロン用電磁石電源は1996年9 月に性能確認試験を終了した。このシンクロトロンは蓄 積リングに大量の電子を蓄えるため,1秒と短周期で加 ムを取り出すため、10<sup>-4</sup>とHIMACに比べると緩やかな 仕様になっている。

# 3. シンクロトロン加速器用電磁石電源

#### 3.1 電源仕様

シンクロトロン加速器では、ビームを軌道に沿うよう に偏向させる偏向電磁石,軌道に対してレンズの役割を する四極電磁石,および軌道補正を行う電磁石によって 軌道の制御を行う。これら電磁石を励磁する主電源の仕 様を表1に,励磁パターンと所要性能の例を図2にそれ ぞれ示す。

3.2 電源の方式

3.2.1 リプル低減方式

電源の出力リプルについては、図3の①から⑦に示す

#### 表1 主電源の仕様

HIMACではシンクロトロン2セット分の員数を示す。

シンクロトロン加	速器	HIMAC	SPring-8			
	員	数	2 台	I台 5,I30 kW 3,420 V		
佢占重磁工電酒	出	カ	5,100 kW			
冊  「  毘   窓	電	圧	2,270 V			
	電	流	2,260 A	I,500 A		
	員	数	4 台	2 台		
四杨雪磁石雪酒	出	カ	466 kW	674 kW		
凹極电磁口电标	電	圧	343 V	1,260 V		
	電	流	I,360 A	535 A		
パターン周期		2~3.3 s	l s			
トラッキング		$  \times   0^{-3}$	$1  imes 10^{-3}$			
電流リプル*			$I  imes I 0^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$		

速,	出射	を	繰	ŋ	返	す	特	徴	が	あ	З	0	電	源	は	,	仕	様	$\sigma$	)精	渡	T
トラ	ッキ	ン	グ	z	せ	ろ	た	め	,	加	速	時	の	バ	タ	-	ン	12	: 3	40	μs	以
下で	電流	を	追	従	3	せ	ろ	必	要	が	あ	る	0	Z	の	よ	Ś	な	古同	速	応	答
を実	現す	3	た	め	,	P	ク	テ	イ	ブ	フ	亻	IV	タ	に	よ	3	高	速	制	御	方

注:\*定格電流時の仕様を示す。

78



#### **図2** SPring-8電磁石の励磁パターン例 1秒周期で繰り返し運転する。

方式によって低リプル化を実現した。

3.3 アクティブフィルタ制御

3.3.1 リプル除去

アクティブフィルタは、電源の出力電圧に含まれるリ プル成分を検出し、リアクトルトランスを介して逆位相 でリプルに相当する電圧を発生することによってリプル 成分を打ち消すものである。出力電圧は、通電パターン に従って急しゅんに変動し、電磁石のコイル温度などで も変化するので、リプル成分だけ正確に検出できる制御 回路とした。

#### 3.3.2 トラッキング改善

電源の制御は,定電流制御回路が基本となり,電流設 定値と電流検出値の誤差でサイリスタの位相制御を行っ ている。この場合,サイリスタ変換器,パッシブフィル タの遅れがあるため電圧が即応できず,定電流制御のゲ インを高くできなかった。SPring-8では,上記遅れ分を アクティブフィルタで補償する制御方式を採用すること

3.2.2 トラッキング改善方式

(1) HIMACでは,追従誤差をディジタル制御装置に取 り込み,繰り返し周期制御で設定電圧パターンを修正す ることによって追従誤差を抑える方式とした<sup>1)</sup>。

(2) SPring-8では,次章で述べるアクティブフィルタに よる高速制御方式を開発し,周期制御を用いなくてもト ラッキング性能を十分満足できるようにした。 により,電流制御ループの遅れをなくし,電流制御ゲインを1けた以上高くすることを可能として<sup>2)</sup>,トラッキングを大幅に改善した。

3.4 試験結果

3.4.1 電流リプル測定

HIMAC電源の出力電圧リプルを周波数分析した結果 を図4に、これから電流リプルを算出した結果を表2に

79



#### 注:略語説明 SVC(無効電力補償装置), PLL(Phase-Locked Loop), APPS(自動パルス移相器) ACR(定電流制御), AVR(定電圧制御), AF(Active Filter)

#### 図3 偏向電磁石電源の回路構成と特徴 ①から⑦の方式によって電源出力の低リプル化を実現した。



#### 図4 HIMAC四極電磁石電源の出力電圧周波数分析結果

アクティブフィルタによってリプルを大幅に低減した。

表2 出力電流リプル測定結果(HIMAC四極電磁石電源)

アクティブフィルタによって電流リプル10-6以下を実現した。

周波数 (Hz)	アクティ 切り離し	ブフィルタ 時	アクティブフィルタ 投入時				
(112)	電圧(dB)	電流(p-p)*	電圧(dB)	電流(p-p)*			
50	-67	1.3×10 <sup>-6</sup>	-95	0.5×10 <sup>-7</sup>			
100	-31	4.2×10 <sup>-5</sup>	-76	$2.3 \times 10^{-7}$			
150	-56	1.6×10 <sup>-6</sup>	-88	0.4×10 <sup>-7</sup>			
200	-55	1.3×10 <sup>-6</sup>	-81	0.7×10 <sup>-7</sup>			
300	-53	. × 0 <sup>-6</sup>	-89	0.2×10 <sup>-7</sup>			
600	-62	2.0×10 <sup>-7</sup>	-77	0.4×10 <sup>-7</sup>			
1,200	-43	8.8×10 <sup>-7</sup>	-85	0.I×I0 <sup>-7</sup>			

注:\*定格電流に対する割合を示す。

それぞれ示す。アクティブフィルタでリプルを大幅に低 減しており、電流リプルとして10-6以下を実現した。 3.4.2 トラッキング誤差測定

SPring-8電源でのトラッキング誤差の測定結果を 図5に示す。トラッキング誤差は電流設定値と実電流と の誤差の定格電流に対する割合で規定しており、1.2× 10<sup>-4</sup>と仕様1×10<sup>-3</sup>を十分満足する結果を得た。

# 4. おわりに

ここでは、シンクロトロン加速器用電磁石電源の低リ プッル 声トラッキング化のためのモ注について述べた



注: \*減速部ではトラッキングは規定されない。

図 5 SPring-8偏向電磁石電源のトラッキング誤差測定結果 1.2×10<sup>-4</sup>のトラッキング性能(追従遅れ40 μs)を達成した。

従来にはないコモンモードフイルタ,電磁石の対称接 続などにより,低リプル化を可能とした。また,アク ティブフィルタによる遅れ補償によって高速応答を実現 した。

今回開発した電源方式は,今後の加速器用電磁石電源 に有効に適用できるものと考える。

## プル化,高トラッキング化のための手法について述べた。

# 参考文献 高田,外:加速器用電磁石電源同期・繰返し制御,日立評論,79,2,225~228(平9-2) 古関,外:高速高精度電源制御方式の開発,電気学会産業応用部門全国大会,No.157(1991)