

# DEVELOPMENT OF A POWER SUPPLY FOR THE BENDING ELECTROMAGNETS OF THE HEAVY-ION FACILITY AT GUNMA UNIVERSITY

Choji Yamazaki <sup>#,A)</sup>, Eiichi Ikawa<sup>A)</sup>, Isamu Tominaga<sup>A)</sup>, Takashi Saito<sup>A)</sup>,  
Isao Uchiki<sup>B)</sup>, Yoshihide Takami<sup>C)</sup>, Satoru Yamada<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> Toshiba Mitsubishi-Electric Industrial Systems Corporation

1 Toshiba-cho, Fuchu-shi, Tokyo, 183-8511

<sup>B)</sup> Mitsubishi Electric Corporation

1-1-2 Wadamisaki-cho, Hyogo-ku, Kobe-shi, Hyogo, 652-8555

<sup>C)</sup> Mitsubishi Electric Engineering Corporation

1-1-2 Wadamisaki-cho, Hyogo-ku, Kobe-shi, Hyogo, 652-8555

<sup>D)</sup> Gunma University Heavy Ion Medical Center

3-39-22 Showa-machi, Maebashi-shi, Gunma, 371-8511

## Abstract

A 3MW-class high-precision IGBT chopper type power supply was developed for the bending electromagnets of the Heavy-Ion Facility at Gunma University. The current ripple was less than  $\pm 1 \times 10^{-5}$ , and the tracking error was less than  $\pm 1 \times 10^{-4}$ . With this power supply, the heavy ion beam was successfully accelerated. On 16 March, 2010, medical treatment was begun.

## 群馬大学重粒子線照射施設用偏向電磁石電源の開発

### 1. はじめに

加速された陽子や重粒子（炭素イオン）をがん細胞へ照射することで、患者への負担が少ない治療ができることから、がん治療用のシンクロトロン加速器の普及が進んでいる。群馬大学重粒子線医学研究センターでは重粒子線がん治療装置の普及に向けた技術実証機第1号と位置づけられた施設の建設が進められ、現在運用が開始された。<sup>[1][2]</sup>

シンクロトロン加速器で使用する偏向電磁石電源の容量は3MW級になり、かつパターン運転での電

流追従性は $\pm 1 \times 10^{-4}$ 、電流リップルは $\pm 1 \times 10^{-5}$ が要求される。この偏向電磁石電源を二象限 IGBT チョップ方式により開発した。本論文では、開発した偏向電磁石電源の構成、および性能確認試験結果を報告する。

### 2. 偏向電磁石電源の基本構成

偏向電磁石電源の基本構成を図1に示す。24パルスのダイオード整流器で直流変換し、二象限 IGBT チョップにより高精度電流制御を実現している。表1に基本諸元を示す。

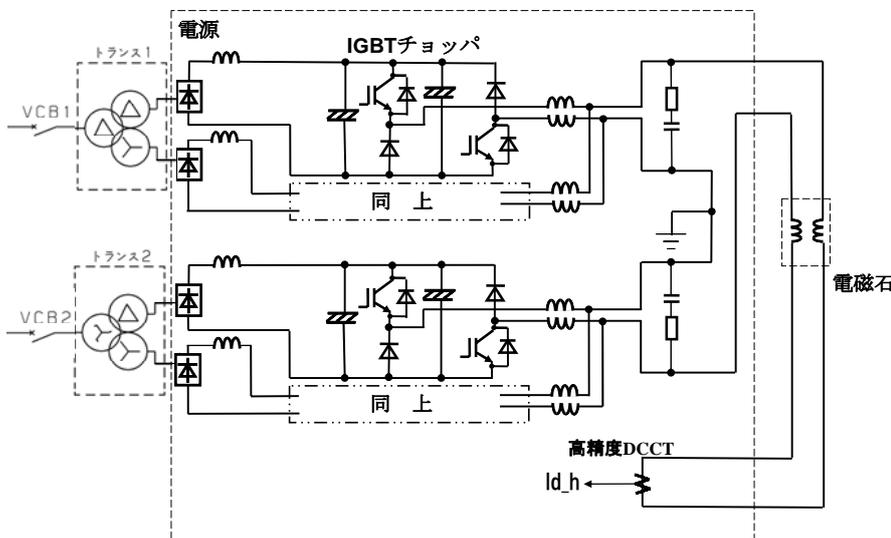


図1：電源の基本構成

表1：基本諸元

最大出力電流	2220A
最大出力電圧	1460V
最大出力電力	3241kW
電磁石	14.9mH-13.2mΩ, 18直列
電流追従性	$\pm 1 \times 10^{-4}$ (@2220A)
電流リップル	$\pm 1 \times 10^{-5}$ (@2220A)
IGBT基本ユニット 1台分の構成	IGBT 1700V-400A(2in1), 4 <sup>パ</sup> ラ スイッチング周波数: 1.953kHz 水冷式
チョップ構成	(1S-4P)×2 ×6並列×2直列
概略寸法	W24520×D1680×H2360

IGBT チョップは、定格が 1700V-400A(2in1)の IGBT を 4 パラ構成にしたものを基本ユニットとし、このユニット 2 台で二象限チョップを構成、さらに 6 並列、2 直列にして定格出力を実現している。IGBT のスイッチング周波数は 1.953kHz で、二象限チョップを 4 多重にすることで合成周波数を 15.624kHz としている。

電磁石の配線は、電源の P 側、N 側をそれぞれ電磁石の上部、下部に順次 18 台を直列接続していき、対称配線になるようにしており、発生磁場で共通モードリプルをキャンセルするようにしている。また高精度 DCCT の取り付け位置は、対称配線の最終端としており、共通モードの電流リプルが検出されないようにした。

本電源のフィルタの特性を図 2 に示す。16kHz での減衰率が -28.5dB で、367Hz に 2.34dB の共振点を持った特性となっている。

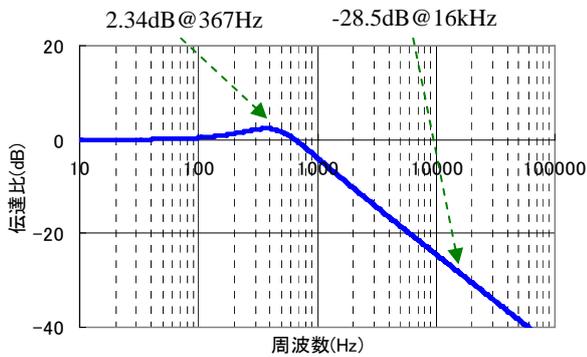


図 2 : フィルタの特性

### 3. 制御装置の基本構成

図 3 に制御装置の基本構成を示す。電源の制御は、比例積分での定電流制御である。電流基準と電磁石電流を高精度で検出して電流偏差をとるアナログ部分は、ペルチエ素子を用いた恒温ユニットに収納し、高精度を確保している。電流偏差を 1000 倍した後は、全デジタル制御をしている。また本電源は、パターン運転での追従性を改善する目的で、電圧基準もパターン化し、電流基準と同期して入力

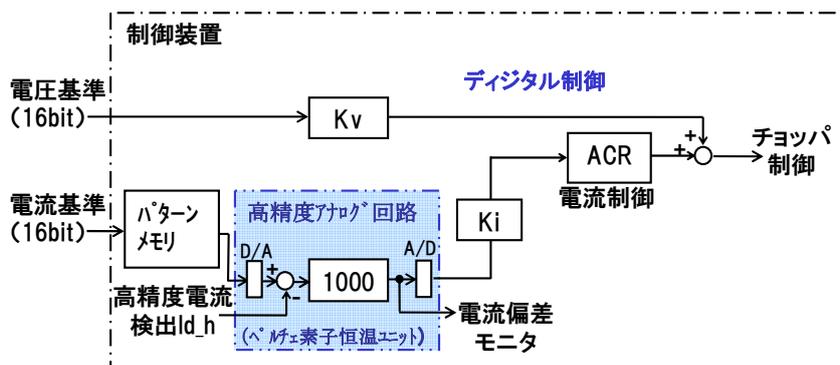


図 3 : 制御装置の基本構成

するようになっている。電圧基準は、電流パターンから電磁石定数 (R, L) により一意的に算出しており、さらに大電流領域で見られる電磁石の飽和を考慮したものとしている。この電圧基準は直接チョップの制御量に加算している。チョップの制御特性は比較的直線性が良いため、この方法は追従性改善に有効である。

### 4. 試験結果

図 4 はパターン通電の波形である。電流基準と出力電流との電流偏差を測定し、追従性を確認した。電流偏差は、電源の最大出力電流 2220A に対する比率で表している。台形波パターン (フラットベース : 194A、フラットトップ : 2220A、立上り時間 : 675ms、立下り時間 : 675ms) の通電では、電流偏差がパターンの全領域において  $\pm 0.5 \times 10^{-4}$  以下と、要求値の  $\pm 1 \times 10^{-4}$  に対し十分達成していることが確認できた。

図 5 はフラットベース電流(194A)とフラットトップ電流(2220A)での電流偏差 FFT の結果を示す。電流リプルは  $\pm 0.2 \times 10^{-5}$  以下と、要求値の  $\pm 1 \times 10^{-5}$  に対し十分達成していることが確認できた。

一方、500Hz 付近における FFT 波形が全体的に盛り上がっているが、電源内のフィルタ特性の共振点と関係していると考えられる。

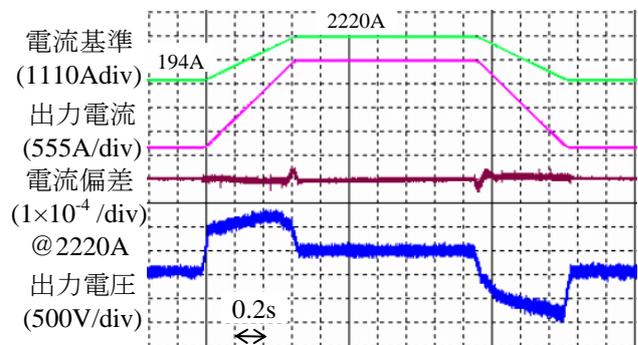


図 4 : パターン運転波形

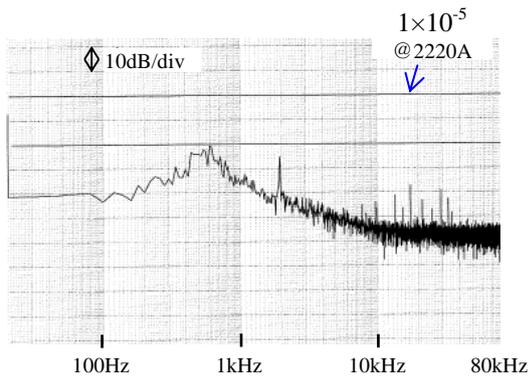
図 6 はフラットベース電流(194A)とフラットトップ電流(2220A)での出力電圧 FFT の結果を示したものである。出力電圧 FFT から電磁石定数により電流値換算し、電流リップル  $1 \times 10^{-5}$  になるラインを示してある。電流偏差 FFT で確認できた 500Hz 付近での盛り上がりは、出力電圧 FFT では確認できない。電流偏差 FFT と出力電圧 FFT とでこのような測定差ができることは注意すべきである。電磁石の発生磁場に直接係わるのは電流であることから、本電源での電流リップルは、電流偏差 FFT の結果で評価した。

## 5. まとめ

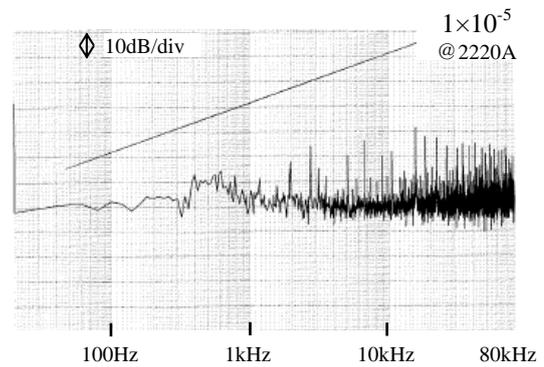
IGBT チョップパでの 3MW 級偏向電磁石電源を開発し、がん治療用シンクロトロン加速器の電源としての要求性能、電流追従性  $\pm 1 \times 10^{-4}$ 、電流リップル  $\pm 1 \times 10^{-5}$  に対し、それぞれ  $\pm 0.5 \times 10^{-4}$  以下、 $\pm 0.2 \times 10^{-5}$  以下と、十分に達成していることを確認した。本電源は群馬大学重粒子線医学研究センターの重粒子線がん治療装置に組み込まれ、重粒子線の加速に成功し、2010年3月16日に治療を開始した。

## 参考文献

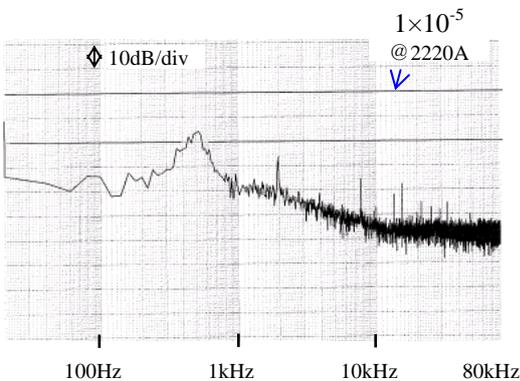
- [1] 田代, 他., “群馬大学重粒子線照射施設計画の現状”, 第4回日本加速器学会年会プロシーディングス, pp.52-54, 2007
- [2] 山田, 他., “群馬大学重粒子線照射施設”, 加速器学会誌, Vol.4, No.3 pp.176-179, 2007



(a) フラットベース(194A)での FFT

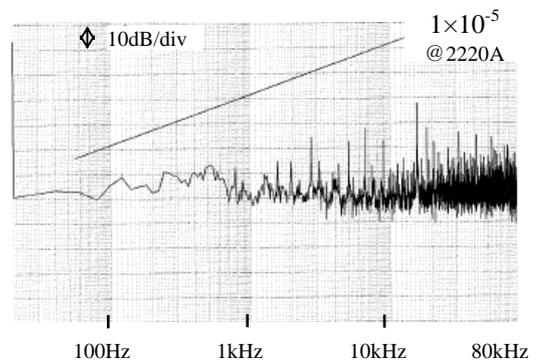


(a) フラットベース(194A)での FFT



(b) フラットトップ(2220A)での FFT

図 5 : 電流偏差の FFT



(b) フラットトップ(2220A)での FFT

図 6 : 出力電圧の FFT