

## DESIGN AND CONSTRUCTION OF A SPIRAL MAGNET FOR A HYBRID ACCELERATOR

H. Tanaka<sup>1</sup>, T. Nakanishi

Mitsubishi Electric Corp., Advanced Technology R & D Center,  
8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo 661-8661, Japan

### Abstract

A hybrid accelerator using an FFAG injection scheme is proposed for industrial applications. The bending field is constant at an injection time as an FFAG accelerator, and the bending field changes after the injection time as a synchrotron. Both rf accelerator and induction accelerator are practicable. We have designed a very compact 1 MeV electron induction accelerator. Peak current and the repetition are 8 A and 1 kHz, respectively. Beam simulation results show that large beam size at injection time is gradually reduced to small size during acceleration. Proto-type five-sectors spiral bending magnet has been designed and constructed. Outer diameter of the magnet is as small as 100 mm, and weight is about 3 kg. Magnetic measured results show that rapid cycle repetition can be practicable.

### FFAGとシンクロトロンのハイブリッド加速用スパイラル電磁石の試作

#### 1. はじめに

我々は、産業・医学利用を想定したコンパクトで低コストな円形誘導加速器のフィージビリティ・スタディーを実施している。ベータトロン加速器をベースに、新たなスパイラル磁場収束方式、最新のパワー半導体・磁性材料技術、電磁界シミュレーション技術を融合し、パームトップ型の電子加速器を実現することが目標である。

加速方式は、ハイブリッド加速という新しい加速手法を用いる[1]。ハイブリッド加速手法は、入射時はFFAGモードで偏向磁場一定の加速を行い、その後、シンクロトンモード（誘導電界加速の場合はベータトロンモード）で偏向磁場を変化させる加速手法である[2]。

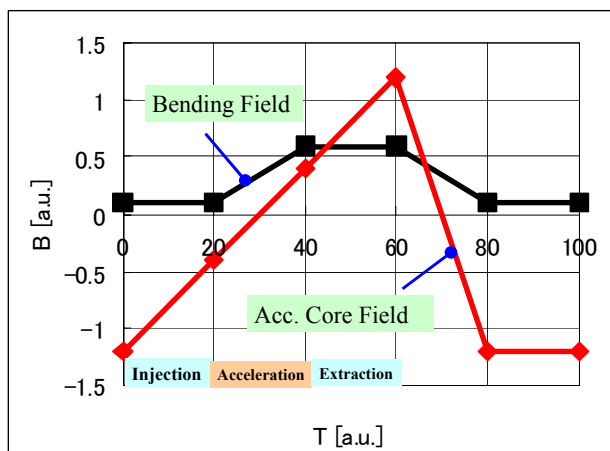


図1：ハイブリッド加速手法の加速シナリオ[2]  
(縦軸は磁束密度、横軸は時間。Bending Field：パルス偏向電磁石の励磁パターン、Acc. Core Field：誘導電界発生用加速コアの励磁パターン)

パームトップ型加速器のキーデバイスが、パルス(交流)電磁石である。本論文は電子1MeV加速を想定した、スパイラル形状のパルス電磁石を設計、試作した結果に関し記述する。

#### 2. スパイラル形状・パルス電磁石

パームトップ型加速器で用いる偏向電磁石は以下の特徴を有する必要がある。

- (1) 1kHzの交流励磁
- (2) スパイラル形状の複雑な磁極形状
- (3) 0.5T以上の高磁場
- (4) 低鉄損
- (5) 低コスト

交流励磁を行う電磁石材料として、積層鋼板、フェライト等がある。積層鋼板はコンパクトで複雑なスパイラル形状を実現することが難しい。また、フェライトは飽和磁束密度が低く、且つ、複雑な形状を高精度で製作するにはコストがかかり望ましくない。我々は、上記の5項目を満たすと考える複合軟磁性材料MBS-318(三菱マテリアル(株))を用いパルス磁石のプロト機製作を試みた。

##### 2. 1 磁石設計

ハイブリッド加速手法を用いたパームトップ型誘導加速器のビーム収束方法として、ラディアルセクター型とスパイラルセクター型が考えられる。ラディアルセクター型は逆偏向磁場が必要で、加速器全体寸法が大きくなる。パームトップ型加速器はコンパクトであることが第一命題であり、スパイラルセクター型を採用した。スパイラル磁極形状はビーム軌道解析により決定した。パームトップ型加速器

<sup>1</sup> E-mail: Tanaka.Hirofumi@wrc.melco.co.jp

のプロト機の基本パラメータを表1に、スパイラルセクター電磁石の基本パラメータを表2 [3]に示す。 $\Phi 100$ のコンパクトなパルス電磁石で、電子を1MeVまで加速可能な設計である。セクター数を減らすと電磁石として作りやすいが、1セルでの水平方向の位相の進みが大きくなりすぎるので、セクター数5を採用している。

図2に、電磁界設計とビーム軌道解析で決定したパルス電磁石の磁極形状、及び、最内周と最外周の周回平衡軌道を示す。また、図3に、加速中に電子ビームのビームサイズが小さくなっていく様子をビームシミュレーションした結果を示す。入射完了直後(T=0)はFFAGモードで広がっていたビームが、加速中に序々に収束していく様子がわかる。入射完了直後は電子のエネルギーが低く、ビームサイズを広げることで、空間電荷効果を抑制している。加速後に収束する軌道半径は、偏向電磁石と加速コアの励磁パターンを変えることで、軌道半径の外側、内側のいずれに設定することも可能である。なお、本加速器は電子ビームを出射せずに、金属ワイヤー等の内部ターゲットに周回ビームを衝突させてx線を発生させる。よってビームサイズを加速中小さくすることが加速器性能上必須であるわけではない。

表1：1 MeV電子加速器プロト機の基本パラメータ

最大エネルギー	1 MeV
入射エネルギー	60 keV
加速種	電子
磁石形式	スパイラル・セクター
K値	0.8
入射/出射半径	23mm/28.3mm
パッキングファクター	0.3
スパイラル角	35度
セクター数	5
ベータatron振動数	水平:1.85、垂直:0.64
繰り返し	1kHz

表2：スパイラルセクター電磁石の基本パラメータ

磁極外径	$\Phi 100$
磁極高さ	80mm
重量	2.8kg
磁極数	5
磁場強度	0.59T
磁極間隙	5.4~7.5mm
コイルターン数	7turn/pole
磁極半径	20.5~32.6mm
通電電流	250A
インダクタンス	72 $\mu$ H
磁極材質	MBS-318 (軟磁性材料)

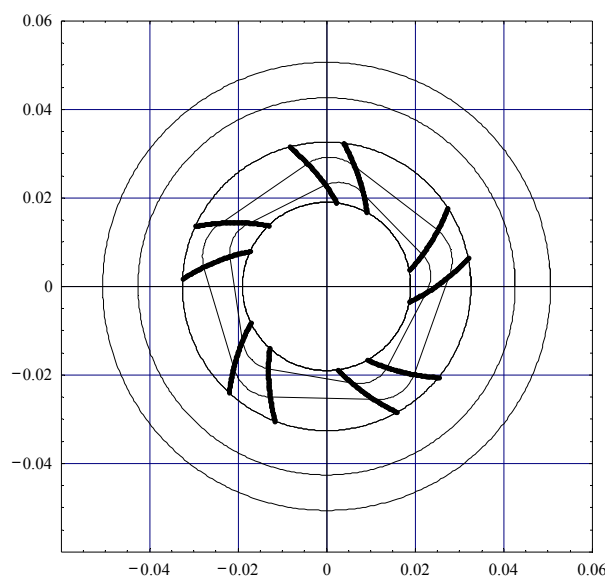


図2：スパイラル電磁石の磁極形状

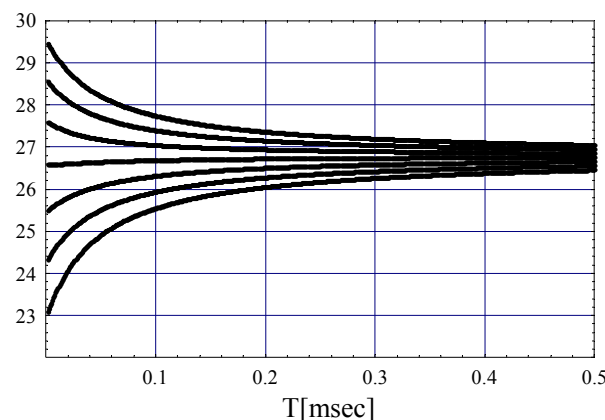


図3：加速中のビーム収束効果  
(横軸：時間T[ms]、縦軸：半径R[mm])

## 2. 2 パルス電磁石の試作と特性試験

パルス電磁石のスパイラル磁極とリターンヨークは、軌道平面上で2分割した2個の円筒材料をエンドミルで加工し製作した。磁極面は $\pm 50 \mu\text{m}$ の精度で加工した。軟磁性材料の加工性は良く、複雑なスパイラル形状の磁極加工は大きな問題なく終了した。但し、磁極端は加工により欠け易いので、量産時には最終磁極形状を圧縮整形により作成するのが望ましいと考える。図4に試作したパルス電磁石の全体組み立て写真と軌道平面で2分割した写真を示す。磁極側面の穴は磁場測定時にホール素子を挿入する為に設けた。図5にパルス電磁石の励磁電流と磁束密度の関係を示す。フルスペックの電流は250Aであるが、所有する電源の制約から50Aまで通電を実施した。周波数0.4kHz(磁場測定用ホール素子のバンド幅の上限)でも、磁場特性上の大きな問題は発生していない。軟磁性材料メーカーが出している材料物性値から、フルスペックで運転しても大きな磁場分

布の乱れは発生しないと考えている。なお、フルスペック時の磁石の温度上昇は60度程度と予想され、10分以上の長時間運転を実施するには空冷ファン等の冷却機構が必要になると考えている。

パルス磁界の分布測定は非常に難しく、動磁界を高精度に計算可能な磁界計算コードを用いた方が精度が出る可能性が高い。今回のプロト機はスパイラル偏向電磁石部分のみを試作したが、加速コアとスパイラル偏向電磁石を組み合わせた実機モデルの設計では、静磁界解析コードのみでなく、動磁界解析コードも併用して磁極設計を行う予定である。

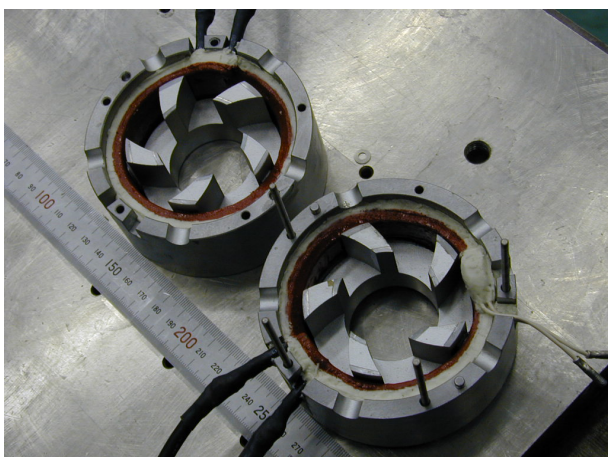
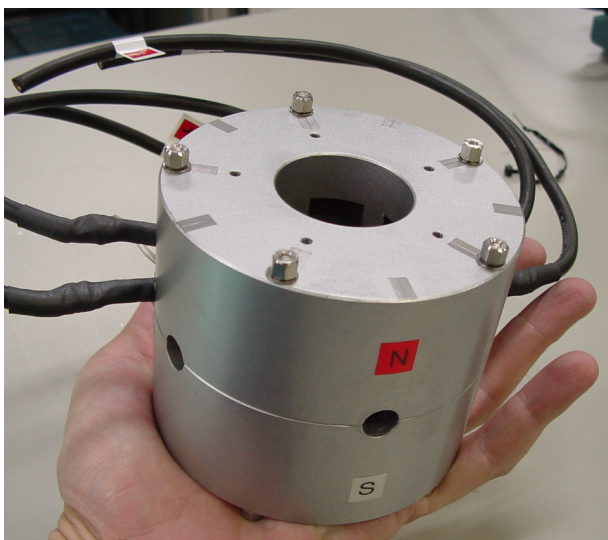


図4：試作したパルス電磁石の全体組み立て写真（上図）と軌道平面上での分解写真（下図）

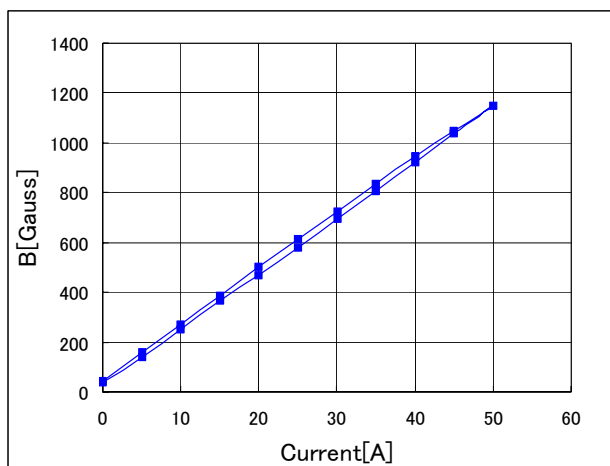


図5：パルス電磁石の励磁電流と磁束密度の関係

### 3 まとめ

パームトップ型電子加速器のパルス電磁石の設計、試作、磁場測定を実施した。繰り返し1 kHzのスパイラル形状パルス電磁石が製作可能である見通しを得た。パームトップ型電子加速器実現の為に、残る主要技術課題は、(1)薄肉真空ダクト、及び、(2)高繰り返しパルス電子銃の2点である。本加速器は高周波電源を必要とせず、IGBTを用いた簡単な電磁石電源で運転可能であり、量産時にはオーダレベルの低コスト化が可能であると考えている。

### 謝辞

本論文のパルス電磁石は日本原子力研究所のH15年度黎明研究の助成を受けて製作した。またパルス電磁石の製作は(株)トーキンマシナリーの尾形氏等が実施した。この場を借りて感謝致します。

### 参考文献

- [1] 田中博文他、医療・工業用ラップトップ円形誘導加速器の検討、日本物理学会第58回年次大会、(2003).
- [2] 田中博文他、FFAGとシンクロトロンハイブリッド加速手法、Proceedings of the 14<sup>th</sup> Symposium on Accelerator Science and Technology, p 78, (2003).
- [3] 田中博文他、ラップトップ型電子円形誘導加速器の研究、第8回黎明研究報告会、日本原子力研究所、p32、(2004).