

特 集 論 文

## 新型電子線照射装置の開発

A new type of electron accelerator for industrial applications

馬 場 隆\* 湯 浅 由 将\*  
T. Baba Y. Yuasa  
高 橋 正 幸\* 今 西 友 晴\*  
M. Takahashi T. Imanishi

### 概 要

電子線(EB)加速器は、電線・タイヤ・発泡など多くの工業分野で、材料改質のために使用されている。また、医療器具の殺菌にも広く用いられている。これらの市場で広く利用され、またさらに新しい応用分野を切り開いていくためには、装置は高い信頼性や高出力・小型・低コストであることが求められる。当社では、これらの要求にこたえるべく、次世代の電子線照射装置(EPS)として新しい電子加速器の開発を進めている。この加速器は、従来EPSとは全く異なる技術であるFFAG(Fixed Field Alternating Gradient)加速器技術によるもので、非常に高い可能性を秘めた加速器である。現在、開発機における基本検証を終え、事業化をみすえた装置開発に着手している。本稿ではこのFFAG加速器の試作成果について報告する。

### Synopsis

Electron Beam (EB) Accelerators have been used in the many industrial fields to improve physical properties of the material. Examples are wire and cable industries, rubber tire industries, foam industries, etc. EB is also widely used for medical device sterilization as a popular tool. High power, high reliability, compactness and low cost are key requirements to get popularity of the technology and to open up its application fields. The paper will present FFAG electron accelerator to meet these requirements that NHV Corporation recently developed and some of the interesting performance such as beam extraction efficiency will be discussed in the paper.

### 1. はじめに

電子加速器は、加速器の中でももっとも産業応用に用いられている加速器である。電線やタイヤなどの材料改質、医療用具の滅菌などが、主な応用例である。これらの産業応用向けの加速器の特徴として、高出力、高効率、高信頼性、省スペース、低価格などが求められる。電子加速器には、静電型加速器、線形加速器、円形加速器などの種類があるが、工業応用としては静電型加速器が一般的には用いられる。これは、工業応用で必要とされるエネルギー領域で、静電型加速器がもっとも高出力かつ高効率であるからである。一方で静電型であるがゆえに装置サイズはどうしても大きくなってしまいがちである。

2000年に高エネルギー加速器研究機構で500keVのpop-FFAGが開発<sup>(1)</sup>されて以来、FFAG加速器は各所で注目

されている加速器であるが、これら産業応用に対しても、FFAG加速器がこれらのニーズを満足する加速器になりうると、我々は期待している。そこで、可能性を見極めるために、我々は500keVのFFAG電子加速器を試作した。

### 2. FFAG 電子加速器試作機の概要

開発したFFAG加速器の仕様を表1にまとめ、装置の外観を図1に示す。

この加速器はFFAG技術の要素技術を研究開発する目的の試作機であり、

- ・小型化を目的としたスパイラル型電磁石の採用
- ・リングからのビーム取出の実施

などが特徴である。

\*(株)NHVコーポレーション

表1 試作機の仕様

Energy	50-500 keV
Cell number	6
K value	0.6
Radius	0.19-0.44 m
Packing factor	0.4
Spiral Angle	30 deg
Tune	1.3 / 1.2
Acceleration frequency	10 kHz
Duty	20 %
Outer diameter (size of acc.)	1.1 m

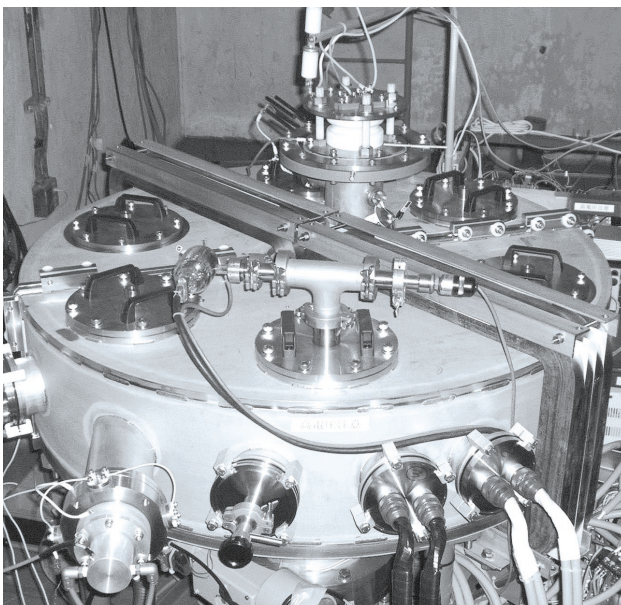


図1 開発したFFAG加速器

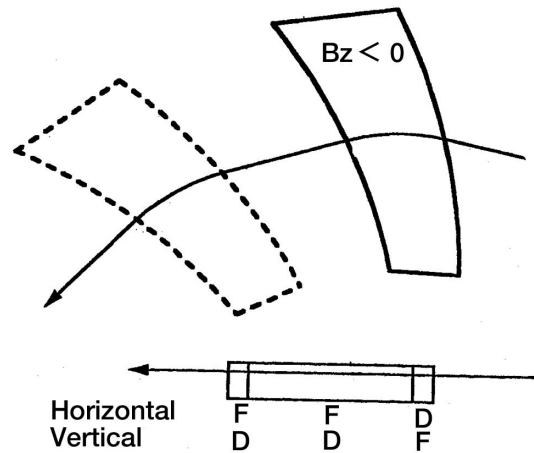


図2 磁場の概略図

スパイラル型電磁石ではいくつかの電磁石形状が提案されているが、我々はD. W. Kerstによって提案された形状<sup>(3)</sup>(図3)を採用した。電磁石のギャップが電磁石の半径に比例し大きくなるのが、この形状の特徴である。

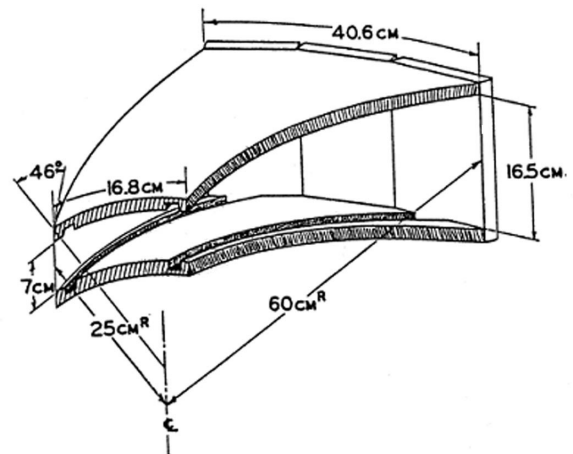


図3 カーストモデル<sup>(3)</sup>の概略形状

このカーストモデルの電磁石について、3次元磁場解析を実施した。このときの電磁石の仕様を表2に、3次元磁場解析結果の1例を図4に示す。図4(a)では、円周方向のZ方向磁場強度Bzの変化を絶対値で、図4(b)では規格化して示した。各半径での磁場分布形状が非常によく一致していることが図4(b)でわかる。

### 3. スパイラル型電磁石の設計

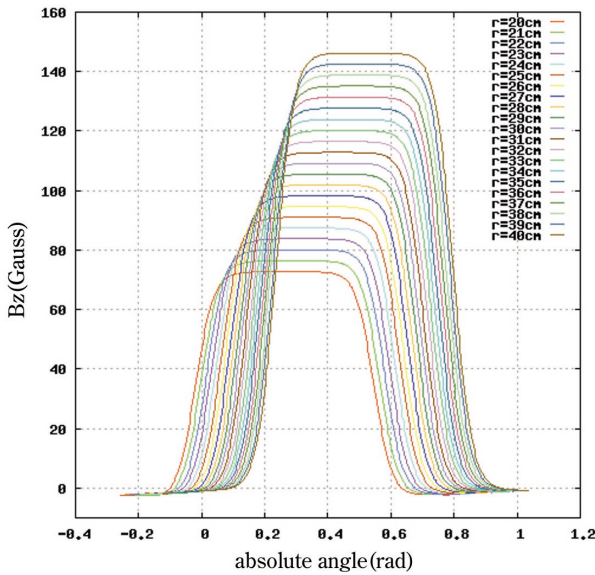
スパイラル型電磁石は、K. R. Symon等によって提案された<sup>(2)</sup>もので、必要な磁場は次式で示される。

$$B(r, \theta) = B_0 \left( \frac{r}{r_0} \right)^N \left[ 1 + \sin \{ N \theta - N \tan^{-1} n(r/r_0) \} \right]$$

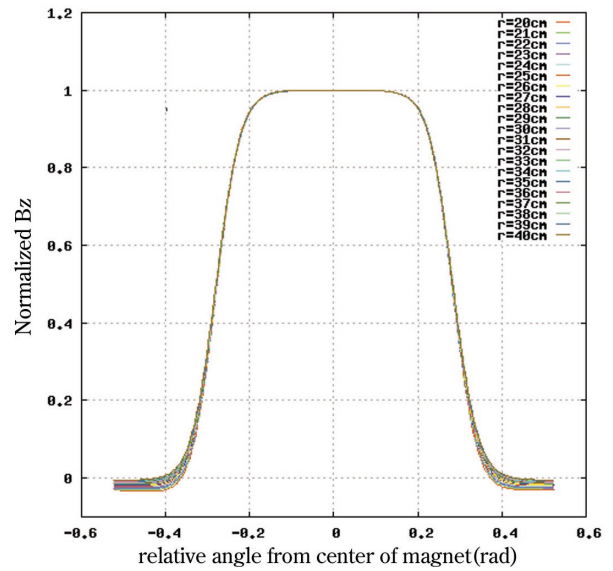
ここで、Nは円周上の磁場の周期で、実際には電磁石の数である。θは電磁石のスパイラル角を示している。磁場の形状とビームへの収束力及びビームの進行方向などを図2に示した。このようなスパイラル形状の電磁石を用いることで、1台の電磁石で大きなビーム偏向角度を得て、電磁石に対するビームの入出射角度も大きなものとなり、結果的に非常に強いビーム収束力を得ることが出来る。

表2 電磁石仕様

k-value	0.5
B <sub>0</sub> at R=20cm	74Gauss
Radius of Good Field Region	20 - 40 cm
Spiral Angle	40 deg
Angle of Magnet body	30 deg



(a)



(b)

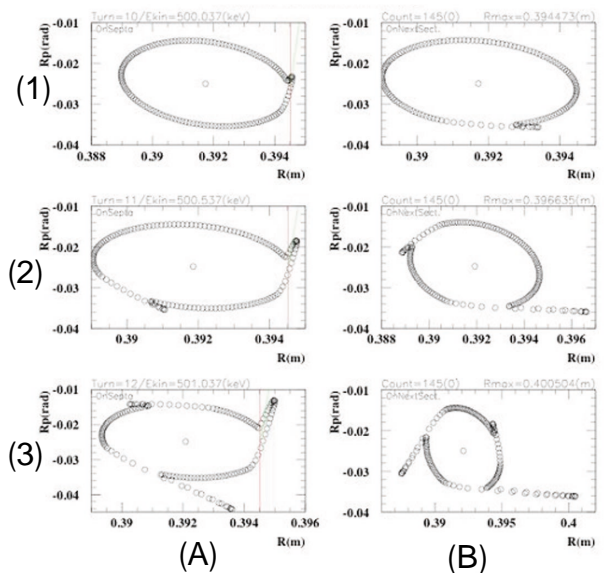
図4 3次元磁場解析結果

#### 4. 取り出し部の設計

設計条件から、加速電場が発生する時間は $20 \mu\text{sec}$ であり、ビームが入射から最大エネルギーまで加速するのに必要な時間は約 $5 \mu\text{sec}$ であるので、パルスビームの長さは $15 \mu\text{sec}$ である。500keVの電子の速度は光速の86%程度であり、従って、パルスビームの長さは最外周軌道の長さに対して十分に長い。これは、ビームのリングからの取り出しを考えた場合、DCビームを取り出すことと同義であることを意味している。また、ターンセパレーションは0.5mmと小さいので、一般的に用いられるキッカーなどを用いることは出来ない。そこで、取出システムにはマスレスセプタム<sup>(4)</sup>、静電型偏向器、磁場型偏向器の三つの偏向器を組み合わせて用いることとした。

マスレスセプタムは水平方向にTune Shiftを起こし、3次共鳴を起こすのに寄与している。図5に、ビーム軌道計算の結果を示す。電子ビームはマスレスセプタムによる3次共鳴で引き延ばされる。引き延ばされたビームは、その外側の部分を薄箔電極を用いた静電型偏向器によって、カットされ偏向される。1電磁石あたりの位相進み角度が約90度となっているので、マスレスセプタム位置での位相上の角度方向への蹴り出しが1セル進んだ位置で水平方向への蹴り出しに相当するので、この1電磁石進んだ位置に静電型偏向器をおく。静電型偏向器だけでは500keVエネルギーをもったビームを30度偏向することは困難であるので、さらに磁場型偏向器を用いて、両者で30度の偏向を実現している。図6に実際に取り出し

たビームの波形を示す。ビームの取出し効率は90%が得られた。



(A) マスレスセプタム位置での位相

(B) 静電型偏向器位置での位相

(1) 500keV近傍のある周回のビーム位相

(2) 次周回ビームの位相

(3) 次々周回ビームの位相

図5 ビーム軌道計算結果

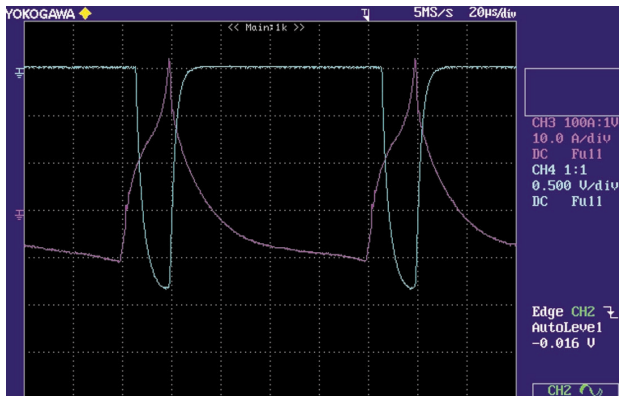


図6 リング外ファラディカップで計測されたビーム波形

## 5. おわりに

500keVのFFAG電子加速器を試作し、実際にビームを取り出すことに成功した。また、取り出したビームを輸

送りエネルギー分析も行い、所定のエネルギーが得られていることも確認済みである。今後は産業応用向け製品開発を行っていく予定である。

## 6. 謝辞

FFAG加速器の開発にあたり、京都大学原子炉実験所森義治教授に多岐にわたる技術指導をいただきました。ここに、心より感謝の意を表します。

### 参考文献

- (1) M. Aiba et al., Proc of EPAC 2000, Vienna, Austria, August (2000) 581
- (2) K. R. Symon et al., Phys. Rev. 103 (1956) 1837.
- (3) D. W. Kerst et al., Review of Science Instruments 31(1960) 1076.
- (4) Y. Yonemura et al., Proc of PAC 2003, Oregon, USA, May (2003) 1679

## 執筆紹介



**馬場 隆** Takashi Baba  
(株)NHVコーポレーション  
加速器事業部 主幹



**湯浅由將** Yoshimasa Yuasa  
(株)NHVコーポレーション  
加速器事業部  
開発部 主査



**高橋正幸** Masayuki Takahashi  
(株)NHVコーポレーション  
加速器事業部  
開発部



**今西友晴** Tomoharu Imanishi  
(株)NHVコーポレーション  
加速器事業部  
開発部