

FERRITE MAGNET FOCUSING SYSTEM FOR KLYSTRONS

Yasuhiro Fuwa^{#,A)}, Hideki Ikeda^{A)}, Ryunosuke Kitahara^{A)}, Yuji Nasu^{A)}, Hiromu Tongu^{A)}, Yoshihisa Iwashita^{A)}
Toshihiro Matsumoto^{B)}, Shinichiro Michizono^{B)}, Shigeki Fukuda^{B)}

^{A)} Institute for Chemical Research, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

A permanent magnet focusing system for klystrons is developed to improve reliability of RF supply and reduce power consumption. To save production cost, anisotropic ferrite magnets are used in this system. A test model has been fabricated and the power test of a 750 kW klystron with this focusing magnet is carried out. 60 % of the nominal output power has been achieved at a preliminary power test so far.

異方性フェライトを用いたクライストロン用集束磁石システム

1. はじめに

ILC の RF 供給方式の 1 つとして提案されている DKS (Distributed Klystron Scheme) では数千台の比較的小型のクライストロンをトンネル内部に配置することでコストの削減を目指している[1]。この方式では多数のクライストロンを使用するために個々の構成要素の故障率の低減が必須となる。特にクライストロンビームの集束に電磁石を使用する場合には、故障が発生しやすい電磁石電源・冷却水系がそれぞれのクライストロンに対して必要になるため、それらの故障率の低下が重要となる。そこで集束磁場を電磁石ではなく永久磁石を用いて発生させることができれば故障率を大幅に減らすことができる。さらに電源・冷却水が不要になることにより運転コストを低減することも可能となる。

そのためフェライト磁石を使用した大量生産可能なクライストロンビーム集束用の永久集束磁石を開発している。本稿では製作した永久集束磁石の基本設計ならびにこの磁石を用いた DKS クライストロンのパワーテストの結果を報告する。

2. 集束磁石の設計

2.1 磁石素材

永久磁石を用いたクライストロンビームの集束は過去にも研究されて来た。主なものとしてアルニコや希土類系磁石を用いたものが挙げられる[2,3,4]。ここでこれらの磁石と異方性フェライトの磁石としての特性を比較するため B-H カーブを図 1 に示す。希土類系磁石は確かに残留磁化・保磁力がともに大きいものの、高価であり供給も安定しているとはいえないため DKS で必要とされる大量生産に向いているとはいえない。また、アルニコはフェライトに比べて大きい残留磁化を有しているものの保磁力があまり大きいとはいえず自己減磁しやすいという欠点がある。クライストロンビームの集束には 1

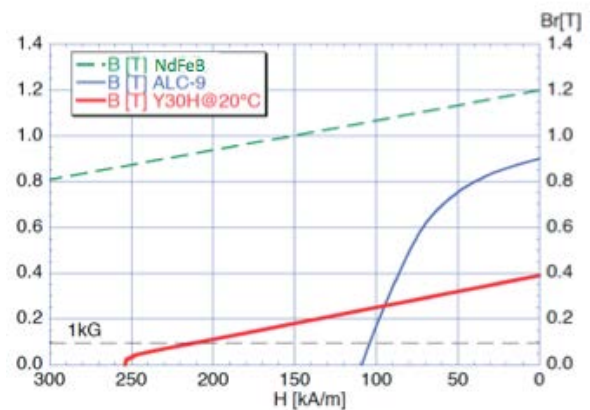


図 1 種々の永久磁石の B-H カーブ

kGauss 程度の磁場が発生できれば十分で、異方性フェライトは残留磁化・保磁力ともに十分な大きさであるといえる。さらに異方性フェライトは酸化鉄からなるために安価で供給も安定しているので大量生産も十分に可能である。

2.2 磁場の分布

永久磁石を用いたクライストロンビームの集束において PPM (Periodic Permanent Magnet) 方式が従来よく知られている。しかしながら、この方式では交代磁場を用いているためにビームの輸送においてエネルギー禁制帯が発生する。このことは CW 運転時にはあまり問題にはならないが、パルス運転時にはパルス立ち上がり時に禁制帯の通過を避けることができないためにビームのロスが生じクライストロン管壁に過熱を引き起こすことが問題視される[4]。

そこで、集束磁場には単方向の磁場分布が望ましい。この場合禁制帯は存在せず、パルス運転を行っても深刻なビームロスは起こらない。集束に必要な磁石強度は大きくないため、異方性フェライトで十分形成可能な磁場分布であるといえる。

2.3 磁石設計

磁石の設計には RADIA 4.29 [5,6]を用いた。採用した磁石とヨークの配置を図2に示す。この磁石は磁場の微調整も兼ねて可動となっていて、磁石を開いた状態でクライストロンを挿入しその後磁石間隔を閉めることができる(図3)。これにより磁石をクライストロンの管表面近くに磁石を配置でき、集束に必要な磁石を小さくすることができる。

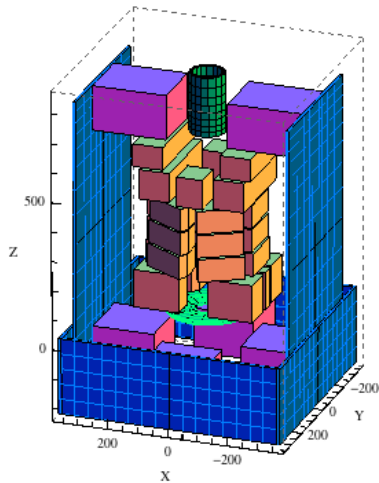


図2 永久磁石とヨークの配置



図3 クライストロン挿入前(上図)と挿入後(下図)の磁石位置。磁石を開けた状態でクライストロンを挿入し、その後閉じることで磁石をクライストロンに近づけられる。

3. 永久集束磁石を用いたパワーテスト

製作した集束磁石の性能を評価するため、実クライストロンを用いてパワーテストを行った。パワーテストに使用したクライストロンの外観と性能諸元を図4、表1にそれぞれ示す。また、パワーテスト時の磁場分布を図4、6に示す。座標軸の方向はzをビーム軸方向、その垂直面内にxy軸をとっている(図2参照)。図4がz方向の磁場であるが、カソード部では電磁石の磁場分布と十分に一致しているが中間部でやや磁場が弱く、出力空洞部付近で磁場が強くなっている。これは出力窓につながる導波管の下部のスペースが狭く、機械設計時に磁石の位置調整自由度を増やすことができなかつたことに起因している。この軸方向磁場分布を用いてDGUN[7]でシミュレーションを行った結果が図5である。この結果を見ると確かにビームは管壁にあたることなくコレクタ部に到達し、コレクタ部では十分にビームが広がっていることが分かる。しかしコレクタ部手前の出力空洞部でビーム径が細くなっていることが分かる。また、図7に横方向の磁場分布を示す。横方向の磁場分布は磁石位置の微調整により最大で10 Gauss程度に抑えている。磁場の再現性については磁石位置を1 mmの精度で合わせ込むと、磁場は10 Gaussの精度で再現することを確認している。



図4 パワーテストに使用したクライストロン (Toshiba E37501)

表1 E37501の性能諸元

周波数	1.3 GHz
最大出力	0.75 MW
最大効率	55 %
最大ゲイン	43 dB
最大パルス幅	1.5 msec
最大繰り返し周波数	5 Hz
最大ビーム電圧	66 kV
最大ビーム電流	50 A

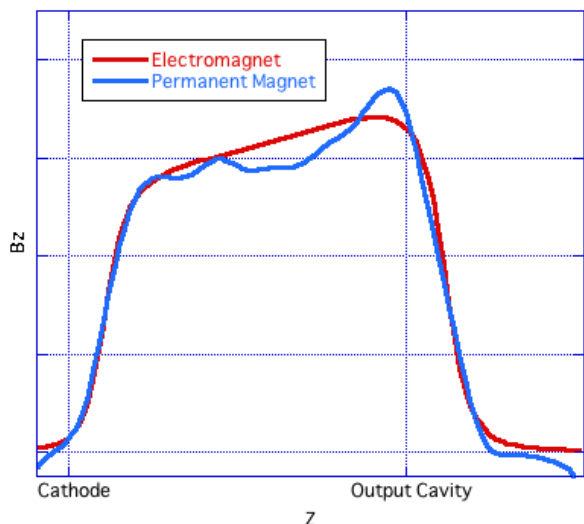


図5 ビーム軸上の磁場分布(ビーム軸方向)

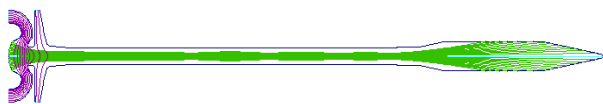


図6 測定された磁場分布を用いた DGUN シミュレーションの結果

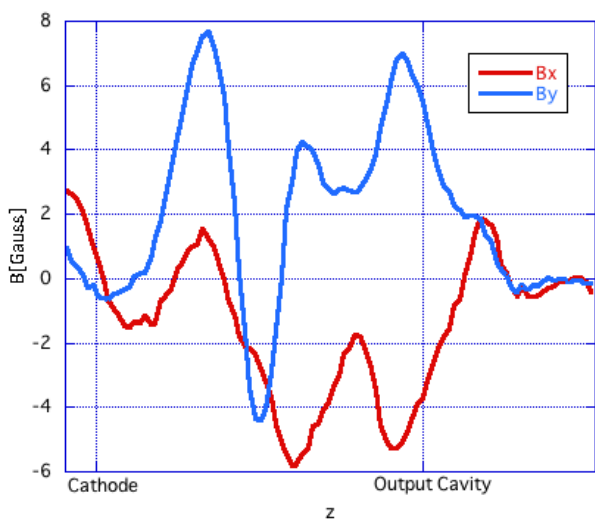


図7 ビーム軸上の磁場分布(横方向)

パワーテストはパルス幅 1 msec で、ビーム電圧は 45 kV から 65 kV の範囲で行った。図8に得られた出力の大きさとカソード電圧の関係を示す。赤のプロットが今回のパワーテストで得られた出力である。また、青のプロットは東芝電子管デバイスで実施された電磁石を使用した場合の出力を示している。緑のプロットは電磁石を使用した場合帯する今回の試験の結果の比である。これを見ると永久磁石を用いてビームを集束した場合カソード電圧 50 kV 以上ではほぼ一定して電磁石の場合の 60 % 程度の出力が得られたことがわかる。この差は主に出力空洞部でビーム径が細く、ビームと出力空洞のカップリング

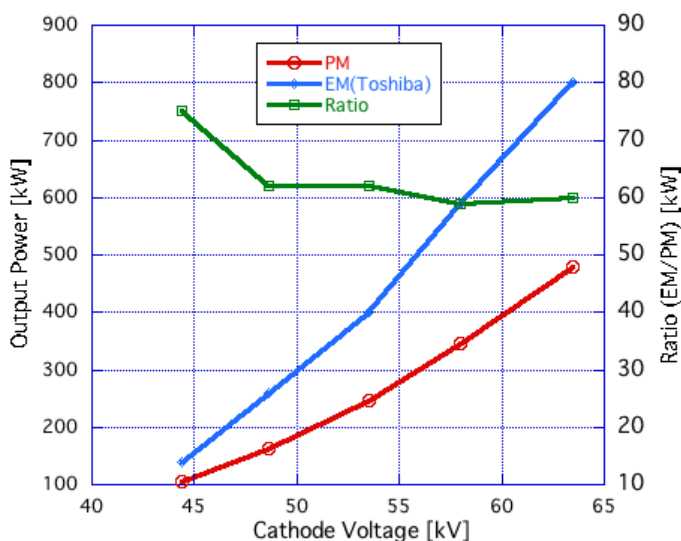


図8 得られた出力とカソード電圧の関係。赤は永久磁石を用いた場合、青は電磁石を使用した場合(東芝電子管デバイスにおいて測定)であり、緑のプロットはその比である。

が最適でないために生じたと考えられる。そのため磁石の自由度を増やすことで出力空洞部付近の磁場分布を電磁石のものに近づけるよう磁石の改良が必要と考えている。またカソードに電圧を印加した際にオイルタンク内部で起きていると思われる放電により 65 kV では安定な運転が困難であった。オイルタンクは永久集束磁石用に新たに設計したもので、磁石をクライストロンに近づけるためにタンクの直径を小さくしたために放電が起りやすくなったと考えられる。今後はこれらの問題点を改善し出力電力の向上を目指す予定である。

参考文献

- [1] S. Fukuda, Distributed RF Scheme (DRFS) – Newly Proposed HLRF Scheme for ILC, LINAC2010, Tsukuba, pp.112-114, 2010
- [2] Jane V. Lebacqz, Status Report on Klystron Improvements, IEEE, Trans., NS-22, 3 pp.1324-1327, June 1975
- [3] Fukuda, S., Shidara, T., Saito, Y., Hanaki, H., Nakao, K., Homma, H., Anami, S., Tanaka, J., PERFORMANCE OF HIGH POWER S BAND KLYSTRONS FOCUSED WITH PERMANENT MAGNET, 198624009 KEK-86-9, Feb 1987
- [4] S. Matsumoto, et al., STUDY OF PPM-FOCUSED X-BAND PLUSE KLYSTRON, Proc. Of LINAC 2006, Knoxville, pp.628-630
- [5] P. Elleaume, O. Chubar, J. Chavanne, Computing 3D Magnetic Field from Insertion Devices, proc. of the PAC97, May 1997, p. 3509-3511.
- [6] O. Chubar, P. Elleaume, J. Chavanne, A 3D Magnetostatics Computer Code For Insertion Devices, SRI97 Conf. Aug. 1997, J. Synchrotron Rad. (1998). 5, 481-484.
- [7] A Larionov, K. Ouglekov, "DGUN-code for simulation of intensive axial-symmetric electron beams", 6th ICAP, TU Darmstadt, Germany, 2000, p. 17.