

PERMANENT MAGNET FOCUSING FOR KLYSTRON

Y. Iwashita^{A)}, S. Fukuda^{B)}

^{A)} Kyoto University, Gokasho, Uji City, Kyoto 611-0011

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

Abstract

Applying permanent magnet technology to beam focusing in klystrons can reduce their power consumption and reliability. These features benefit variety of applications especially for large facilities that use number of klystrons such as ILC. A half scaled model is under fabrication for investigation of mechanical structure and the resulted magnetic field distribution. Research and Development status will be reported.

永久磁石によるクライストロン用集束磁石

1. 背景

ILC での DRFS 方式による RF 給電方式では、比較的小型のクライストロンを多数配置させることによりシステム全体のコストを低減させようとしている。数が必要になるため、個々のパーツの故障率を極限まで下げる必要がある。クライストロン自身は低出力化によるビーム電圧の低減、カソードや窓への負担軽減により長寿命化が見込まれている。一方、集束磁場が電磁石のままでは、八千台の電源を用意する必要があり、その故障率低減が課題となる。そこで、集束磁場を永久磁石によって発生させることにより、故障しうる電源や冷却水を不要とし、システム全体の可用性を高める方針が出されている^[1]。

すでに永久磁石素材に ALNICO や希土類系の磁石を使った先行例はあるが、大型クライストロン用に普及しているとは言い難い。ALNICO は残留磁化は強いものの、保磁力が弱いためカソード領域や、コレクター領域などの端部で反磁場により減磁しやすい。永久磁石は電磁石と違い、磁場方向に長い空間領域に磁場を生成する事が不得手であるため、磁場方向を単一方向にせず交代磁場にした Periodic Permanent Magnet (PPM)方式が TWT などでは実用化されている。PPM 方式を使って、大出力クライストロン用に希土類系の永久磁石を用いた開発も行われていたが、広く普及するまでには至っていない。この希土類系の永久磁石は残留磁化、保磁力共に非常に強いが、高価であり、また、最近の希土類素材の世界的需給のアンバランスにより、供給状況に難がある。一方フェライトの残留磁化は比較的弱いものの、異方性フェライト磁石の保磁力は ALNICO よりも大きく、減磁の心配が少ない。図 1 にそれぞれの磁石素材の B-Hカーブを示す。ビーム集束に必要な磁場は、軸上で 1 kG 以下であるため、フェライトでも十分発生可能である。

クライストロンビームの集束においてはカソード領域や、コレクター領域などの端部の磁場磁場分布は重要である。特に、カソード領域は効率や出力に影響するため注意深く設計する必要がある。コレクター領域に関してはコレクター内表面でビーム損失分布が局在化しないようにする必要がある。

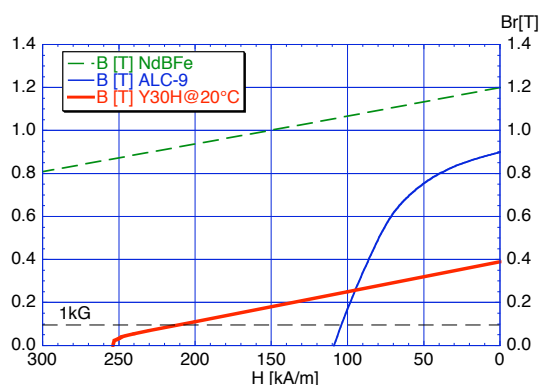


図 1: 希土類、ALNICO、フェライト磁石の B-H カーブ。希土類磁石は強いが高価、ALNICO は歴史有る素材で、かつ比較的残留磁化が大きいが保持力が弱い。異方性フェライト磁石は残留磁化があまり大きくないが保磁力は ALNICO よりも大きい。

2. 従来の方式

1960 年代には SLAC では永久磁石素材に ALNICO を使って実現させていた (図 2 参照)^[2]。ALNICO は 1940 年前後に開発された金属系の磁石で主に鋳造で製作される。温度係数が小さく、残留磁化は大きいものの、保持力が小さいため自己減磁しやすく、調整可能なものの管理が難しいという欠点がある。戦略物資である Co や Ni を用いているので、資源的な懸念もある。

永久磁石一般に言えることだが、常時磁場を発生しているので、メンテナンス時の取り扱いに注意が必要である。SLAC のもの場合は外部に多量の

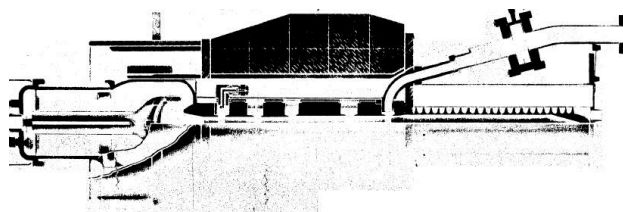


図 2: SLAC 2422 Klystron. 上半分黒い部分が磁石。

磁束を漏らすため、保管時に距離を離しておく等の処置が執られていた。

1980年代に KEK で行われた開発研究でも素材として ALNICO を使っているが、図3に示すように、形状が少し異なっている^[3]。SLACのものでは磁石の半径を変えて磁場分布を調整しているが、KEKでは直径25mm、長さ50mmの小型棒磁石を多数積み重ねた構造にし、一旦一様に着磁した後、部分的に減磁させて必要な分布に調整している。カソード領域の磁場分布は効率や出力に影響し、クライストロンの個性にも依るため、交換時に個別に調整が必要である。コレクター側は、ビームエネルギーを捨てる際に発熱密度がコレクター表面上で局所化しないようにする必要があり、集束作用が生じるような磁場分布を避ける必要がある。両者間の領域では磁場の軸対称性が保たれている必要がある。これが崩れた場合、その程度によってはビームが直進せず壁面に当たり失われる可能性があり、悪くすると、クライストロンを破壊する。

永久磁石では中心軸（一般に閉曲線）上の磁場の積分値はゼロになるため、どこかで必ず磁場の向きが反転する。カソードの高圧絶縁碍子や出力導波管などの突起物がなければ、磁石全体を長めに作ってこの反転領域をクライストロンの外に持つことが出来る。しかし突起物があるとむやみに内径が大きくなり更に長い構造ではコストに難点が生じる。

一方、最近では PPM(Periodic Permanent Magnet) 集束のものも開発されていた。これは交代磁場をつかうため、永久磁石には有利な磁場構造となるが、周期性からくるエネルギー禁制帯が存在する。パルスで運転する場合、パルスの立ち上がり時には必ずこの禁制帯を通過するため、この影響を極力減らす必要がある。しかし、ビーム mismatch は必ず起こるため、立ち上がり時間と、パルス幅のオーダーが同程度となるショートパルス運転時には特に注意が必要となり、ビームロスによる壁面過熱が深刻な問題になり安定な運転への障害となる[4]。

3. 異方性フェライト磁石による設計

そこで交代磁場ではなく、単方向磁場による集束を、これまでの異方性永久磁石開発のノウハウを活用し、希土類系、若しくはフェライト磁石による再設計で開発を行えば、高性能、高安定、低価格の集束系が出来る可能性があり、設計を進めている。この技術が実用化できれば ILC のみならず、多くの局面でクライストロンの集束コイルを置き換える可能性があり、省エネルギーにも寄与する。

ILCでは必要台数が多いため希土類磁石では原料の供給状況に不安がある。必要な磁場強度が大して高くないこともあり、フェライト磁石が適している。永久磁石を使った先行事例ではソレノイド電磁石との互換を想定して設計されているため、実は、無駄に多くの磁束を発生している。もっとも、本来磁場が必要な領域はビームが通る空間だけであるが、空洞や真空を保つために壁は必要であるため、実際には空洞部の外径程度までは磁場を発生させる必要

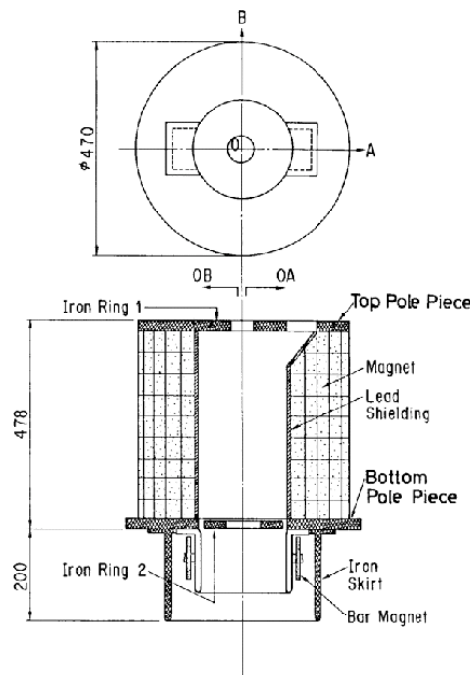


Fig. 2 Cut-away view of the permanent magnet.

図3: KEK で開発された永久磁石型クライストロン用集束磁石 (1987)

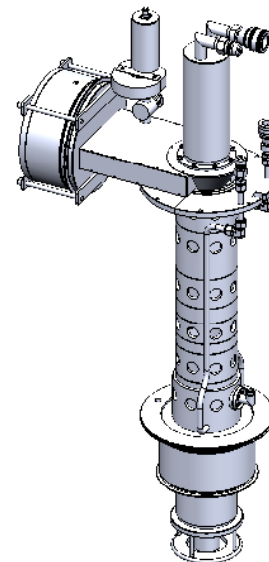


図4: 使用が検討されているクライストロン概形

がある。図4に示すクライストロン概形でわかるように、この径はカソードの高圧絶縁碍子などの径と比較して細い。ソレノイド電磁石を集束磁石として使う場合には、コイルを切るわけにいかないで筒形状のまま使わざるを得ない。組立の必要上、そのコイル内径を最大径に合わせる必要があるため、内径が大きくなる。この形状をそのまま永久磁石に当てはめると、磁石の必要体積が勢い大きくなる。いっぽう、永久磁石では所詮製造可能な磁石の大きさには制限があるため、組み合わせる必要がある。これを個別に可動にしておけば、クライストロ

ンの取り付け作業時にはカソード部分を通過させる空間を確保するように磁石を待避させ、使用時には、磁石を空洞壁に近づけることにより、必要な磁石の体積を減らすことが出来る。しかし、ソレノイド電磁石を使うことを想定して設計されたクライストロンは水配管など、永久磁石と相性の悪い部分がある。この点を改善すればさらにより設計が出来る可能性があるが、今回はここまで手が回らないこともあり、電磁石用クライストロンで出力テストが出来るような計画でR&Dを進めている。

磁場設計は RADIA4.29 を使用した^[5,6]。図5に現時点での形状を示す。多数の磁石を使っているが、大きく分けて二つの群に分けることが出来る。一つは、空洞部を取り巻いている磁石群で、これらの容易化軸はほぼ鉛直方向である。これらはクライストロンの挿入時に両側に待避させ、中央部の空間を広げる。このため、移動時に冷却パイプ等の突起物と干渉しないよう特に中央部は六角形になっている。上下端部分は突起が大きいため分割数が多くなっている。これら可動性を利用すれば磁場分布の調整も可能となる。

もう一つの群は、カソード領域とコレクター領域の磁場を整形するための最下部と最上部の大型直方体磁石と最下段のリング状磁石によりなっていて、これらは概ね水平面に容易化軸を持っている。この群の上部と下部はリターンヨークとなる鉄板で支えられる。コレクター部は逆転磁場が大きく出ないようにするため、磁気シールド用の鉄管を嵌める。この設計による磁場分布を目標分布と共に図6に示す。カソード領域とコレクター領域を合わせ込むことに注力して合わせ込んだため、それ以外の部分にはアバレが大きいが、さらに細かい微調をすれば改善も可能と思われる。現在ハーフスケールモデルの製作中で、これにより機械構造や、生成磁場に問題がないかチェックする予定である。

参考文献

- [1] 福田茂樹、STF における HLRF、技術検討会・2010年1月18日
- [2] Jean 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 PULSE 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 Conference May 1997, p.3509-3511.
- [6] O. Chubar, P. Elleaume, J. Chavanne, "A 3D Magnetostatics Computer Code for Insertion devices", SRI97 Conference August 1997, J. Synchrotron Rad. (1998). 5, 481-484

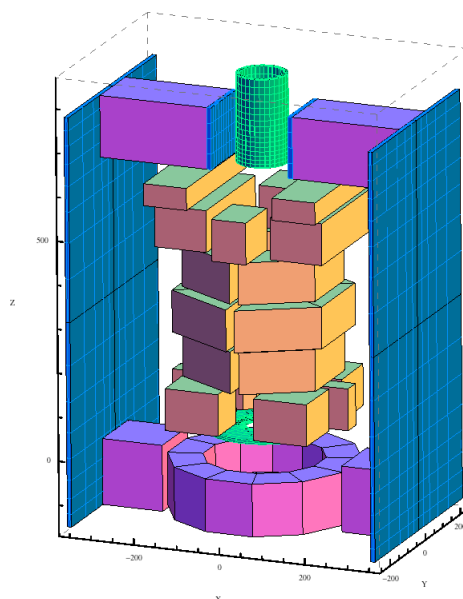


図5: RADIA4.29 を用いて設計したクライストロン用集束磁石

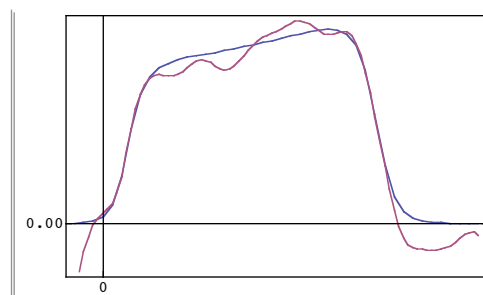


図6: 設計された磁場分布と目標分布 (なめらかな曲線)。

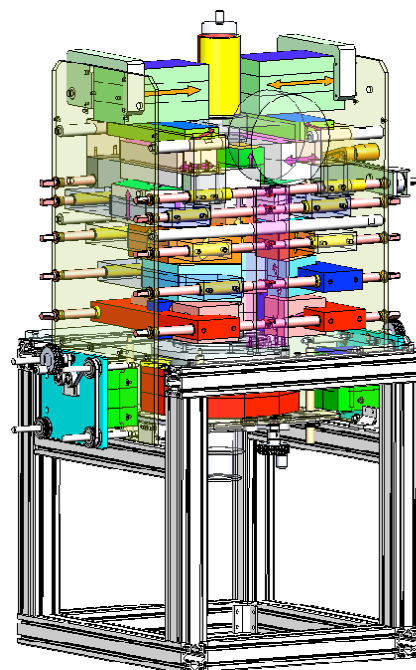


図7: ハーフスケールモデルの機械設計