

PERMANENT MAGNET QUADRUPOLES FOR DTL

H. OKAMOTO, M. SAWAMURA, Y. IWASHITA, M. INOUE and H. TAKEKOSHI

Institute for Chemical Research, Kyoto University

Abstract

The permanent magnet quadrupoles(PMQ) for 120 MeV proton DTL at Kyoto University were investigated. The 8-segmented PMQ of rectangular and trapezoid shape were designed to get optimum condition for focusing of proton beam which were calculated by PARMILA. The field measuring method is described.

1. はじめに

京大が中心になって推進中の将来計画”中間子科学総合研究センター”では、陽子をRFQで2MeVまで加速した後、Alvarez型Linacでさらに120MeVまで加速する。ドリフトチューブは、外径6cm、内径1cmで計148コを必要とし、各々に永久磁石によるQ磁石を入れる予定である。今回このQ磁石について様々な角度から検討したので、その結果について報告する。

2. 基本的な構造

ドリフトチューブの大きさを考えた場合、Q磁石の寸法はホルダーを除いて外径を3cm前後にする必要がある。16セグメントにすると1ピースの大きさがかなり小さいものになってしまい、以前の測定データからも各ピースの磁化方向のずれ等がかなり問題になるので、工作上的の便宜から今回8セグメントについて研究した。各ピースの形状については、台形断面のものに加えて、長方形断面をもつものについても検討した。(Fig. 1)

各々のボア内磁場は次のようになる。

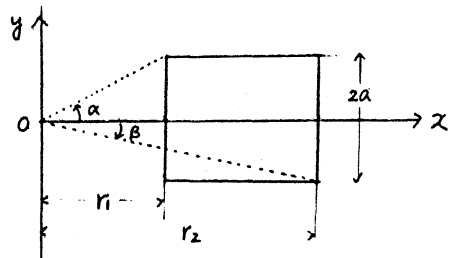
$$\text{台形TYPE} : \underline{B}^*(z_0) = \frac{8}{\pi} \underline{B}_r \sum_{\nu=0}^{\infty} \left(\frac{z_0}{r_1}\right)^{n-1} \cdot \frac{1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^{n-1}\right] \cos^n\left(\frac{\pi}{8}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{8}\right)$$

$$\text{長方形TYPE} : \underline{B}^*(z_0) = \frac{8}{\pi} \underline{B}_r \sum_{\nu=0}^{\infty} \left(\frac{z_0}{r_1}\right)^{n-1} \cdot \frac{1}{n-1} \left[\sin(n-1)\alpha \cdot \cos^{n-1}\alpha - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^{n-1} \sin(n-1)\beta \cos^{n-1}\beta \right]$$

\underline{B}_r : 残留磁化 r_1 : Bore Radius r_2 : Outer Radius

$\alpha = \text{TAN}^{-1}(a/r_1)$ $\beta = \text{TAN}^{-1}(a/r_2)$ $n = 2 + 8\nu$ $z_0 = x + iy$

高次成分の振幅は、主に $(r/r_1)^{n-1}$ で小さくなるので、ドリフトチューブの内半径5mmに対してQ磁石の内径は最小で6mmにとる。そうすると、理論的に予想される高次成分については全く考える必要がなく、実際に現れる他の高次成分もほとんど無視できる。



したがって基本的には、ビームダイナミクスの観点から必要な磁場勾配を計算し、与えられたスペース内でQ磁石を組んで、その磁場勾配を実現すればよいということになる。

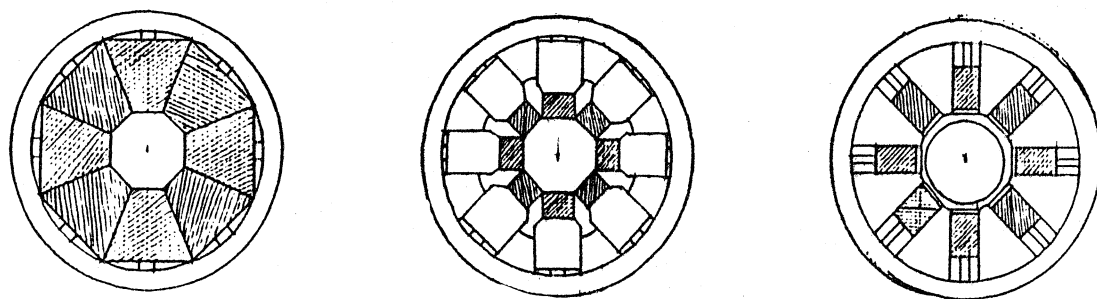


Fig.1 Q-magnetの形状

3. Beam Dynamics 及び 各parameterの計算

ビームの収束に必要なQ磁石の磁場勾配をシミュレーションコードPARMILAに基づいて計算した。当初は、軸長2.54 cm, 磁場勾配2.0 T/cmのQ磁石を考えていたが、外径15mm以下では2.0 T/cmの磁場勾配は実現が困難であるため、軸長4.0 cmとして磁場勾配の最適値を計算した。その結果、磁場勾配は1.5 T/cmが最も良いことが分かった。(Fig. 2)

今回使用する永久磁石は住友特殊金属の開発したNEOMAX-30H(ネオジム, 鉄, ボロン磁石)である。この磁石は残留磁束密度が1.1~1.2 Tと強力で、なおかつB-H曲線の特性も必要な範囲内ではほぼ線形で、Q磁石に最適なものである。以後の計算ではNEOMAXを念頭におき、 $B_r = 1.2$ T, 比透磁率1.1とした。内径を6 mmにした時の磁場勾配の変化は表1のようになる。この表からわかる通り、台形セグメントのQ磁石であれば外径15 mm以下で1.5 T/cmの磁場勾配を得ることが十分可能であると思われる。低エネルギー部では、ドリフトチューブの寸法上の制約からQ磁石の軸長を40 mm以上にはとれないため長方形セグメントのQ磁石は使えないが、ある程度高エネルギー部に移れば長方形のものを使うことができる。長方形セグメントは形状が簡単で工作し易いことに加えて、各ピースをずらして磁場の調整ができるという利点がある。またQ磁石の外径も、磁場勾配が小さいほど台形型のものとの差が小さくなり(Fig. 3), 台形ピースを使うより長方形ピースを使ったほうが使用される磁石の量をかなり少なくできるのでコストの面でも有利である。

各ピースを半径方向に均一にずらした場合の計算されたボア内磁場の様子をFig. 4

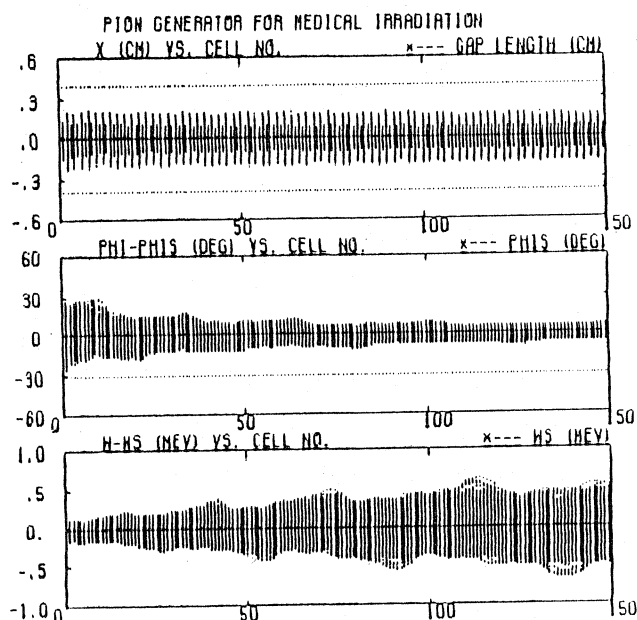


Fig.2 PARMILAの結果
(Gradient 1.5T/cm 軸長40mm)

に示す。高次成分は四重極に対して10倍の倍率でとってある。この図からもわかるように、高次成分はQ磁石の内面から僅かに内側に入っただけで急速に小さくなる。またこの場合、各ピースのずれを0.83mmにすると高次成分をさらに小さくできることが分かる。

今回試作したQ磁石では止めネジで各ピースの位置を調整できる構造になっているが、実際にドリフトチューブに入れる場合はネジは使わず、薄いシムを使ってその位置を微調する。(Fig. 1)

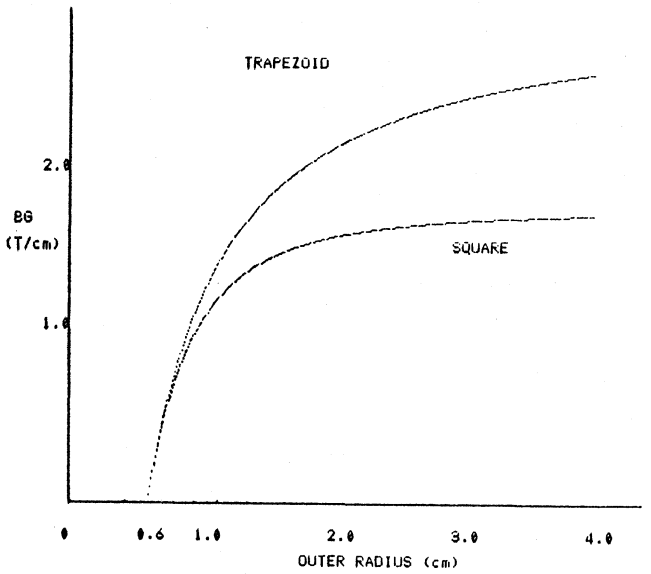


Fig.3 外径による勾配変化

4. 測定

Q磁石のボア内磁場の測定は回転コイル法による。コイルは、厚さ1.1cmのガラス板上に5μmのピッチで幅5μmの銅線を蒸着し、金メッキを施したものを使用する。なお、巻き数が9巻きのもの(幅3.6mm)と16巻きのもの(幅2.7mm)のものを一枚の基板の上に蒸着してある。コイルからの出力はAD変換され

FFTにかけて解析する。測定は現在進行中である。Q磁石の磁場中心は一般に双極子成分がない点として定義される。以前の装置ではQ磁石をテーブルに固定して、そのテーブルをx-y方向に少しずつずらしながら中心点をサーチしていたが、今回は解析的にQ磁石の中心を計算している。コイルの回転軸を原点としたとき、Q磁石の中心位置 $\underline{z} = \Delta x + i\Delta y$ は、一次の逐次近似により次の式で計算される。($\underline{\quad}$ 付きの記号は複素数である。)

$$\underline{z} = -R_{coil} \cdot \left(\frac{\underline{F}_1^*}{\underline{F}_2^*} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\underline{F}_{1n}^*}{\underline{F}_{2n}^*} \right)$$

ここで R_{coil} は使用したコイルの幅で \underline{F} は次のように定義される。

コイルからの出力を複素フーリエ変換した時の第n次の項の実数部を F_{cn} 、虚数部を F_{sn} とすると、

$$\underline{F}_n^* = F_{cn} - iF_{sn} \quad (n \geq 1)$$

$$\underline{F}_{mn}^* = \left(\frac{R_{coil}}{\underline{z}_n} \right)^{m-1} \sum_{l=m}^{\infty} \underline{F}_l^* e^{-l} C_{m-1} \left(\frac{\underline{z}_n}{R_{coil}} \right)^{l-1}$$

$$\left(\underline{z}_n = \sum_{k=1}^m \underline{z}'_k, \quad \underline{z}'_k = -R_{coil} \frac{\underline{F}_{1,k-1}^*}{\underline{F}_{2,k-1}^*}, \quad \underline{F}_{n0}^* = \underline{F}_n^* \text{ とする} \right)$$

この解析により、ボアの任意の位置にコイルをさし込んで測定した結果からただちにQ磁石の磁場中心が計算され、同時に磁場中心のまわりで展開した場合のすべてのフーリエ成分が決定される。

5. 結論

Alvarez Linacに使用するQ磁石がデザインされた。Q磁石の軸長は4c

m, 磁場勾配は1.5 T/cmが最適値である。しかし、工作、組み立て、さらにその特性を考慮すると、長方形ピースを使用したQ磁石のほうが台形ピースを使ったものより簡便であるので、高エネルギー部では軸長を長くした長方形ピースを利用することも考える必要があると思われる。

外径(mm)→	15	14	13	12
台形(T/cm)	1.76	1.67	1.58	1.46
長方形(T/cm)	1.40	1.36	1.30	1.23

表 1

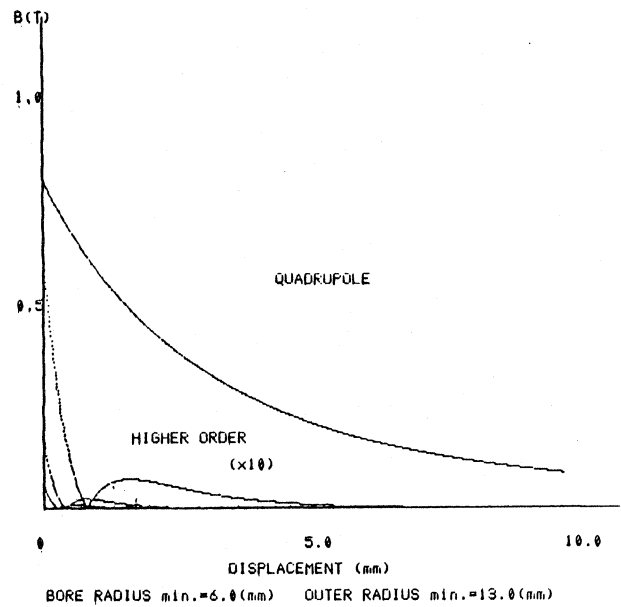


Fig.4 β^2 - λ のずれと磁場の関係

reference

- 1) K. H. Halbach, Nucl. Instr. & Meth. 169(1980) 1-10
- 2) Y. Ikeda, Y. Katayama, Y. Iwashita, Bull. of Inst. for Chem. Reseach Kyoto Univ. vol. 62, No. 1 (1984)
- 3) L. Smith and R. Gluckstern, Rev. of Sci. Instr. vol. 26, No. 2 (1955)
- 4) 住友特殊金属 'NEOMAX 技術資料
- 5) J. E. Stovall, MP. Division Internal Report, MP-3-38, 3 (1968)
Los Alamos Nat'l. Lab.