

## 1 GeV リニアック検討資料

## 1 GEV LINAC DESIGN NOTE

題目(TITLE) **Design of MEBT Short Q-magnets with Large Bores using MAFIA**

**for the JHP Proton Linac**

著者(AUTHOR) 吉野 一男

## 概要(ABSTRACT)

本稿では、RFQで加速されたビームをDTLに輸送するビームライン (MEBT) に使用する四極電磁石の設計について述べる。これらの四極電磁石は、長さがボア径に比べて1.4~2倍程度と短く、漏れ磁場が多くなるので、その分、高次極成分が多く混入することが予想される。そこで、通常のPOISSONを使った2次元磁場解析では、十分に把握できないので、MAFIAを使った3次元磁場解析を行い、高次極成分を減少させる磁極形状を求めた。解析結果によると、ビーム軸方向で平均化した磁場勾配の分布は、ボア径において $1 \times 10^{-3}$ 以内に収まった。

KEY WORDS: Ion Source, RFQ, DTL, Magnet, Monitor, Beam Dynamics, Transport, Vacuum, Cooling, Klystron, Low Level RF, High Power RF, Modulator, Control, Operation, Radiation, Others

# Design of MEBT Short Q-magnets with Large Bores using MAFIA for the JHP Proton Linac

Kazuo YOSHINO, Takao KATO, Akira UENO and Yoshishige YAMAZAKI  
 National Laboratory for High Energy Physics, KEK  
 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305, Japan

## ABSTRACT

A radio-frequency quadrupole (RFQ) linac and a drift-tube linac (DTL) are under development for the 1-GeV high-intensity proton linac of the JHP. The design of quadrupole magnets to be used in the medium-energy beam transport line (MEBT) from RFQ to DTL is described in this paper. Since the quadrupole magnets are short, being comparable to (1.4 to 2 times as long as) the bore diameter, the leakage flux along the beam axis is quite significant. Therefore, the multipole components of magnetic fields arising from the leakage flux should be minimized by choosing the pole-piece shape on the basis of the three-dimensional analysis. The integral of the field gradient along the beam axis could be flattened within  $1 \times 10^{-3}$  from the beam center to the bore radius.

ボア径に比べて長さの短い四極磁石のMAFIAを使った設計

### 1. はじめに

大型ハドロン計画(JHP)の大強度1 GeV陽子リニアックにおいて、高周波四極リニアック(432-MHz RFQ)と永久四極磁石を用いたアルバレ型リニアック(432-MHz DTL)を開発している<sup>1,2)</sup>。本RFQでは、50 keVで入射されたH<sup>-</sup>ビームを3 MeVまで加速する。RFQからDTLにビームを輸送するためのビームライン(The medium-energy beam transport: MEBT)について、新たに開発した多粒子ビーム・シミュレーション・コードを使い、ビームが1 GeVに加速される迄のエミッタンス・グロースを考慮した設計が行われた<sup>3)</sup>。

本MEBTでは、RFQで加速されたビームのエネルギーと横方向エミッタンスの測定を行うために、途中でエネルギー分析電磁石を設けてビームを偏向し、エミッタンス・モニターへと導く予定である。そこで図1に示すように、四極電磁石が8台、エネルギー分析電磁石が1台、バンチャー空洞が1台、そしてゲート・バルブが2台の構成となる。このように設計されたMEBT内でのビーム最大径の計算値は、約φ20 mmとなったので、アライメントエラー等によるビームの損失を少なくするために、四極電磁石のボア径をそれより大きめに設定することにした。一方、図1から解かるように、磁石を設置する空間に余裕が少ないので、四極電磁石のビーム軸方向の長さを、できるだけ短くする必要がある。以上の事から、四極電磁石の主要パラメータであるボア径と最大磁場勾配を、各々、φ35 mm、43 T/mと仮

定して設計を行った。また、四極電磁石のビーム軸方向の長さは、50、60、70 mmの三種とし、50 mmの磁石についてはエミッタンス・モニターに接続する真空ダクトに当たらないようにしたので、周方向の長さの違う三種類となる。このようにビーム軸方向長さがボア径の1.4~2倍程度の短い磁石では、ビーム軸方向への漏れ磁場の割合が大きくなり、高次極成分の混入が多くなると予想されるので、2次元の磁場解析だけでは十分に把握できない。そこで、MAFIA<sup>4)</sup>を使った3次元磁場解析を行い、高次極成分を減少させる磁極形状を求めることにした。本稿では、その設計結果について述べる。なお、電磁石電源については、安価で信頼性の高いものが手に入る市販の直流電源を使用することにした。

### 2. POISSONを用いた2次元磁場解析

まず、最も大きな磁場勾配を必要とする四極磁石(QD4)について、POISSON<sup>5)</sup>を用いた2次元磁場解析を行った。この解析によって、最大磁場勾配の設定値(43 T/m)が実現できるような磁石の大まかな形状を検討した。この四極磁石の最も厳しい設計条件は、磁石(QF4)との間におけるコイルの出っ張りを、干渉が起きない量(20 mm前後)に押えることである。この条件を満たすコイルとして、薄いホロコンダクター(外寸3.96×5.99 mm、肉厚1.22 mm)を選んだ。このホロコンダクターで十分に冷却できる範囲内の最大の電流値(300 A)を算出して、電磁石の電源を選定した。(最大電流密度16.9 A/mm<sup>2</sup>)。この解析で求めた磁石形状を図2に示す。磁極先端の形状は、双曲線(2XY=17.5<sup>2</sup>)であり、コイルは、磁極当たり21ターン巻かれている。図3に、磁束勾配G(r=4.5 mm)の励磁電流に対する依存性を示す。ここで、G<sub>0</sub>は磁場の漏

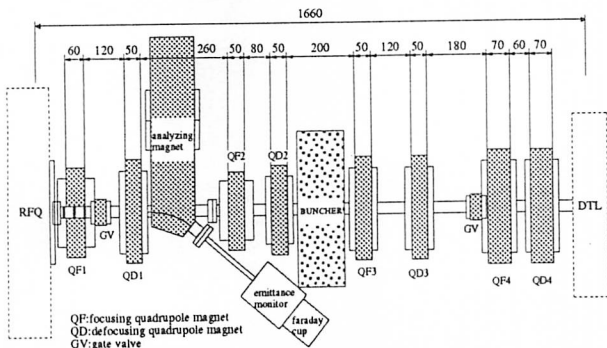


図1 JHP-MEBTにおける各コンポーネントの配置

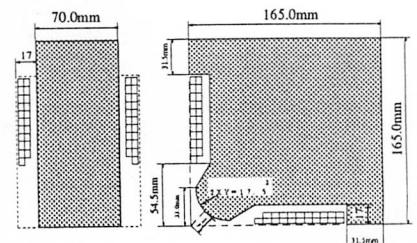


図2 最大磁場勾配が必要な磁石(QD4)の形状

れと磁極の飽和がないと仮定した場合の理想値を表す。30Aから設計値の249Aまでの範囲では磁場の強さが、0.7%の低下にとどまっているので、磁極の飽和は少ない。また、図4で示すように、磁場勾配はビーム軸からボア半径迄の領域まで、 $10^{-4}$ 以内に様に分布している。ここで、磁極の中心付近の磁場の乱れは、磁束密度のゼロによる計算誤差と考えられる。

以上の2次元解析から、最大磁場勾配の設定値は、磁極の飽和が少なく、 $10^{-4}$ 以内の平坦度で実現できることが確認できた。又、最大電流値(300A, 49.1 T/m)については、磁極の飽和現象が表れ始めているが、その割合が少ないので、図4に示すように磁場勾配の分布の劣化は少ない。

### 3. MAFIAを用いた3次元磁場解析

3次元磁場では、ボア径に対するビーム軸方向の磁石長が短いほど、磁場勾配の分布が悪くなると予想される。そこで、本MEBTにおいて、最も短い磁石(50mm)における半径方向の磁束勾配(GL)の分布を図5に示した。実際には、ビームに対する束束効果は、ビーム軸方向の磁場勾配の積分値であるので、3次元解析においては、磁場勾配は積分値( $GL = \int_{-\infty}^{\infty} G(z) dz$ )で表示した。解析はボール形状が双曲線の場合とシム付の円に置き換えた場合の二種類行なった。磁極が双曲線の場合、2次元での平坦度は、ボア半径において $10^{-4}$ 以内に収まっていたが、3次元では $10^{-2}$ まで落ちている。これは2次元の磁場解析は、磁石が長手方向に無限に長いモデルに対して行われているが、実際は有限な長さであって、3次元ではビーム軸方向に磁束が漏れている割合が多くなって、高次極成分が増大していると考えられる。そのため、双曲線の終端に色々な形状のシムを付けて、3次元解析を行ったが、ビーム軸中心から始まっている磁場勾配の落ち込みは改善できなかった。次に、磁極の形状を図6に示すような円に置き換えると、図5で示したように中心からの磁場の落ち込みが改善され、平坦度もボア半径において $1 \times 10^{-3}$ 以内まで改善されている。従って本ビームラインの全四極電磁石のボール形状は、双曲線ではなく、シム付の円に置き換えた。

この形状で、ビーム軸方向における漏れ磁場の程度を見るため、ビーム軸方向への磁場勾配( $r=0$ )の変化を磁石長毎に示した(図7)。図によると、磁石長が短くなるほど磁極内での磁場勾配の落ち込みが大きく、磁石端ではそれぞれ75~77%と同程度となり、端から離れるに従って漏れ磁場の割合が多くなっている。各々の磁石において磁場勾配が10%以下になる位置は、磁石長70mmでは磁石端から25.5mm、60mmでは26.5mm、50mmでは26.2mmとなる。このように、磁石長が替わっても磁場の漏れる範囲が同程度なので、磁石長が短くなるほど、軸方向の磁場勾配の積分値に含まれる漏れ磁場の割合が大きくなるのがわかる。

次に、磁束勾配( $GL(r=0)$ )の励磁電流に対する依存性を図8-Aに示した。ここで、 $G_0L$ は、磁場の漏れと磁極の飽和がないと仮定した場合の理想値 $G_0$ を各磁石長で平均化した値( $G_0L = G_0 \times \text{Magnet Length}$ )を表す。又、ボア半径領域における磁場勾配平坦度の励磁電流に対する依

存性を図8-Bに示した。ここで磁場勾配の平坦度は、ボア半径において、GLをボアの中心の磁場勾配 $GL(r=0)$ で平均化した値を表す。前述のごとく、磁石長が短くなるほど、GLに含まれる漏れ磁場の割合が大きくなるため、GLは理想値 $G_0L$ に対して最大で36%高くなっている。磁場勾配の平坦度も、磁束漏れの割合が大きいために磁極内の高次極成分が増えて、悪くなっている。電流値を上げていくと、理論値に対する磁場の強さが5~15%低くなり、平坦度も悪くなっている。特に200A付近を越えていくと急激に変化するものは、鉄芯が飽和に近づきつつあるせいだと考えられる。従って、250A前後の設計電流値では、三次元解析においては二次元解析より飽和の影響が多く見える。しかし、GLが、理論値の1.1~1.36倍になるので、実際に必要な磁場の強さが200A付近の運転電流で実現できると考えられる。そこで、各磁石のGLをそれぞれの磁石長で平均化した磁束勾配Gを基に、必要な電流値等を三次元の結果から算出した。それらを表1に示す。表1から、鉄芯が飽和傾向を示し始める前の電流範囲において、本磁石を運転できることが確認できた。

### 4. 結論

本MEBTのように設置空間に制限のある四極磁石においては、ボア径に対する磁石長を短くする必要が生じる。そのため、ビーム軸方向への漏れ磁場の割合が多くなり、高次極成分の混入が多くなることが予想される。

そこで、MAFIAを使って三次元磁場解析を行ない、本ビームラインの全四重極磁石の設計を行った。そして、ビーム軸方向の磁場勾配の積分値(GL)の半径分布が、より平坦になる磁極形状を求めると、双曲線ではなく円(シム付)にした場合に最適であった。その結果、ボア半径において $1 \times 10^{-3}$ 以内に収まった。

磁場勾配積分値GLとその半径方向分布の励磁電流に対する依存性を求めた結果、二次元の磁場解析で算出された値より飽和の影響が大きかった。それでも、GLは、理想値(磁場の漏れと磁極の飽和がないと仮定した値) $G_0L$ の1.1~1.36倍になるので、各磁石に必要な磁場の強さが200A付近の電流範囲で実現できるため、この電流範囲内では、本磁石を励磁しても、鉄芯の飽和傾向が少ないことが解かった。以上の結果より、本ビームライン用の電磁石としては十分な性能が確保できると考えられる。今後は、磁石のビーム軸方向への磁場の漏れが大きいために解かったので、MAFIAを使って磁石間の磁場干渉の程度を把握すると共に、実際に製作した磁石の磁場測定を行って、本結果と比較する予定である。

### 参考文献

- 1) Y. Yamazaki and M. Kihara, Proc. 1990 Lin. Accel. Conf., LANL report, LA-12004-C, 1991, pp.543-547.
- 2) F. Naito et al., "JHP 1 GeV 陽子リニアックの構成要素の開発", this meeting.
- 3) T. Kato, to be published in this proceedings.
- 4) T. Weiland, Part. Accel. 17 (1985) 227.
- 5) K. Halbach et al., Part. Accel. 7(1976)213.

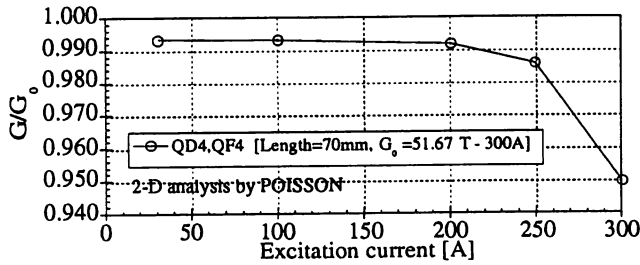


図3 磁束勾配  $G(r=4.5\text{mm})$  の励磁電流に対する依存性  
ここで、 $G_0$ は磁場の漏れと磁極の飽和がないと仮定した場合の理想値を表す。

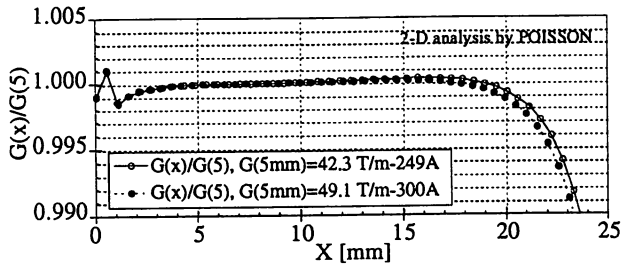


図4 本MEBTにおいて、最大の磁束勾配を必要とする磁石(QD4,  $L=70\text{mm}$ )における半径方向の磁束勾配の分布図。

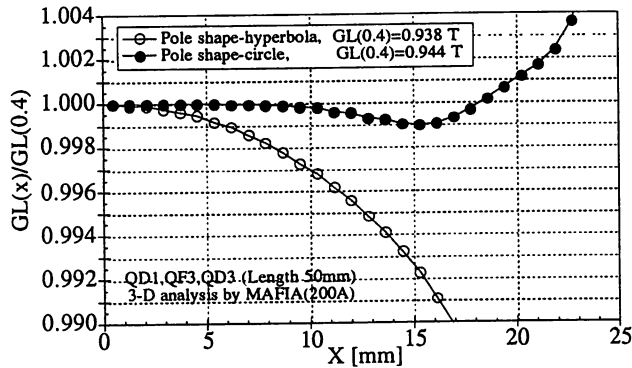


図5 本MEBTにおいて、最も短い磁石(50mm)における半径方向の磁束勾配( $GL$ )の分布図。ここで、 $GL$ は磁束勾配 $G$ のビーム軸方向への積分値 ( $GL = \int_{-\infty}^{\infty} G(z) dz$ )を表す。

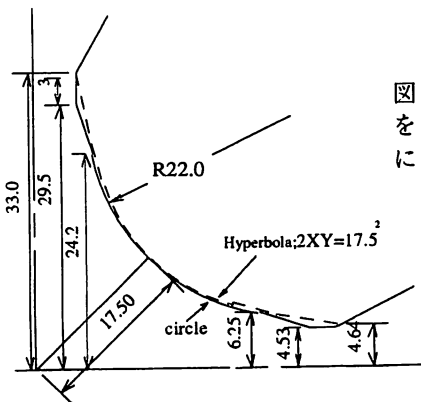


図6 磁極先端を円(シム付)にした形状

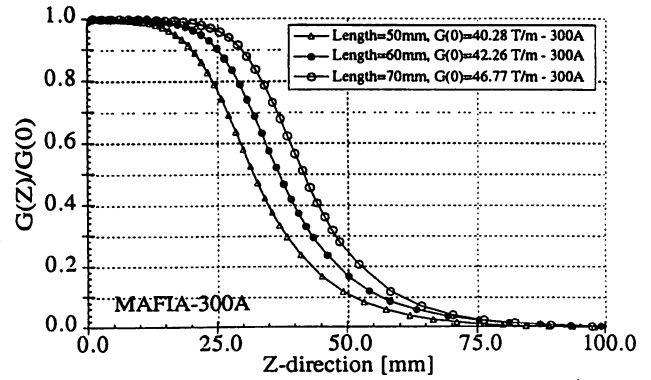


図7 ビーム軸方向への磁束勾配 $G(r=0)$ の変化

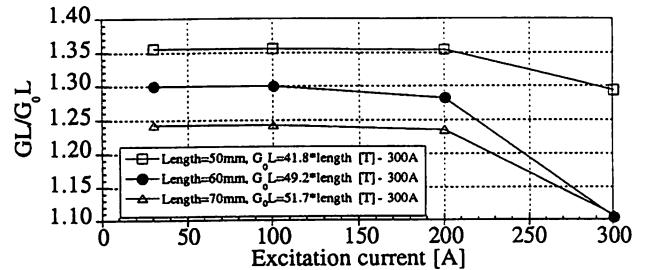


図8-A 磁束勾配 $GL(r=0)$ の励磁電流に対する依存性。  
ここで、 $G_0L$ は磁場の漏れと磁極の飽和がないと仮定した場合の理想値 $G_0$ を各磁石長で平均化した値( $G_0L = G_0 \times \text{Magnet Length}$ )を表す。

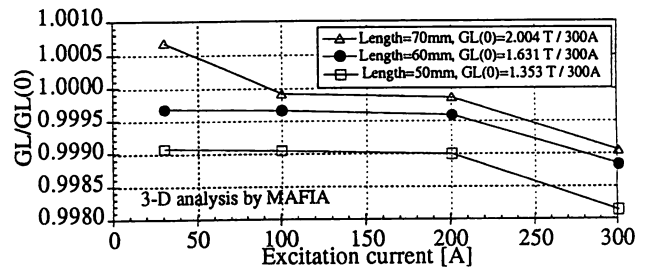


図8-B ボア半径領域における磁束勾配平坦度の励磁電流に対する依存性。

	QF1	QD1, QF3, QD3	QF2	QD4, QF4	QD2
(1) Mechanical					
bore diameter	[mm]	35	35	35	35
core length	[mm]	60	50	50	70
tum number of coil [turns/pole]		20	17	14	21
(2) Electric, magnetic and thermal					
current	[A]	185	177	181	202
field gradient	[T/m]	38.9	33.5	28.2	42.9
max field gradient(300A) [T/m]		54.4	54.1	46.1	57.3
field effective range	[mm]	$\pm 10$	$\pm 10$	$\pm 10$	$\pm 10$
resistance	[m $\Omega$ ]	30.3	26.8	18.2	38.8
inductance	[mH]	60	40	17	94
$\Delta T$	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	13.3	12.0	8.4	18.8
flow rate of water	[liter/min]	1.88	1.88	1.88	1.88
number of water circuits		4	4	4	4
water pressure drop	[kg/cm $^2$ ]	2.4	2.2	1.5	3.0

Table 1 Parameters of the quadrupole magnets