

20-P30

Development of MEBT Q-magnets for the JHP 1-GeV Proton Linac

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

ABSTRACT

A radio-frequency quadrupole linac (RFQ) and a drift-tube linac (DTL) are under development for the 1-GeV high-intensity proton linac of the Japanese Hadron Project (JHP). We developed several quadrupole magnets to be used in the medium energy beam transport line (MEBT) between RFQ and DTL. 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. In order to minimize the multipole components of magnetic fields arising from the leakage flux, the pole-piece shape were determined on the basis of the three-dimensional analysis by using the MAFIA code package. In this paper, we describe the empirical results of the magnetic field measurements of the quadrupole magnets. Each of the multipole components is less than 0.3 % of the quadrupole component.

JHP-1GeV陽子リニアックのMEBT用四極電磁石の開発

1. はじめに

大型ハドロン計画(JHP)用大強度1GeV陽子リニアックの初段加速部として、共振周波数432MHzの3MeV高周波四極リニアック(RFQ)と5.4MeVドリフト・チューブリニアック(DTL)の開発が行われている。RFQからDTLへビームを輸送するトランスポート・ライン (medium energy beam transport line: MEBT) は、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1GeV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¹⁾。今回その設計に基づいて、MEBT用の四極電磁石の開発を行った。

始めに本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、途中にエネルギー分析電磁石を設けてビームを11度偏向し、エミッタンス・モニターへと導く。その後、エミッタンス・モニターを取り除き、RFQからDTLへのビーム輸送ラインとして、図1に示すように、四極電磁石が8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。以上の事を考慮に入れ設計されたMEBT内でのビーム最大径の計算値は、約φ20mmとなるので、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、φ35mm、43T/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、70mmの三種とし、50mm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、高次の多重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、最も大きな磁場勾配を必要とする四極磁石について、POISSON²⁾を用いた2次元磁場解析を行い、必要最大磁場勾配が実現できるような磁石の大きな形状を求め、次にMAFIA³⁾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ような詳細な磁極形状を決定した⁴⁾。表1に各磁石の設計値を示した。今回は、それらの解析結果と測定結果とを比較し、実用性能を満たしているかどうかを述べる。

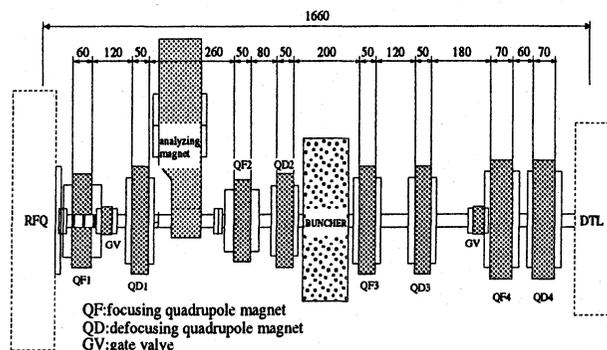


図1 JHP-MEBTにおける各コンポーネントの配置

QF1 QD1,QF3,QD3 QF2 QD4,QF4 QD2

	QF1	QD1,QF3,QD3	QF2	QD4,QF4	QD2
(1) Mechanical					
bore diameter [mm]	35	35	35	35	35
core length [mm]	60	50	50	70	50
turn number of coil [turns/pole]	20	17	14	21	13
(2) Electric, magnetic and thermal					
current [A]	185	177	181	202	177
field gradient [T/m]	38.9	33.5	28.2	42.9	25.6
max field gradient(300A) [T/m]	54.4	54.1	46.1	57.3	43.2
field effective range [mm]	±10	±10	±10	±10	±10
resistance [mΩ]	30.3	26.8	18.2	38.8	18.1
inductance [mH]	60	40	17	94	14
Δ T [°C]	13.3	12.0	8.4	18.8	8.4
flow rate of water [liter/min]	1.88	1.88	1.88	1.88	1.88
number of water circuits	4	4	4	4	4
water pressure drop [kg/cm ²]	2.4	2.2	1.5	3.0	1.5

Table 1 Parameters of the quadrupole magnets

2. 磁場測定方法

今回の磁場測定装置として、サーチコイルと3次元測定装置を用意した。サーチコイルは、コイル回転数1500rpm、コイル長500mm、コイル幅9.8mm、コイル巻数3ターン、コイル線径0.1mmで製作し、FFTサーボアナライザ(250mHz~200Hzの範囲で計測)に接続して、軸長の違う3種類の磁石(QF1とQD1及びQF4)について磁束勾配の積分値と高次の多極成分を測定した。ここで、コイルの長さは、必要磁場強度が最大の磁石でのフルスケール(QF4,QD4で6300AT)におけるMAFIAによる磁場の範囲を十分に含んだ距離以上で設定し、コイル幅は、MEBT内でのビーム最大径の計算値が、約 $\phi 20$ mmであるので、その付近での磁場を知るためにその値に設定した。3次元測定装置とは、ミットヨ社製3次元測定機に、ガウスメーターのプロープを取付けられるような治具を設けて、3次元方向の磁場分布を測定できるようにしたもので、今回は必要磁場勾配が最も高い軸長70mmのQF4のみを測定した。

3. MAFIAを用いた3次元解析と測定結果の比較

始めに、サーチコイルで測定した、軸長の違う3種類の磁石(QF1とQD1及びQF4)について磁場勾配の積分値(GL)をMAFIAと測定結果とを比較した(図3)。各磁石とも電流値を上げるに従って、MAFIAに比べ測定結果が若干下がっており、実用付近の200AでMAFIAに比べ約2.4~3.4%、フルスケールの300Aでは約2.1~4.5%下がっている。このような差は、測定誤差に加え、製作精度(35 \pm 0.1mm)内の寸法のバラツキやMAFIAに使用した純鉄のBH曲線と実際の純鉄のBH曲線の差であると考えられる。

次にサーチコイルで測定した高次の多極成分を図4(QD1:50mm)及び図5(QF1:60mm)に示す。各図とも磁場中心とコイルをずらした場合も含めて示した。QD1において磁場中心の測定では、四極成分に比べ、六極成分は0.09%以下で、八極成分でも0.06%以下に収まっている。又四極磁石で最も大きくなる十二極成分でも0.27%以下となっている。QF1では、六極成分は0.15%以下で、八極成分でも0.08%、十二極成分は0.21%以下に収まっている。図には示していないがQF4でも(六極:0.17%、八極:0.05%、十二極:0.30%以下)ほぼ同様の結果が得られた。設計前には、双曲線の磁極形状では、ボア径に対するビーム軸方向の磁石長が短いほど、3次元磁場での高次の多極成分の混入が多くなると予想したが、磁極形状を円形⁴⁾にしたため、その差は見られない。

次に、QF4(300A)におけるビーム軸方向の磁束密度の分布で、中心から水平面方向に5mmづつずらしていった場合を3次元測定装置で測定した(図6)。図において、磁場のフラット部分がMAFIAに比べ、ビームダクト内径付近($x=15$ mm)で2.9%下がっているが、ビーム最大径の $x=10$ mmでは1.8%以内に収まり、ほぼMAFIAでの分布傾向に沿ったものと良く一致している。この事は、MAFIAの計算結果に基づいて設定したサーチコイルの寸法が適性であった事を意味している。実際、図において、磁石中心から110mmで、 B_y の最大値の1%であり、

200mmでは0.1%以下となり、コイル長500mmは実際の測定でも十分にもれ磁場の範囲を含んでいることが確認できた。最後に、磁石中心から水平方向に距離5,10,15mmずらした位置の磁束密度の積分値(BL)を、励磁電流を変えて示した(図7)。図中において、測定値のBLは三次元測定器におけるプロープの位置設定の誤差が僅かにあるので、MAFIAに比べ+1.9%~-6.6%とバラツキがある。従ってサーチコイルでの測定結果とは正確に比較できないものの、全体の傾き(磁場勾配)で比較すると、MAFIAに比べ0.2~2.9%以内のずれであり、励磁電流を変えても、測定場所を変えた場合でも、ほぼMAFIAと同じ傾向を示していると考えられる。

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、ボア径に対するビーム軸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、高次の多極成分の混入が多くなることが設計前には予想された。そこで、多極成分の混入を少なくするため(四極成分に比べ1%以下)、三次元磁場解析コードMAFIAを使って、本ビームラインの全四重極磁石の設計を行った。そして、磁場勾配のビーム軸方向積分値(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。その解析結果では、中心からボア半径までのGLの変動が、 $\pm 1 \times 10^{-3}$ 以内に収まった。その設計に基づいて、今回開発した軸長の違う3種類の磁石の測定を行い、MAFIAでの解析結果と比較すると、サーチコイル(コイル幅9.8mm)では、磁石中心のGLが実用付近(200A)において、MAFIAに比べ各磁石共24~3.4%以内で下がっており、十分実用できることが確認できた。高次の多極成分については、各磁石共四極成分に比べ、六極成分が最大で0.2%以下、八極成分では最大で0.1%以下となり、四極磁石で最も大きくなる十二極成分でも最大で0.3%以下に収まっている。従って、四極成分に対する多極成分の最大値の割合が目標の1%以下となっており、実用において、四極成分に与える影響はほとんど無視できるほど少ない事が測定で確認できた。

3次元測定装置では、計測したビーム軸方向の磁束密度分布は、ビームダクト内径付近がMAFIAに比べ2.9%下がっているが、ビーム最大径の $x=10$ mmでは1.8%以内に収まっており、プロープの位置設定の誤差も考慮すると、MAFIAでの分布傾向に沿ったものと考えられる。又、磁石中心から水平方向に距離5,10,15mmずらした位置の磁束密度の積分値(BL)で比較すると、MAFIAに比べ+1.9%~-6.6%と測定のバラツキがある。従ってサーチコイルでの測定結果とは正確に比較できないものの、全体の傾き(磁場勾配)で比較すると、MAFIAに比べ0.2~2.9%以内のずれであり、全体の磁場勾配は、ほぼMAFIAと同じ傾向を示す事が確認できた。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事が測定結果でも確認できた。今後は、磁石のビーム軸方向への磁場の漏れが大きいことが、解析結果と、今回の測定結果で確認できたので、磁石間を近づけて、

実際に測定を行い、磁場干渉の程度を把握していく予定である。

参考文献

- 1) T. Kato, Proceedings of the 18th Liner Accelerator Meeting in Japan, 168 (1993)
- 2) K. Halbach et al., Part. Accel. 7(1976)213.
- 3) T. Weiland, Part. Accel. 17 (1985) 227.
- 4) K. Yoshino et al., Proceedings of the 18th Liner Accelerator Meeting in Japan, 165 (1993)

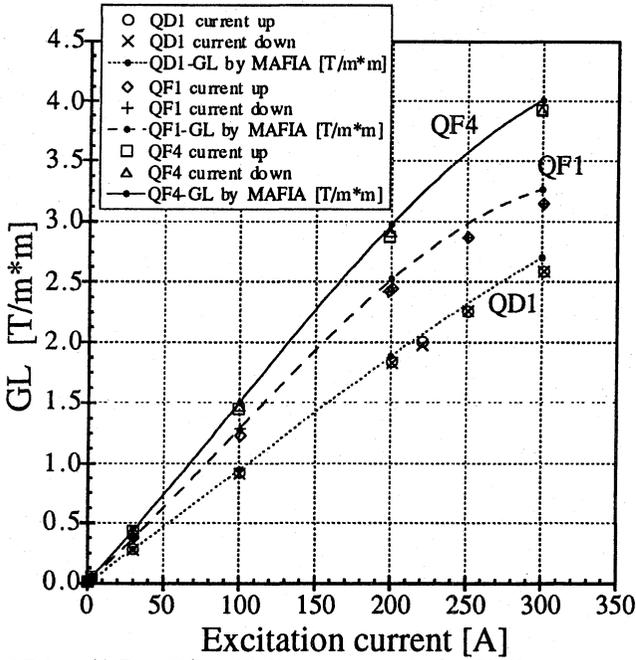


図3 軸長の違う3種類の磁石(QF1とQD1及びQF4)についての磁束勾配積分値のMAFIAとサーチコイルでの測定

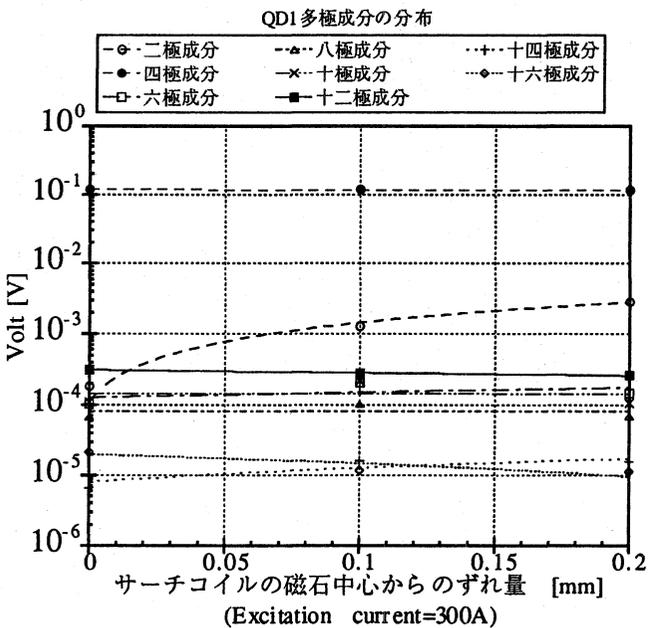


図4 QD1 (軸長50mm)における高次の多極成分 (サーチコイルを中心から水平方向にずらして測定)

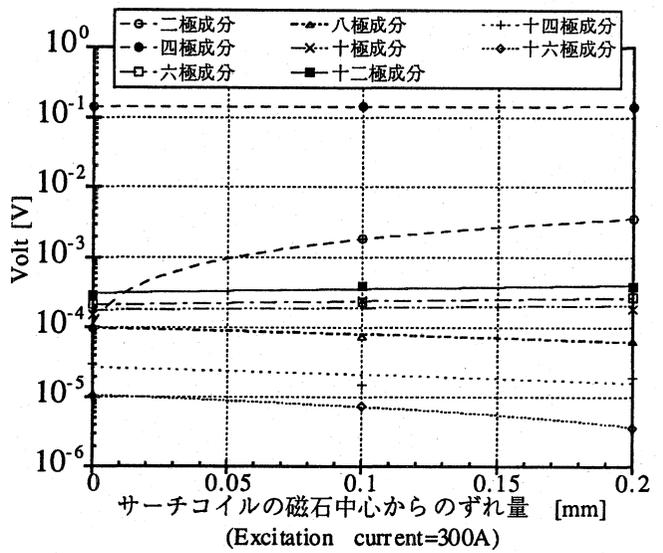


図5 QF1 (軸長60mm)における高次の多極成分 (サーチコイルを中心から水平方向にずらして測定)

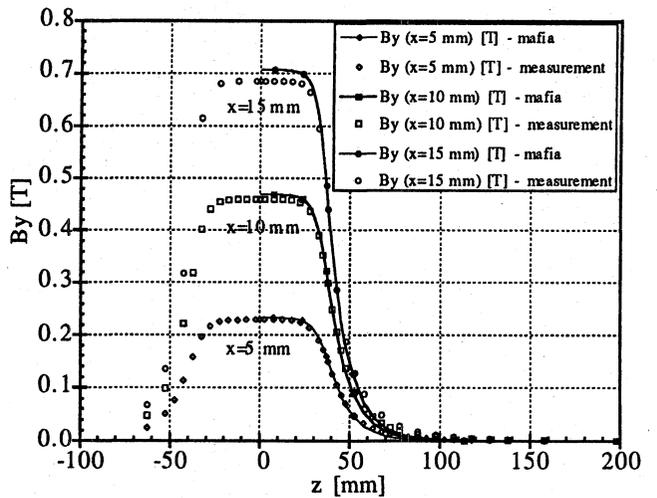


図6 QF4(300A)の中心から水平方向(x)に5,10,15mmの位置でのビーム軸方向(z)の磁束密度分布

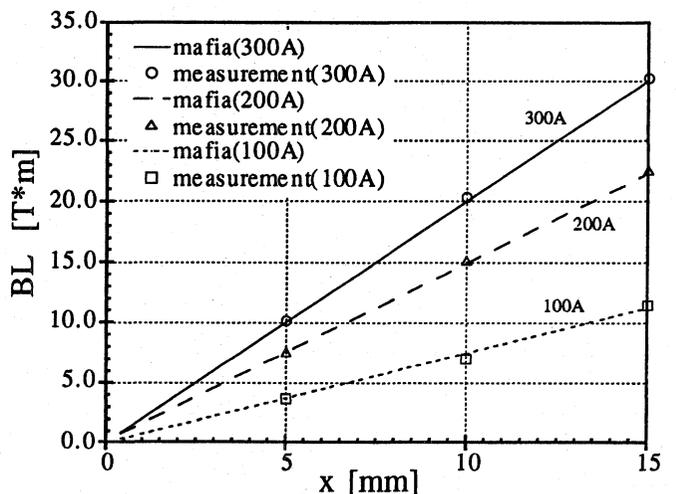


図7 磁石中心から水平方向(x)にずらして測定した磁束密度の軸方向積分値(BL)の励磁電流への依存性