

## Development of HEBT analyzer magnet for the JHP 1-GeV Linac

Kazuo YOSHINO, Fujio NAITO, Takao KATO and Yoshishige YAMAZAKI

National Laboratory for High Energy Physics, KEK  
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305, Japan

### ABSTRACT

We developed an analyzer magnet to be used in the high-energy beam transport line (HEBT) after the high-power model of the 432-MHz drift-tube linac (DTL), which was constructed for the 1-GeV high-intensity proton linac of the Japanese Hadron Project (JHP). In this paper, we describe the details for the design and magnetic field measurements of the analyzer magnet which is located in the HEBT. The most suitable shape of the magnet was designed using two and three-dimensional magnetic field analysis cord. The results of the measurements are consistent with our requirement for the magnetic field strength and the distribution.

## JHP 1GeVリニアックHEBT用分析電磁石の開発

### 1. はじめに

KEKでは、大型ハドロン計画(JHP)における大強度1GeV陽子リニアックの研究項目として、共振周波数432MHz、加速エネルギー5.44MeVのアルバレ型加速空洞(DTL)の開発を進めてきた。今回我々は、このDTLにおいて加速されたビームを測定するための、高エネルギービーム輸送系(HEBT)を開発した。

本HEBTの構成は、図1に示すように、ビーム収束用の四極電磁石4台(2種類)と、ビームエネルギー測定用の分析(偏向)電磁石1台、及び各種のビームモニターからなる。各装置はHEBT架台上のビーム軸方向レールに沿って、簡易に移動できる構造となっている。

又、このHEBTは、将来のDTL増強計画(10MeV程度)にも使用するため、表1(鉄心の飽和や磁束のもれ等を含んでいない理想モデルでの計算値)で示すように、両方に対応できる設計とした。

	QD1H (QF1H)	QD2H	B1H 5.4MeV	B1H 10MeV
(1) Mechanical				
ボア直径	[mm]	35	35	-
磁極隙間長	[mm]	-	-	35
鉄心ビーム軸方向長さ	[mm]	70	50	271.1
極率半径	[mm]	-	-	456.9
コイル巻き数	[turn/pole]	21	17	54
偏向角度	[度]	-	-	34
(2) Electric, magnetic and thermal				
設計磁場強度	[T/m],[T]	37.05	9.31	0.7376
		(28.85)		1.0
設計励磁電流	[A]	215.09	66.77	190.22
		(167.49)		257.89
抵抗	[mm Ω/磁石]	25.3	17.8	73.8
電圧	[Volt/磁石]	5.44	1.19	14.0
水温上昇	[°C]	11.3	0.8	9.5
		(6.9)		17.5
流量	[liter/min]	1.49	1.49	4.04
流速	[m/s]	1.6	1.6	1.2
冷却水路系統数		4	4	4
水路圧損	[kg/cm <sup>2</sup> ]	1.64	1.2	2.1

表1 HEBT用電磁石の設計パラメーター

HEBTを使ったビームの測定方法としては、始めにDTLの後(ゲートバルブ後)に直接ファラデーカップやエミッタンスモニター用チャンバーを取り付けて、DTL直後のカレントやエミッタンスを測定する。次にDTLで加速されたビームのエネルギーやHEBT四極磁石で収束されたビームのエミッタンスを測定するため、図1のように途中にエネルギー分析用の偏向磁石を設けてビームを34度偏向し、エミッタンスモニター用チャンバー(ファラデーカップ)へと導く。この際、図1で示すように、偏向電磁石と四極電磁石がかなり接近しているので、偏向電磁石のビーム軸方向へのもれ磁場による影響を考える必要がある(四極電磁石については、前回の研究会で発表したMEBT用四極電磁石と同一形状なので、その原稿を参照)。そこで今回は、設計段階での2次元磁場解析のみならず3次元磁場解析も行ったので、偏向電磁石の3次元磁場測定結果と比較して、磁場強度及び分布等が要求仕様値を満たしているかどうかを以下に検証した。

### 2. 偏向電磁石の設計と2次元の磁場解析の結果

HEBTビーム分析用偏向磁石の設計条件として、

[1] 図1に示すような四極電磁石の最適な位置が決

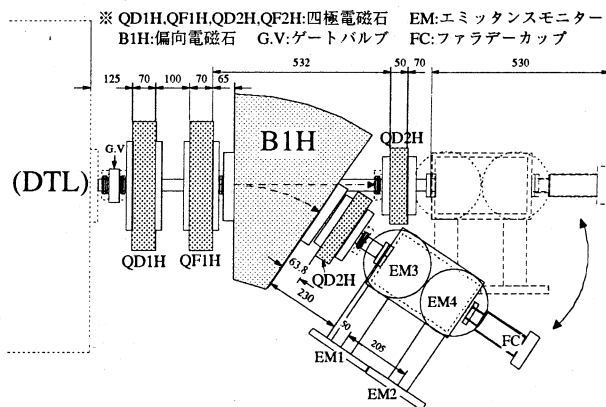


図1 JHP-HEBTにおける各コンポーネントの配置

まっているので、その(QF1HとQD2H)間の限られた空間に設置する必要があるため、大きさが限定される。

[2] 分析用磁石として使用するの、ビームエネルギーが10MeVでも、鉄心の飽和現象が少ない領域で、使用磁場強度を設定する必要がある。

[3] 使用電源は、長期間使用時の安定性や故障時の対応及びコストの観点から、市販の定電流直流(DC)電源の中から選ぶ。

[4] 磁極隙間長は35mmとし、磁石中央面における磁束密度 $B_y$ のビーム軸垂直(x)方向分布が、中心点に比べ中心から8mmの位置で-0.1%以内、真空ダクト内径の16mmの位置で-1%以内に収まる事を目標とする。

以上の事項を考慮し、電磁石の設計として

[1]、[2] から偏向磁場長Lをできるだけ長くして、なるべく低磁場で偏向できるようにQF1HとQD2Hの空間をフルに使う磁石長さとし、偏向磁石のタイプはC型に比べ飽和しにくいH型を採用し、鉄心は純鉄にした。又、偏向後の四極電磁石QD2Hが入るような最小限の偏向角度は34度となり、その時の使用磁場強度はビームエネルギー10MeVで17テスラとなった。更に[3] から35V-300AのDC電源を選択して、コイル巻数をポール当たり54とした場合、励磁電流が約258Aと算出され、300Aフル励磁に対して約16%の余裕が残る。又DC励磁に対し、コイルはホローコンダクターを使って水冷し、使用ホロコンは、外径7×7mm、冷却孔径4×4mmを選んだ。コイルの巻き方及び冷却方法は、磁石間のコイル出っ張り部分の干渉制限から3層巻きにして、3層×9巻きの27ターンを直列の1冷却水路とし、温度上昇を抑さえ、圧力損失を軽減するために、全部で27×4ターンの4冷却システムを並列で水冷した。これらの設計手順を考慮して、2次元磁場解析コードPOISSON<sup>2)</sup>を使って、[4]を満たすような形状を求めた。図2に、製作した磁石の詳細図を示す。

図3は、励磁電流300Aで、磁石中央面(端面から17度の磁石断面)における磁束密度 $B_y$ のビーム軸垂直(x)方向分布を示す。その結果、中心に比べ中心から10mmの位置で-0.2%以内、真空ダクト内径である16mmの位置で-0.8%以内となり、目標の磁場分布の精度内に収まった。又、磁場強度Bも最大励磁電流(300A)で設計値(1.1633 T)の99%以上を達成し、飽和現象は起こっていない。

### 3. 3次元での磁場解析と測定結果の比較

設計及び2次元解析で求めた形状を基に、数値計

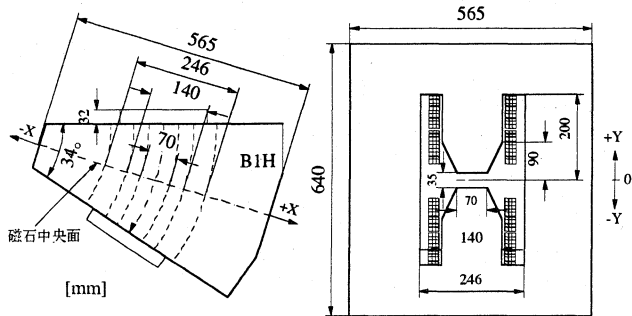


図2 HEFTビームエネルギー分析用電磁石の詳細図

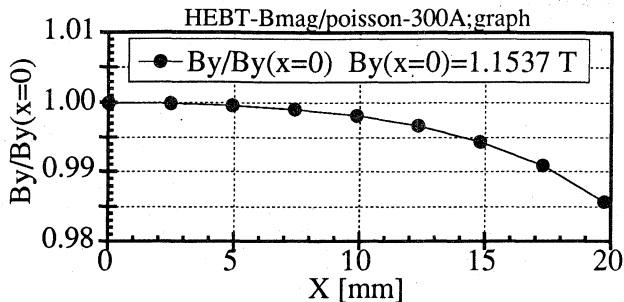


図3 POISSONによる、励磁電流300Aでの磁石中央面における磁束密度 $B_y$ のビーム軸垂直(x)方向分布

算コードMAFIA<sup>3)</sup>を使って、3次元磁場解析を行い、最適な形状を決めた。以下に今回の、実測値と比較した。

図4は、励磁電流300Aで、磁石中央面における磁束密度 $B_y$ のビーム軸垂直(x)方向分布を、MAFIAと磁場測定値で比較した図で、右側にMAFIAに対する測定値の差を%で示した。ここで、実測では励磁電流がゼロでも、隙間内には若干の残留磁場が生じているため、低磁場(低電流)に向かうと測定値がMAFIAの値より大きくなる傾向を示している。それでも、測定値はMAFIAと比較して約+1.2~-0.5%の間に入っており、全体では、ほぼ同等な値値と言える。又、磁場強度Bもフル励磁(300A)で設計値(1.1633 T)の96%以上を達成し、問題はない。

次に、実際の運転では、磁場の積分値を使用するので、図5に、磁束密度Bのビーム偏向方向に沿った積分値BLの励磁電流依存性を、MAFIAと磁場測定値で比較した。右側にMAFIAに対する測定値の差を%で示した。図では、BLでの実測値はMAFIAと比較して最大で約2.8%ほど低くなっており、図4のMAFIAに対する測定値の差の励磁電流依存性と比較すると、相対的に同じ傾向を示している。この差は、MAFIAに使用した純鉄のBH曲線データと実際の鉄心(純鉄)のBH曲線に若干の違いがあり、磁場分布に多少の違いが生じているためだと思われる。磁場強度(BL)は、もれ磁場による磁場長の増加により、最大励磁電流で設計値(0.31542 T·m)の109.8%以上となり、5.44MeVのビームでは170A付近(BL=0.1999937

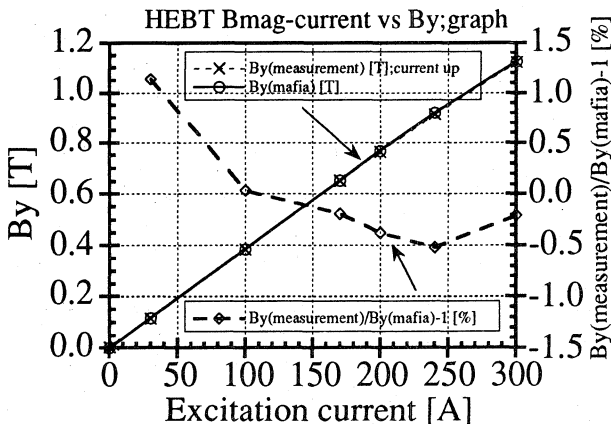


図4 MAFIAと磁場測定値による、励磁電流300Aでの磁石中央面における磁束密度 $B_y$ のビーム軸垂直(x)方向分布

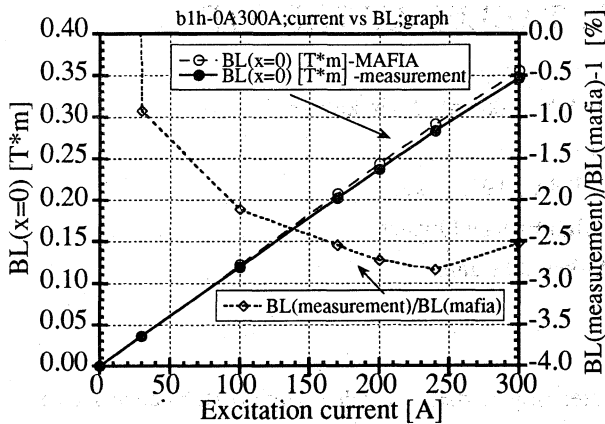


図5 MAFIAと磁場測定値による、磁束密度Bのビーム偏向方向に沿った積分値BLの励磁電流依存性

T\*m)で、10MeVのビームでも230A付近(BL=0.2711545 T\*m)で、最大励磁電流に対し、約3割の余裕を残して運転できることが確認できた。

次に図6は、当面使用する5.44MeVのビームに対する励磁電流である170Aで、磁石中央面における磁束密度Byのビーム軸垂直(x)方向分布を、MAFIAと磁場測定値で比較した。その結果、中心に比べX=8mmの位置で、MAFIAは-0.08%以内、測定値でも-0.1%程度となり、真空ダクト内径である16mmの位置でもMAFIAで-0.5%以内、測定値で-0.8%以内となり、測定値はMAFIAに比べ、ビーム偏向軌道を離れるほど低めの磁場分布になっている。これは、前述のBH曲線データの若干の違いと思われるが、その差は僅かで、実測値でも目標の磁場分布の精度内に収まっているので問題はない。

次に、MAFIAと磁場測定値による、励磁電流170Aでの磁束密度積分値BLのビーム軸垂直(x)方向分布を図7に示した。ここでも、BLでの磁場強度は、MAFIAと比較して実測値が2.5~3.7%ほど低くなっているが、磁場分布はほぼ同じ傾向を示している。最後に図8に、励磁電流170Aでのビーム偏向軌道に沿った磁束密度Bの分布を、MAFIAと磁場測定値で示した。図では偏向軌道中心でのMAFIAの値を1として、比率で示した。磁極内では、磁場測定値とMAFIAとの差は0.2%程度で、ほとんど同じと言える。又、偏向磁石端面から63~65mm離れている四極磁石の端面で、もれ磁場Byが約1割残っており、その位置から磁場分布の端までのBL値は、全体の約3%に相当する。

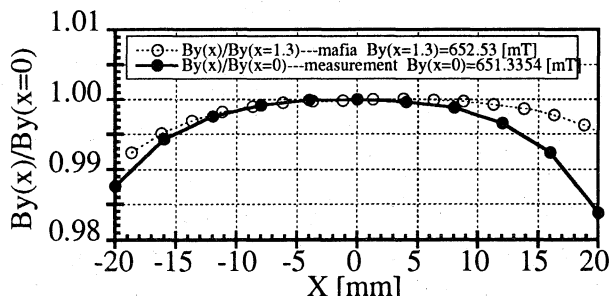


図6 MAFIAと磁場測定値による、励磁電流170Aでの磁石中央面における磁束密度Byのビーム軸垂直(x)方向分布

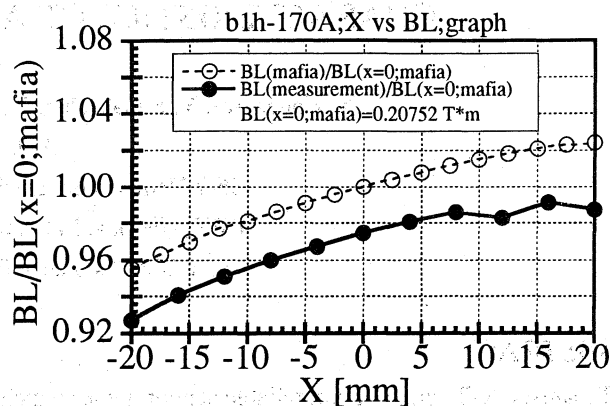


図7 MAFIAと磁場測定値による、励磁電流170Aでの磁束密度積分値BLのビーム軸垂直(x)方向分布

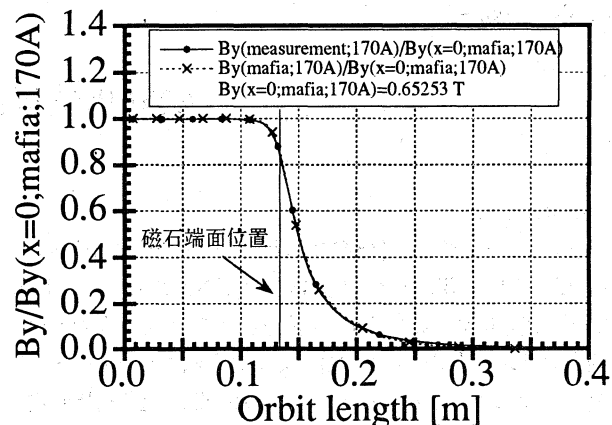


図8 MAFIAと磁場測定値における励磁電流170Aでのビーム偏向軌道に沿った磁束密度Bの分布

#### 4. 結論

432MHz-DTLのビームエネルギー分析用偏向磁石について磁場測定を行った結果、磁場強度(BL)は、MAFIAと比較して実測値が2.5~3.7%ほど低くなっているが、当面のエネルギー5.44MeVでは、最大励磁電流に対して7割(170A)以上の余裕で、将来の10MeVでも3割(230A)の余裕を持って運転できることが確認できた。又、磁場分布については、磁石中央面における磁束密度Byのビーム軸垂直(x)方向分布測定値は、中心からX=8mmの位置で-0.1%程度、16mmの位置で-0.8%以内となり、MAFIAに比べそれぞれ0.02~0.3%低くなっているが、いずれも目標値をクリアできた。

以上の結果より、432MHz-DTLのビームエネルギー分析用磁石としては十分な性能が確認できた。今後は、偏向磁石と四極磁石間の互いの漏れ磁場による磁場分布への影響を検討していくつもりである。

#### 参考文献

- 1) K. Yoshino et al., Proceedings of the 19th Liner Accelerator Meeting in Japan, 202 (1994)
- 2) K. Halbach et al., Part. Accel. 7(1976)213.
- 3) T. Weiland, Part. Accel. 17 (1985) 227.