

Study of the 324MHz-DTL Quadrupole magnet for the JHF Linac (II)

Kazuo YOSHINO, Fujio NAITO, Takao KATO, Eiichi TAKASAKI and Yoshishige YAMAZAKI

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305, Japan

ABSTRACT

We have studied properties of a quadrupole electromagnet to be used in the injection part (3 MeV) of the 324-MHz drift-tube linac (DTL) for the 200-MeV high-intensity proton linac of the Japanese Hadron Facilities (JHF). In this paper, we describe the details of the design and the magnetic field measurements of the model magnet. The optimum shape of the magnet was designed using three-dimensional magnetic field analysis codes. The results of the measurements are consistent with our requirements for the focusing magnet.

JHP 324MHz-DTL用四極電磁石の研究 (II)

1. はじめに

JHF-LINAC グループでは、加速周波数 324MHz、入射エネルギー 3MeVにおける DTL 用収束磁石として、定電流直流(DC)電源で励磁できる四極電磁石の検討を行ってきた。電磁石タイプを使ったDT用 Qmagnetは、従来 200MHz 程度までであり、この周波数で使用するには、かなりの小型化が要求される事になる。又、コイルとして、実績があり、

直流励磁にも十分対応できるホローコンダクターを選んだが、これがDTやシステム内の空間をかなり占有することになる。これらの点を踏まえて、前回の研究会にて 3MeV 用の四極電磁石の試作結果を発表⁽¹⁾したが、今回はそのポール部分の改良(断面積増加)を行い、磁場性能に関しては、ほぼ実用化に目処がたった。又この結果を踏まえて、更にDT(ドリフトチューブ)の小型化を計ったモデル(DT組込みモデル)も設計したので、以下にそれらの内容を記述する。

表 1 今回の磁石単体モデルの各特性値
[各測定値は、GL達成時の値を基準に換算]

	設計値	測定値
磁極内径 (ボア直径)[mm]	15.0	---
磁極軸長 : L [mm]	34.0	---
磁場勾配 : G [T/m]	112.7	100.5
※磁場強度 (G × L)[T]	4.192	4.193
コア材質	Fe・Co合金	
ヨーク外周直径 [mm]	125	---
コイル巻数 [turn/pole]	3.5	---
最大起磁力 [AT/pole]	3500	---
使用電流 [A]	721	681
電流密度 [A/mm ²]	46.7	44.1
導体寸法(ホローコンダクター)[mm]	5.0 × 5.0, thickness 1.0	
電圧 [V]	2.8	2.5
損失 [kW]	2.0	1.7
冷却水量(V=2m/s) [liter/min]	0.93	0.93
水温上昇 [°C]	31.6	19.2
圧力損失 [Kg/cm ²]	1.2	1.3
ドリフトチューブ 外周直径 [mm]	158	---
ドリフトチューブ 内周直径 [mm]	13.0	---
ドリフトチューブ 全長 [mm]	50.5	---

2. 四極電磁石のパラメータ

今回の試作機(磁石単体モデル)の各特性値(設計値と測定値)を表1に示す。表から判るように、コア材質に高飽和値合金である鉄・コバルト合金(商品名 Semendur:SME-V⁽²⁾)を採用した。このセメンジュールは、純鉄に比べ約 1.3 倍の高い飽和磁束密度性能を有しており、電磁石を小型化する上で、最適な材料と判断した。

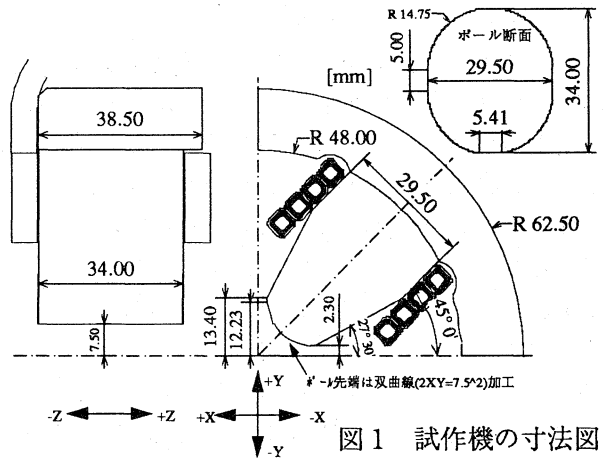


図 1 試作機の寸法図

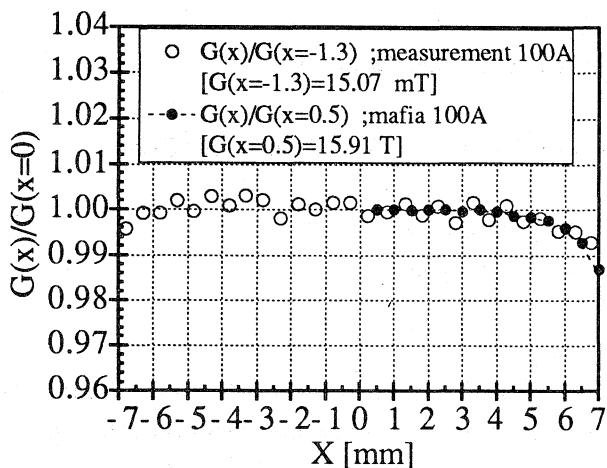


図2 磁束勾配Gの周方向 (X) 分布

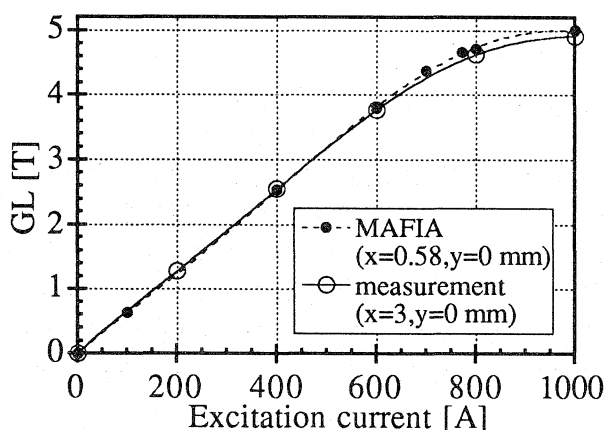


図4 磁束勾配ビーム方向積分値GLの励磁特性

3. 磁場解析と測定結果

図1に試作機の寸法図を示す。この断面形状における3次元磁場解析(MAFIA⁽³⁾)の結果と試作機の測定値(ホール素子による3次元測定)の比較を以下に記述する。

図2は、MAFIAと磁場測定値における、磁束勾配Gの周方向分布を示す。測定値とMAFIAの平坦な範囲はほぼ同一であり、測定値の磁場分布は、DTボア径(-6.5<Y<6.5)の範囲で、中心から±1%以内の目標精度に入っている。

図3は、ボア中心付近における磁束勾配(G)の励磁特性を示し、図4には、ボア中心付近における磁束勾配のビーム方向積分値(GL)の励磁特性を示す。その結果、G及びGLの測定値共、MAFIAに比べ僅かに低い(2~4%)ものの、ほぼ同じ傾向を示していると判断できる。必要なGL(4.192 T)に対する使用電流値は681 Aで、飽和領域手前で定常運転できる事が判った。又、最大励磁では、17.3%増しまで対応できるので(必要なGLに対する各特性の測定値を表2に掲載)、磁場強度については、ほぼ実用

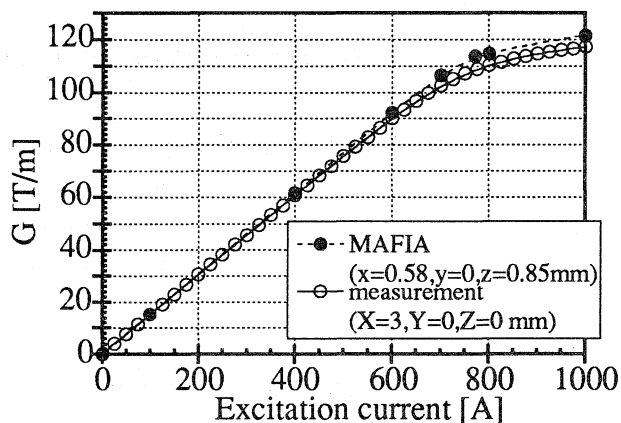


図3 ボア中心付近における磁場勾配Gの励磁特性

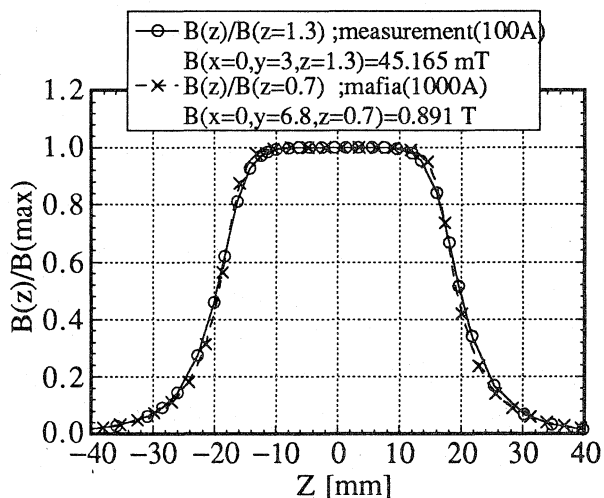


図5 ビーム軸(Z)方向の磁場分布割合

化の目処がついたと言える。

図1の磁石側面図において、ヨークの片方が出っ張っているが、これはホロコンの立上りの曲がり部分に干渉するヨークの断面積減少を補い、かつヨーク外周径の増加を抑える為の処置である。そこで、ビーム軸方向の磁場分布の対称性を確認する必要があるため、図5に測定値とMAFIAの値を示した。MAFIA及び測定値とも、ほぼ同一で軸対称な分布を示しており、この程度のヨークの非対称性は問題が無い事が確認できた。又、DTハーフセル長(37mm程度)の位置でのみれ磁場の割合は、約2.7%となっている。

図6は、ビーム方向積分値GLの周方向(X)分布を示した。ダクト内径の位置(±6.5)における測定値は、4%近くまで落ちている(普通は1~2%程度)。これは、ポールを削っているため、ポール端の平面部分長(5.4mm; 図1)が短すぎた為に、積分長の差が出たと思われる。MAFIAとの差は、モデリングの際、ポールを削っている部分は近似的に入力しているため、その削りだしの部分

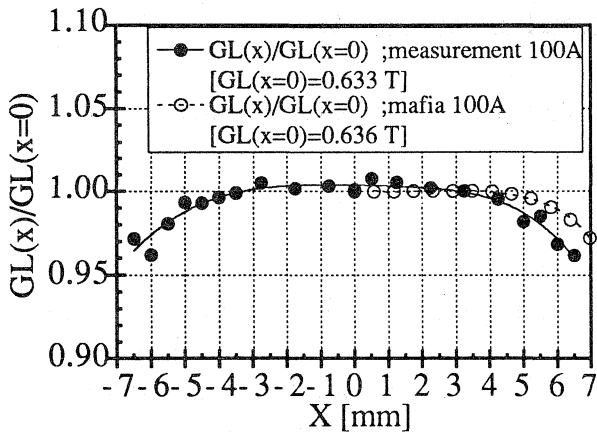


図6 ビーム方向積分値GLの周方向(X)分布

が少なかった為だと思われる。

次に、回転コイル（ハーモニックコイル）からの出力を、FFTでフーリエ変換して得られた各成分の振幅比を示す（図7）。（但し、ハーモニックコイルは、素線径 ϕ 0.05mm・巻数7ターン・中心軸からの巻幅は片側4.2mm、他方3.5mm・長さ200mm・回転数480rpmである）。磁場中心付近においては、ダイポール成分は1%以下となっている。従って、この位置においては、他の高次成分も含め、四重極成分と比較して十分小さい事が確認できた。このとき、機械中心と磁場中心の位置のずれは $37\mu\text{m}$ であった。

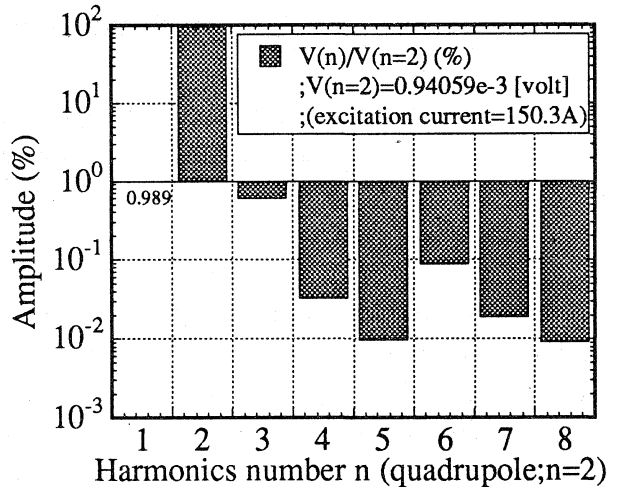


図7 磁場中心付近における高調波成分

4. 今後の予定

これまでの磁石単体モデルの測定結果から、実用化の目処が立ったと判断できた。しかし、磁石単体モデルへのDT外周径設計値は、要求された外周径(ϕ 140mm)より13%も大きいので、更なるDTの小型化を目指して、DTとその組込みモデルを製作することにした。この場合、磁石本体のこれ以上の小型化は無理なので、ホロコンの巻方を工夫して、小型化を進めた。具体的には、図8に示すように、ポールへの巻始め・巻終わりの位置を、従来のポールの付け根側からポールの先端側に移して、DT外周径を小さくした(ϕ 148~150mm)。このような小型化に加えて、更に磁場性能の向上も目指した。まず、図中のポール断面図に示すように、ポール端の平面部分長を5.4mm（図2）から9.79mmに増やして、GLの周方向分布の改善を目指した。次に、ポール及びヨークの断面積をそれぞれ5.7~12.1%増やして、最大磁場強度の微増も狙った。以上で述べたDT及びその組込みモデルは現在製作打合せの段階であり、この秋頃の完成を待って、磁石特性やDTへの影響等の測定を行う予定である。

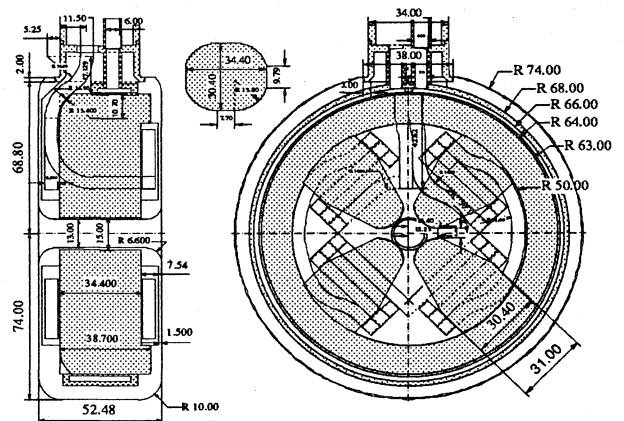


図8 DT及びDT組込みモデルの設計図

5. 結論

今回、324MHzのDTL用収束電磁石についての検討及び試作を行った。本試作機の磁場測定の結果、磁場強度は、必要磁場の117.3%まで対応できた。磁場分布については、ハーモニックコイルでの高次成分は全て1%以下で、十分少なかったが、ホール素子にて測定したビーム方向積分値(GL)の周方向分布は、ダクト径の位置で、中心より4%近い落込みを示したので、改善の必要がある。以上の結果より、磁場分布についての多少の改善は要するものの、ほぼ実用化に目処がついたと言える。今後はDT及びその組込みモデルを製作して、更なる小型化と磁場分布特性の向上等を目指す。

参考文献

- (1) K. Yoshino et al., Proceedings of the 21th Liner Accelerator Meeting in Japan, 198 (1996)
- (2) FERROMAGNETIC PRODUCTS, MT-14JE, Vol.01, TOKIN
- (3) T. Weiland, Part. Accel. 17 (1985) 227.