

Study of the 324MHz-DTL Quadrupole electromagnet for the JHP Linac

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

National Laboratory for High Energy Physics, 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 Project (JHP). 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 two and three-dimensional magnetic field analysis codes. The deviation of the measurements from the calculation is discussed.

JHP 324MHz-DTL用四極電磁石の研究

1. はじめに

KEKでは、大型ハドロン計画(JHP)の大強度200MeV陽子リニアックの開発項目として、共振周波数324MHzで、3MeVから加速するアルバレ型加速空洞(DTL)やその構成要素等の研究を行っている。我々はその内の、ドリフトチューブ(DT)に内蔵する収束用四極磁石の検討を行った。

最も望まれる収束用四極磁石を考えた場合、良質なビームの生成のために、収束力の可変な電磁石が良く、又長期間の安定な運転を確保するために、直流励磁ができる電磁石が良い。しかし、これらの要求をこの磁石で達成するには、以下の難しさがある。第1に、従来の主流の200MHzに比べて高い共振周波数のため、小さなDTとシステムの中に磁石とコイルを封入する形状の制限。第2に、陽子線形加速器の入射部では、最も小さなDTに対して、要求磁場勾配が最も強いので、磁性材料の選択や磁石形状の設計に検討を要する。第3に、コイルとしてホロコンを使って巻く場合、できるだけ小さな巻径にしつつ水路穴は潰さずに巻き、正確に取り付ける技術が必要である。

以上の事に考慮して、低エネルギー入射部(3MeV)用の四極電磁石について、2次元及び3次元での磁場解析を行い、設計・試作したので、その測定結果等について報告する。

2. 四極電磁石の設計と2次元磁場解析の結果

324MHzで、3MeVのDT用四極磁石の設計条件として、

- 1) 市販の既製品から選択可能なDC電源として、最大電流が1000Aクラスを目処とする。
- 2) DC励磁に対し、コイルはホロコンを使って水冷する。
- 3) ホロコンは、4ポールを直列の1系統で冷却し、その冷却水温度上昇は20~30℃前後を目指し(水速2m/s前後に押さえる)、最大でも40℃を越えない形状を選択する。

| | |
|------------------|-------------|
| DTタンク直径 | 54.8 cm |
| DT全長 | 50.5 mm |
| DT外周(内周)直径 | 158 (13) mm |
| DT外周(内周)側コーナーの半径 | 10 (6.6) mm |

表1 324MHz-3MeVにおけるドリフトチューブの主な設計値

| | | |
|---------------|-----------------------|----------------|
| ボア直径 | [mm] | 15.0 |
| 必要磁場強度 | [T/m] | 112.7 |
| 必要磁場積分値GL | [T/m × m] | 4.19244 |
| 磁極長 | [mm] | 33 |
| 磁石外周直径 | [mm] | 125 |
| コイル巻数 | [ターン/ポール] | 3.5 |
| 使用電流 | [A] | 721 (Max 1000) |
| 電流密度 | [A/mm ²] | 46.7 |
| 導体寸法 | [mm] | h5.0,w5.0,t1.0 |
| 電圧 | [V] | 2.8 |
| 損失 | [kW] | 2.0 |
| 冷却水量 (V=2m/s) | [liter/min] | 0.93 |
| 水温上昇(直列) | [℃] | 31.6 |
| 圧力損失(直列) | [Kg/cm ²] | 1.09 |

表2 324MHz-3MeVにおける四極電磁石の主な設計値(コイル長を868mm/pole、平均水温25℃と仮定して算出)

4) 磁場強度は、必要設計値(磁場勾配のビーム方向積分値GL)の1.2倍以上、磁場分布としては、ビーム軸中心の磁束勾配Gに対するドリフトチューブ内径半径の位置でのGの比が1%以内に収まるような形状を目標とする。

以上の条件を考慮して算出したDTと磁石の主な設計値を表1、2に示す。

これらの設計値を基に、2次元磁場解析コード POISSON¹⁾を使って、ボア中心から周方向(X)への磁

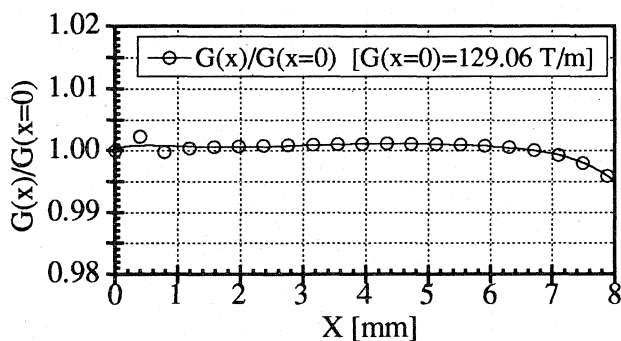


図1 POISSONによる、ボア中心から周方向(X)への磁束勾配Gの分布割合(純鉄)

束勾配Gの分布割合を図1に示す(材質は純鉄)。その結果、中心に比べ中心から6.5mmのDT内径の位置までは0.2%以内、磁石ボア内径である75mmの位置でも0.2%以内に入り、目標の磁場分布の精度内に収まる。又、磁場強度Gも最大励磁電流(1000A)で設計値(112.7 T/m)の115%に達しており、積分値では2割を越えると思われる。

以上の結果から2次元解析においては、ある程度の磁場分布性能が確認できたので、この断面形状を基に進める事にした。しかし、磁場強度に関しては、ボア径に比べ奥行きが薄いこの磁石では、実際にはこの結果より大きくずれる可能性がある。そこで、3次元での磁場解析も行い、最適なモデルを求めた。

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、数値計算コードMAFIA²⁾を使って、3次元磁場解析を行い、最適な形状を決めた。

図3は、磁石材質に純鉄と高飽和値合金(Fe-Co合金:セメンジュール³⁾)を使い、磁場強度の比較を行ったもので(但し、飽和の少ない磁石形状で解析:ボア直径16.6mm、磁石外周半径67mm、磁石厚み37.2mm)、純鉄においては、励磁電流1000A(3500AT)でも、設計値をクリアできない事が判明した。それに比べてセメンジュールでは、3500ATでは、設計値の2割増し(積分値)を達成できることが解った。従って、試作モデルはその高飽和値合金を使うことにした。

次に、今回セメンジュールで試作したモデルの磁束勾配(G)の励磁特性を図4に、磁束勾配のビーム方向積分値(GL)の励磁特性を図5に示す。その結果、Gは設計値より最大でも6%少なく、GLでは5.8%高いが、設計値の2割増しをクリアしてはいない。いずれもMAFIAの値に比べ、飽和現象が著しく現れ、最大で2割近く少ない値になっている。この違いは、ホロコンを巻くため、ボールの角を削る必要性があったが、MAFIAにはその削った範囲(ボール断面積の2割)を入力しなかったため、その差が現れたと思われる。

次に図6は、MAFIAと磁場測定値における、ボア中心から周方向(X)への磁束勾配Gの分布割合を示す。

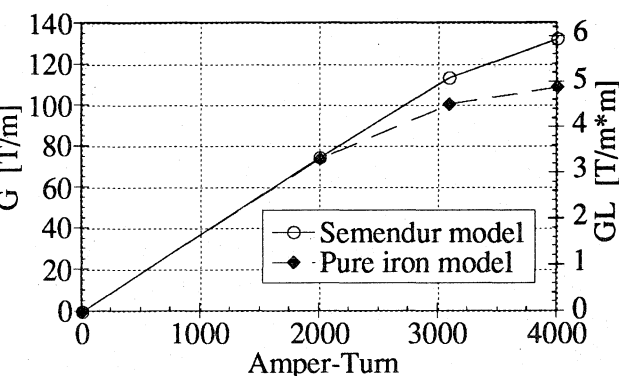
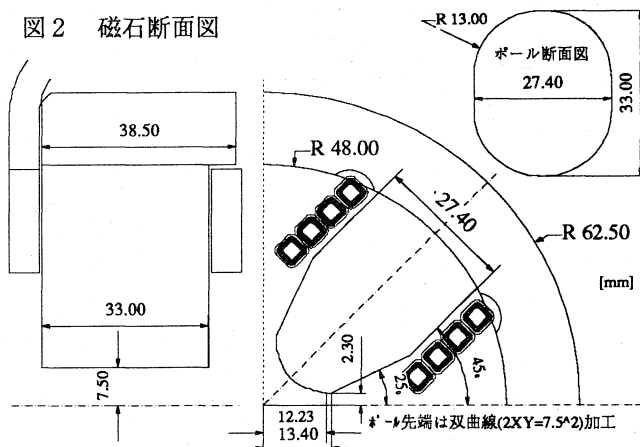


図3 MAFIAによる、純鉄と高飽和値合金(セメンジュール)による磁場強度の比較

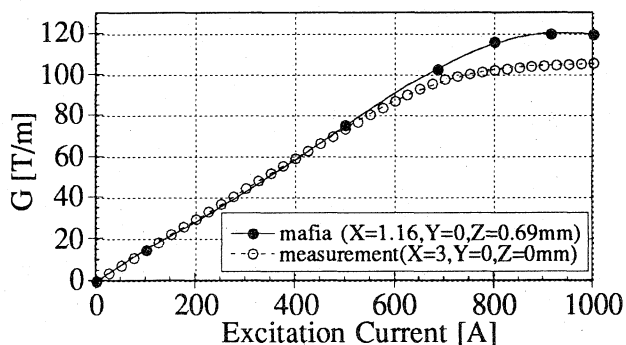


図4 MAFIAと実際の測定値による、ボア中心付近における磁束勾配の励磁特性

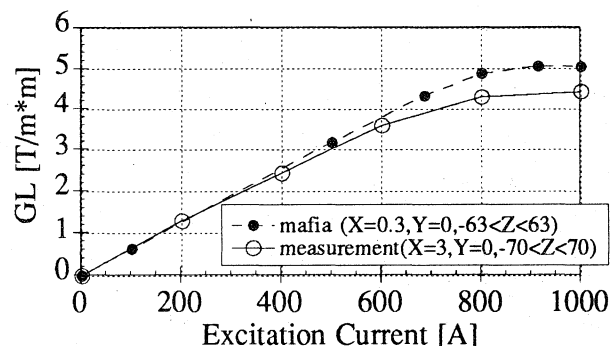


図5 MAFIAと実際の測定値による、ボア中心付近における磁束勾配のビーム方向積分値の励磁特性

これによると測定値は、±2%程度のばらつきがあるため確定はできないが、近似曲線を信じると、ほぼMAFIAと同じ傾向を示しており、 $-6.5 < Y < 6.5$ の範囲では、中心から1%以内に入っていると思われる。

次に図7は、ビーム軸(Z)方向磁場分布を、MAFIAと磁場測定値で比較した。その結果、Z方向の分布は、ほぼ同一傾向だが、測定値のフラットトップ部分が、ほぼ水平なMAFIAに比べ、 $-6 < Z < 6$ の範囲で最大で+0.6~0.4%程度の割合で傾いている。これは、飽和对策の為、試作機のヨークのZ方向肉厚を片方側だけ増やしたためだと思われる。しかし、MAFIAでも近似的な形状で入力していたので、近似入力の問題か、或いは測定の誤差等かを更に検討する必要がある。

次に図8は、サーチコイルにおいて、試作機の140A励磁での高磁極成分のFFT ANALYZERによる測定画面を示す。(但し、サーチコイルは、素線径φ0.05mm・巻数7ヶン・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。)この図は、地磁気を含めた偏極成分が最小になる位置(磁場中心)で測定したものであり、機械中心に比べ磁場中心は32μmずれていた。高磁極成分としては、偏極成分と6極成分が多くなっているが、4極成分との差は40~45dBVrms以上あり、他の成分もそれ以下なのでいずれも問題はない。最後に、試作機他の諸特性として、コイルの圧力損失は、流量が0.93[Liter/min]で約1.2[kg/cm²]となる。又、水温上昇値は、流量が1.4[Liter/min]で800A励磁の場合で最大19.0℃となっており、換算すると流量が0.93で28.6℃の上昇に収まる。これらは表1の計算値とは1割程度以内で、ほぼ計算通りであった。

4. まとめ

今回、324MHz-DTLの3MeVで使用する四極電磁石の試作を行い、磁場測定を行った結果、磁場強度は積分値(BL)では、設計値より5.8%増しとなったが目標の2割増しには達せず、磁石中心の磁束密度Gは設計値の94%にしか達していなかった。この違いは、試作機ではホロコンを巻くため、ポール角を削っているが、MAFIAにはその削った範囲(ポール断面積の2割)を入力しなかったため、その差が現れたと思われる。磁場分布では、周方向分布が測定誤差が多いが、 $-6.5 < Y < 6.5$ の範囲で、中心から1%程度内に入っていると思われ、ビーム軸方向の分布は、ほぼMAFIA通りとなっているが、フラットトップ部分が、水平なMAFIAと比較して最大±1.5%程度傾いており、MAFIAでの近似的形状での入力の問題か、或いは測定の誤差等かを更に検討する必要がある。高磁極成分は、偏極成分と6極成分が多くなっているが、4極成分とは離れており問題はない。

以上の結果から、試作機は当初目標の性能には、(特に磁場強度が)達成できない事が判明した。しかしその差はわずかなので、今後2号機を製作し、特性の改善を行う予定である。

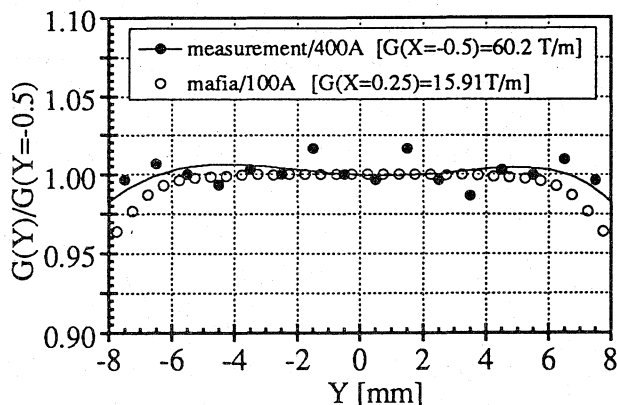


図6 MAFIAと磁場測定値における、ボア中心から周方向(X)への磁束勾配Gの分布割合(セムジュール)

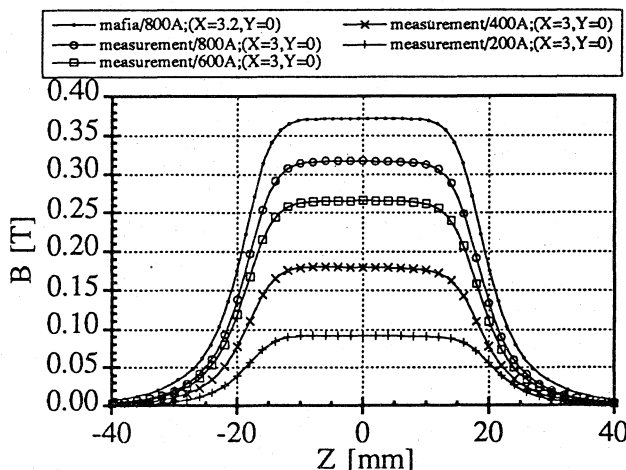


図7 MAFIAと磁場測定値における、ビーム軸(Z)方向の磁場分布

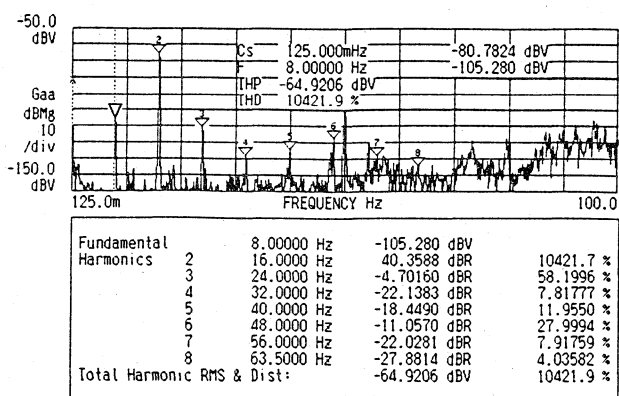


図8 サーチコイルにて測定した、140A励磁での高磁極成分(下表の多極成分は、偏極成分[8Hz]との差を示す)

参考文献

- 1) K. Halbach et al., Part. Accel. 7(1976)213.
- 2) T. Weiland, Part. Accel. 17 (1985) 227.
- 3) FERROMAGNETIC PRODUCTS, MT-14JE, Vol.01,