

Development of the Electroforming Hollow Coil for the 324MHz-DTL Q-magnet

Kazuo YOSHINO, Eiichi TAKASAKI, Fujio NAITO, Takao KATO, Yoshishige YAMAZAKI
Keisuke TAJIRI*, Toshihiro KAWASUMI*, Yasuhisa IMOTO*, and Zensaburo KABEYA*

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305, Japan
*Mitsubishi Heavy Industries Ltd
10 Oye-cho, Minato-ku, Nagoya, 455, Japan

ABSTRACT

We developed the Electroforming Hollow Coil 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 measurements of the excitation properties of the Hollow Coil and the model magnet. The results of the measurements are consistent with our requirement for a coil of the DT Q-magnet.

324MHz-DTL 四極電磁石用電鋳製コイルの開発

1. はじめに

我々のグループでは、JHF（大型ハドロン計画）324MHz-LINACにおける、DTL（アルバレ型加速空洞：入射エネルギー3MeV）のDT（ドリフトチューブ）に内蔵する収束電磁石のR&Dを行ってきた。当初は、従来のホローコンダクター（ホロコン）を使い、かつDC励磁にも対応する電磁石の開発を試み、ある程度の性能は得られた

が⁽¹⁾⁽²⁾、更なるDTの小型化は期待できず、励磁発熱等の問題点も指摘された。そこで、従来のホロコンに代わって、より小型で励磁発熱を少なくでき、なおかつポール断面積が十分に確保できる、機械加工と銅電鋳による新しい製作法で、コイルを開発した。更に、より熱膨張の減少を目指して、励磁方式をパルスに変更した（但し、今回はコア材の変更が間に合わなかったため、純鉄の磁石で試作した）。以下に、本コイルの概要及び、実際に励磁した場合のコイル特性等について記述する。

表1 磁石、電鋳コイル及びDTの各特性値

	設計値
磁極内径（ボア直径）	[mm] 16.0
磁極軸長	[mm] 35.0
定格磁場強度（ $Gq \times Lq$ ）	[T] 4.19
実効長（ Lq ）	[mm] 41.4
鉄心材料	純鉄
ヨーク外周直径	[mm] 115
コイル外寸	[mm] 5 × 5.5
水路軸方向寸法	[mm] 3.0
水路周方向寸法	[mm] 3 × 3.5
コイル巻数 [Turn/Pole]	3.5
コイル全長	[m] 3.62
定格励磁電流	[A] 737
定格電流密度	[A/mm ²] 34.9
定格電圧	[V] 2.0
抵抗	[m] 2.7
電力	[kW] 1.48
冷却水量	[L/min] 1.0
水温上昇（直流励磁の場合）	[] 21.2
圧力損失	[kg/cm ²] 3.2
ドリフトチューブ外周直径	[mm] 140
ドリフトチューブ内周直径	[mm] 13
ドリフトチューブ軸長	[mm] 52.48

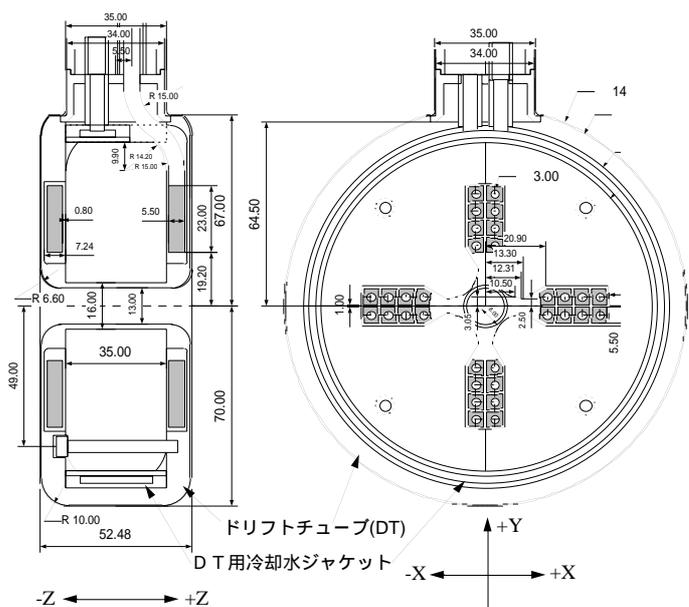


図1 試作した電磁石と製作中のDTの寸法図

2. 本磁石の仕様

本磁石は、入射部のDTで使う磁石であり、その設計値を表1に示す、又、実際に組込むDTの製作も進めており、そのDTを含めた全体図を図1に示す。今回、コイルの特性試験は、DTに組込まない状態での磁石単独で行った(大気中)。コイルは、絶縁材を施して、コイル間やコアとの隙間寸法を保ち、最大直流励磁状態に対応するようにした。

3. 電鑄コイルについて

従来のホローコンダクターを使って磁石を製作した場合、水路を潰さずに曲げる角度に限界がある為、コイルの小型化が難しく、又鉄心との干渉部分も多くなり、コア断面積も減少して、磁場の飽和傾向が強くなり、磁場強度が稼げなくなる。そこで、

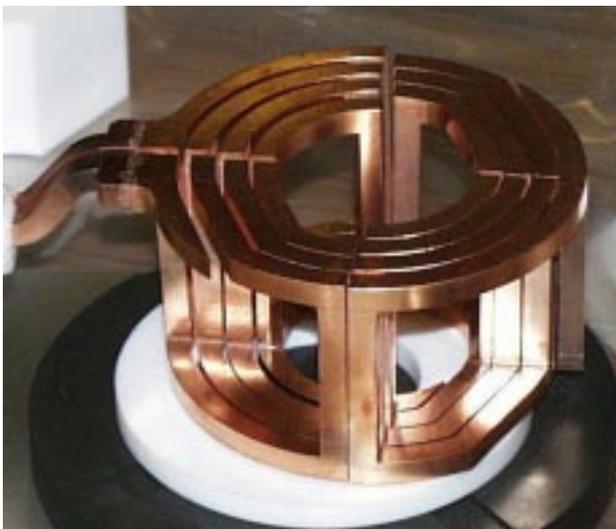


図2 電鑄コイルの完成写真



図3 絶縁材を取付け、コアに組込んで、DT用冷却水ジャケットで焼ばめ組立てした直後の写真

コイルの曲げ角が90度でも可能になるように、機械加工でコイルと水路を削りだし、上蓋を銅電鑄で形成してコイル化する事にした

本コイルのおおまかな加工手順としては⁽³⁾、
[1]円柱状の銅の塊から(4ポール全部の)水路部分を、コイルを巻く方向(一筆書き)になるように削りだし、[2]削りだした水路には、ワックス等の充填剤を敷き詰める、[3]その後、両端面の蓋として、電鑄を実施して所定の厚さの形成し、[4]充填剤を取り除いて、[5]コイル形状になるように機械加工を施す。以上の手順で、コアを巻く部分については溶接の必要の無いコイルが成形できる(但し、コアから立上る部分については、空洞{DTLタンク}外に出すコイルと溶接する必要がある)〔図2参照〕図3に、絶縁材を取付けて磁石に組込んだ完成写真を示す。

4. コイルの特性

電磁石をDTに組込む場合、DTへの熱伝導量及び軸方向の熱膨張量(目標はDT片側端面の最大膨張量が $10\mu\text{m}$ 程度)が問題となるので、図4に示す位置の表面温度と膨張量を測定した。図5において、コイルの励磁熱が、コアや固定台にもある程度伝わっている事が分かる。定格に近い直流励磁(700A)では、コイルの最大膨張は、約 $9\mu\text{m}$ (図6)だが、フル励磁では約 $30\mu\text{m}$ と大きくなり、このままでは実用的でない。しかし、実際にはパルス励磁(立上がり5ms、フラットトップ2ms、立ち下がり5msで、繰り返し50Hz)を行うので、熱膨張も $10\mu\text{m}$ 程度と予想でき、十分実用範囲に入ると思われる。

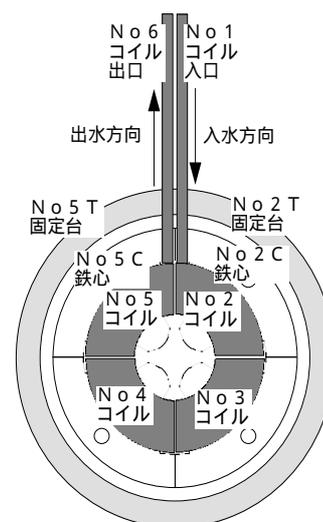


図4 コイル、コア及び固定台表面温度、歪測定位置(測定は大気中)

コイルの流量(図7)に関しては、定格の $1\text{L}/\text{min}$ は確保しているが、圧力損失が大きい為余裕が少ない。これは、コイルの曲げ角が90度のため、従来のホロコンに比べて、水路角の曲げ(90度エルボ)が増える為である。

以上の結果が

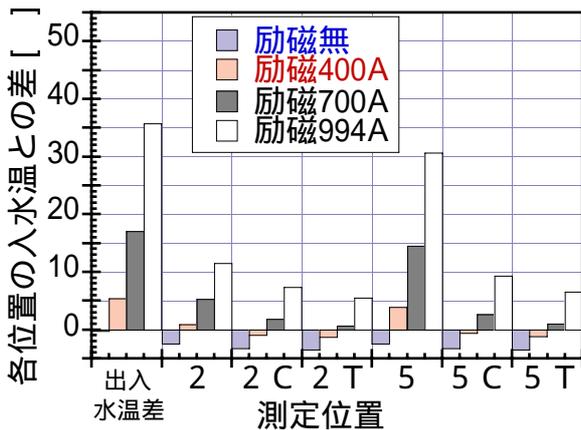


図5 直流励磁における各表面及び冷却水の温度上昇値 (1 L/min)

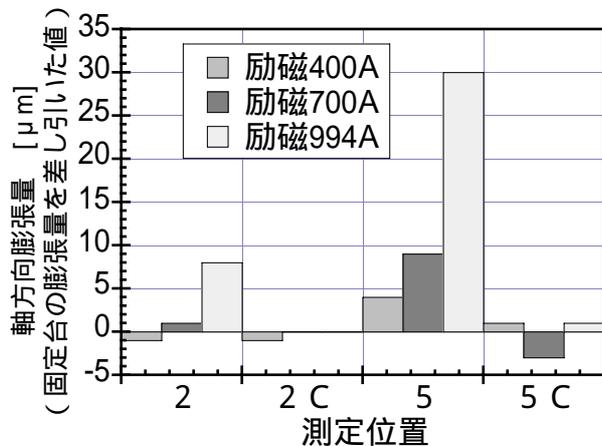


図6 直流励磁における各表面の軸方向膨張量 (水量; 1 L/min)

ら、次のパルスモデルでは、コイルの水路と導体断面積を増やし、水路の角も落として、曲げ損失も減らすことにする。

5. 磁場特性

ホール素子で測定した磁場強度 (図8) に関しては、ほぼ解析結果に近い。又、回転コイルで測定した4極磁場中心と(ポール先端間の)機械中心のずれは11 μm程度と僅かであった。

6. 結論及び今後の予定

今回、324MHzのDTL用収束電磁石(直流励磁用)を試作し、磁石特性を測定した。結論として、
 1) 機械加工と銅電鍍による新しい製法で、コイルの開発ができた。
 2) 銅電鍍コイルによって、従来のホロコンより小型で励磁発熱を少なくでき、なおかつポール断面積が十分に確保できる磁石を製作でき、我々の要求に

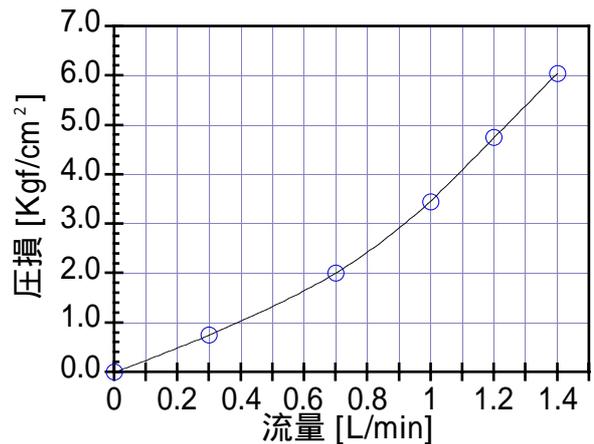


図7 流量と圧力損失の関係

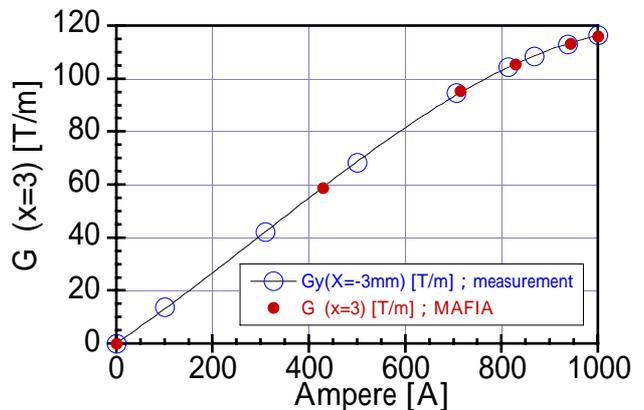


図8 励磁電流と磁束勾配(磁石中心付近)Gの関係(測定値と3次元解析MAFIAの値の比較)

も十分実用可能な形状にできた。

3) 通電試験の結果、コイルの軸方向膨張量は、定格に近い直流励磁(700A)では、30 μm程度あったが、実際のパルス励磁では、その1/3以下になると予想される。コイルの流量に関しては、定格の1 L/minは確保しているが、圧力損失が大きい為余裕が少ない。磁場強度に関しては、解析結果にほぼ近かった。

現在、本磁石のDT化及び、これらの測定結果を踏まえて、実機を反映したパルス磁石の試作を進めている段階である。

参考文献

- (1) K. Yoshino et al., Proceedings of the 21th Liner Accelerator Meeting in Japan, 198 (1996).
- (2) K. Yoshino et al., Proceedings of the 22th Liner Accelerator Meeting in Japan, 317 (1997).
- (3) K. Tajiri et al., Joint Hawaii Forum on Advanced Surface Technology in Japan and U.S.A (1998).