特別研究費に係る論文

# フェライトコアを用いた一次常温/二次低温型低熱侵入変圧器の試作と試験

石郷岡 猛\*<sup>1</sup>,二ノ宮 晃\*<sup>2</sup>,普天間 太地\*<sup>3</sup>

## Manufacture of Low Heat In-leak Ferrite Core Transformer with Room Temperature Primary and Low Temperature Secondary

Takeshi ISHIGOHKA\*<sup>1</sup>, Akira NINOMIYA\*<sup>2</sup>, Taichi FUTEMMA\*<sup>3</sup>

#### (Received October 1, 2007)

## 1. はじめに

超電導マグネットの励磁には,常温にある電源から低 温領域まで大電流を供給しなければならない。しかし, 導線を使って供給する場合,太い導線による熱侵入によ る冷媒の蒸発が問題となる、そこで今回その解決策のひ とつとしてフェライトを鉄心に用いた変圧器を利用して, 一次側(銅線)常温,二次側(超電導線)低温の状態で電流を 供給することを考案した。すなわち、鉄心を介してエネ ルギーを常温部より低温部に輸送する方式であり、鉄心 にはセラミックスであるため熱伝導率が小さいフェライ トを用いて、常温部より低温部への熱侵入を抑制するも のである。この方式を用いれば、一次側、二次側共に低 温部に配置する場合に比べ、①一次巻線への電流リード による熱侵入がない, ②一次巻線の銅損が常温部のみで 発生するため、冷媒の蒸発が低減する、③鉄心の半分の みが低温部に配置されるため,低温領域で発生する鉄損 が半減し冷媒の蒸発が低減する、というメリットが期待 できる。本稿では、小型の装置を試作し、原理確認の実 験を行ったので、その概要を報告する。

#### 2. 予備実験

#### 2.1 ロゴスキーコイル型電流計

一般に超電導マグネットの励磁は極めて低電圧で行われる。本実験では、原理確認を目的としたため、変圧器の二次側は直接短絡して実験を行った。二次側は低温領域に置かれているため直接電流計を挿入することはできない。また、出来るだけ二次回路の抵抗を低減するため、シャント抵抗の挿入を避ける必要があるので、二次電流

\*3:2006年度電気電子工学科卒研学生

の測定には、ロゴスキーコイル型電流計を使用した。鉄 の飽和の影響や温度特性を避けるため、巻芯には非磁性 の材料を用いた。ロゴスキーコイルの較正は常温におい て行った。ロゴスキーコイルの外観を図1に、較正回路 を図2に示す。

図2の回路を使用してロゴスキーコイル型電流計の較 正グラフを作成した。二次側の電流を0から120Aまで 操作,この二次側電流により誘導されたロゴスキーコイ ルの電圧を測定して,図3に示す較正グラフを作成した。 一次,二次電流の間にはほぼ線形の関係が得られた。



図1 ロゴスキーコイル



<sup>\*1:</sup>エレクトロメカニクス学科教授 (ishigoka@st.seikei.ac.jp)

<sup>\*2 :</sup> エレクトロメカニクス学科助手



## 2. 2 フェライト鉄心の B-H 特性の測定

使用した TDK 社製の鉄心 PC40 の B-H 特性を測定した。 図 4 の回路を組み一次側に交流 50Hz の交流を印加し, その電流値 *I*,二次側電圧 *V*<sub>2</sub>を測定し,それらの値を基 に,鉄心の磁束密度 *B*,磁界 *H*を求め, B-H 曲線を求め た。

PC40の常温および低温での測定結果を図5に示す。図 5より,常温時に比べ低温時では最大磁束密度が増加し ている事が判る。

なお、使用した鉄心の仕様は、断面積 S = 13mm× 12mm=1.56×10<sup>-4</sup> [m<sup>2</sup>]、磁路長  $I=17.56×10^{-2}$ [m]であ る。また、コイル巻数は一次、二次共に 150 ターンであ る。



図5 PC40のB-H曲線

## 2.3 熱伝導率測定試験

本方式の変圧器においては、一次側が常温、二次側が 液体窒素中に置かれており、鉄心の上半分が常温、下半 分が77Kであるため、フェライトコアを通る伝導熱が重 要になる。このため、図6に示す熱伝導率測定装置を用 いてフェライトの熱伝導率を測定した。



図6 フェライトコアの熱伝導率測定装置

すなわち,密閉した断熱容器の中に,両端を10mm 残 し発泡ウレタンで覆って断熱した棒状のフェライトを収 納した。このときフェライトの上部は容器から8mm 程 度出るようにし,下部は液体窒素中に浸漬するようにし た。フェライト上部にマンガニン線のヒーターで熱を加 え熱電対で温度を一定に保ち,この状態で蒸発した気体 の蒸発量をガス流量計により測定し熱伝導率を算出した。 なお,フェライト上部の温度が安定するように銅ブロッ クで覆い,その温度を熱電対で測定した。得られた測定 結果を表1示す。

表1 フェライト PC40 の熱伝導率測定データ

フェライト棒上部温度	250 K
フェライト棒下部温度	77K
室温	297K
窒素ガス蒸発量	0.9 L/min
フェライト棒の長さ	40.5 mm
フェライト棒の断面積	133 mm <sup>2</sup>

以下に熱伝導率を求める式を示す。標準状態(273K)に おける毎秒蒸発したガスの体積は

$$V_{0^{\circ}C} = V_{T} \times \frac{273}{T} \times \frac{1}{60} \quad [m^{3/s}]$$

ここで $V_{\rm T}$ は室温での気体の毎分蒸発量 $[m^3/min]$ , Tは 測定した室温[K]である。次に毎秒の液体窒素の蒸発量  $[m^3/s]$ をエネルギー流に換算すると

$$W_{in} = V_{0C} \times d \times q \times 10^{-3}$$
 [W]

ここで, *q* は液体窒素の蒸発潜熱で 199[kJ/kg], *d* は窒素 ガスの標準状態(0℃, 1atm)における密度で 1.251 [kg/m<sup>3</sup>] である。熱伝導率は次式で求められる。

$$k = \frac{l \cdot W_{in}}{S \cdot (T - T_0)} \quad [W/m \cdot K]$$

1 は液面から常温部までのフェライトの長さ[m], Sはフ ェライトの断面積[m<sup>2</sup>],  $T_0$ は液体窒素温度[K]である。

上式に数値を代入すると PC40 の熱伝導率として 3.48 [W/m・K]が得られた。

## 3.実験

本研究で作成した変圧器は,一次側 0.3mm \$ の銅線 1000 ターン,二次側ビスマス系高温超電導線 10 ターン である。二次側の超電導線は,巻線作業時の曲げ応力に より劣化しないよう,直径 50mmの巻枠を作製し巻き付けた。その外観を図7に示す。

また,鉄心には図7に示すように,TDK PC40I コア四本を「口」の字型に組み立てたものを使用した。



図7 試作した変圧器



図8 使用したフェライトコアの寸法



実験は、図9に示す回路で、変圧器の一次/二次側共に 液体窒素に浸漬した場合と、二次のみ液体窒素に浸漬し た場合の二種類行なった。

#### 3.1 一次/二次共に液体窒素に浸漬した場合

この実験では,変圧器全体を断熱容器内に収め密封し, 一次/二次共に液体窒素に浸漬した。

実験は、一次側の電流を0から1Aまで0.05Aごとに 設定し、その時のロゴスキーコイル型電流計の電圧を測 定した。このロゴスキーコイル型電流計の電圧値を予備 実験で測定した較正グラフに照らし合わせ二次側電流を 求めた。また、電流を0から2Aまで0.25Aごとに設定 し、その時の液体窒素の蒸発量を測定した。

## 3. 2 一次常温/二次低温型実験

変圧器の二次側のみを断熱容器に密封し低温領域内に 配置し、一次側は容器の外で常温の状態にした。

測定は一次/二次低温実験と同様に,蒸発量とロゴスキ ーコイル型電流計の電圧を測定した後,較正グラフから 二次電流を求めた。

以上の測定結果を図 10 および 11 に示す。





#### 4. 考察

## 4. 1 二次側電流値について

一次/二次低温の場合,および一次常温/二次低温の場 合共に一次電流に対し,二次電流が巻数の逆比より若干 低かった。これは,一次電流に含まれる励磁電流の割合 が大きかったためと考えられる。

また,一次/二次低温型よりも一次常温/二次低温の場 合の方が,同一の一次電流に対する二次電流が小さい。 これは,図5に示すように,低温の方がフェライトコア の等価的透磁率が高く,鉄心全体を低温に浸漬した場合 の方が,励磁電流の割合が小さかったためと考えられる。

## 4.2 蒸発量について

ー次/二次低温型の実験の場合,一次側巻線の抵抗によ る発熱が原因で蒸発量が上昇すると推定される。

本実験で使用した変圧器では、およそ 0.9Aを超えると、 一次常温/二次低温型の方が一次常温/二次低温の場合よ りも熱侵入が少なくなることが分かった。この値はフェ ライトのサイズ、一次巻線に使用する銅線の太さ、ター ン数による抵抗値の増減に影響を受けるため装置により 異なるが、基本的に電流が増加すると一次常温/二次低温 型の方が熱侵入が小さくなることが確認できた。

今回の実験では流量計の測定可能範囲を超えたため図 11 で示した値までしか測定できなかったが、蒸発の原因 が主に一次巻線(銅線)の抵抗によるものと思われるので、 ジュール損失の特性から一次電流の二乗で蒸発量が上昇 していくものと考えられ、大電流域では、本方式のメリ ットはより大きくなるものと思われる。

ー次常温/二次低温型実験では、外部からの熱侵入に関係するものがフェライトだけになる。この実験でも一次 側の巻線の発熱は観測されたが、これは空気中に放散さ れるため液体窒素の蒸発の増加に及ぼす影響は小さい。

なお、一次巻線の発熱によりフェライトを通して侵入

する熱が上昇することも考えられる。予備実験で測定し たフェライト PC40 の熱伝導率から推定すると、これに よる熱侵入による窒素ガスの蒸発量は 0.2 [ℓ/min]程度と 見積もられ十分小さい。

#### 5. 結 論

本実験により,一次常温/二次低温型変圧器の方が,全 体を低温領域内に配置する一次/二次低温型変圧器に比 べ,大電流になるほど熱侵入の点では優れていることが 確認された。

ー次常温/二次低温型でも、電流の増加と共に一次側の ジュール損失が増加するが、フェライトの熱伝導率が十 分小さいため、液体窒素の蒸発量の増加には大きく影響 しないことがわかった。

また,今後は負荷試験を実施すべきであるがその場合 鉄損も影響してくる。その場合でも,鉄心の下端のみ液 体窒素に浸漬している本方式は液体窒素の蒸発量の増加 は抑制されるものと思われる。

なお,予備実験で示した様にフェライトの特性は温度 に依存している。そのため一次常温/二次低温型の場合, フェライト鉄心の中で異なる温度が混在している特殊な 状況になる。それによる機械的歪みの問題などについて は今後検討が必要であろう。

#### 参考文献

(1) 普天間 太地,平成 18 年度成蹊大学工学部電気電子 工学科卒業論文「フェライトコアを用いた一次常温 二次低温型低熱侵入変圧器の試作」,2007年3月