誘導法による臨界電流の測定

海 保 勝 之*・小 室 和 男*・小 山 健 一*

小 原 健 司*・南 波 孝 治**・安 富 強**

* 電子技術総合研究所 東京都田無市向台町 5-4-1

** 武蔵工業大学 東京都世田谷区玉堤 1-28-1

(1977年 8月22日受理)

Critical Current Measurement by Inductive Method

Katsuyuki KAIHO*, Kazuo KOMURO*, Kenichi KOYAMA*,
Takeshi OHARA*, Takaharu NAMBA** and Tsuyoshi YASUTOMI**

* Electrotechnical Laboratory, 5-4-1 Mukodai-cho, Tanashi-shi Tokyo

** Musashi Institute of Technology, 1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo

(Received Aug. 22, 1977)

Synopsis :

The critical current of superconductors was measured by an inductive method. The experimental set-up consisted of a superconducting magnet into which a one turn, short-circuited sample was inserted. During the external field rise, the current will be induced in the sample. When this induced current rises up to the critical current, they will collapse. By the voltage taps attached on the sample and a pick-up coil, the quenches of the induced current was measured.

The critical current can be calculated using the values of the external field currents, their sweep rate and the quenching time.

The critical current of the multifilamentary superconductors was measured by this method and compared with that measured by the usual method of current and voltage measurements. They agreed well each other.

This inductive method is very useful to induce the large currents in the superconductor without potential leads and power sources.

1. まえがき

近年、大形超電導電磁石を各種装置へ応用するための研究が盛んに行なわれるようになったが、それにつれて、導体の電流容量も大きくなってきており、その臨界電流の測定には大容量の電源が必要である。このために、十分な電源設備がない場合には、導体をできるだけ多数の小容量の部分に分解した後に、各部分の臨界電流を測定し、それらを加え合わせて全臨界電流を推定することが行なわれている。しかし、このよう

な方法は、導体によっては部分に分解することができずに不可能な場合があり、また、部分に分解することができたとしても、低磁界領域での臨界電流は未だ、大き過ぎて測定できないことがある。さらに、極細多芯線においては、導体全体の断面積が大きくなると、自己磁界が大きくなり磁気的な不安定現象を起こす可能性がある。また、その断面内の電流分布も臨界電流までに到る過程が部分に分けた場合とは大きく異なる。これらの効果は、導体全体を分解することなく電流を流して初めて試験できると考えられる。その他に

も、超電導電磁石は、臨界電流値の大きな低磁界領域で磁氣的に不安定になり易いことは良く知られており、低磁界領域における臨界電流特性もぜひ明らかにしておく必要がある。

これらのことから、大電流容量の導体においても導体を部分に分解することなく臨界電流を測定することが望ましい。特に導体をパルスの励磁するような場合には、その交流損失を推定するために全磁界領域における臨界電流を測定しておかなければならない。

本論文においては、二次側短絡の一種の変流器を構成して、一次側の小電流により二次側の超電導線に大電流を誘起させ臨界電流を測定する方法および実験結果について述べる。

同様の方法により P. Turowski 氏らによって、大容量を有する超電導線の臨界電流が測定されているが、二次側の超電導線を単層のソレノイドとしているために自己磁界の影響が大きく、誤差が入り易い¹⁾。また、同一形状の一次側巻線用の超電導電磁石を使用した場合には、同一の条件であれば、試料の巻数が小さい方が大きな電流が誘起できる。

ここでは、二次側の超電導線を一卷きの短絡環として、測定試料を単純化し、試料に加わる磁界強度が一樣となるようにして測定する。本方法によれば、原理的には数千 A 以上の電流を容易に発生させることができることが明らかとなった。また、通常の方法により測定した臨界電流値と比較した結果、良く一致していることが確認された。

2. 測定原理

本測定法の基本的な回路図を Fig. 1 に示す。回路 A は変流器の一次側に相当するもので、回路 B (試料回路) は試料超電導線を使った回路であり、変流器の

二次側に相当する。回路 C は試料超電導線に一定の磁界を加えるためのものであり、回路 A の電流変動により回路内の電流が変化しないように誘導電流阻止用のダイオードが直列に入っている。

回路 C に所定の電流を流して試料に一定の磁界を加えた後に回路 A の電流を変化させると、試料回路の電流は次式に従って変化する。(回路 C の電流を変化させた時に試料回路に電流が誘起されるが、十分に時間をおくと、試料回路の接続抵抗のために減衰してしまう。)

$$L_s \frac{di_s}{dt} + R_s i_s = M \frac{di_1}{dt} \quad (1)$$

ここで、 L_s , R_s はそれぞれ試料回路のインダクタンスおよび抵抗であり、 i_s , i_1 はそれぞれ試料回路および回路 A の電流である。また、 M は回路 A および試料回路の間の相互インダクタンスである。

今、一次側の電流上昇速度を一定にした場合には、(1) 式より容易に二次側の電流を計算することができてその結果は次式のようにになる。

$$i_s = \frac{M}{R_s} \frac{di_1}{dt} (1 - e^{-\frac{R_s t}{L_s}}) \quad (2)$$

特に、試料回路の抵抗 R_s が零の場合には、一次側の電流上昇速度に無関係に次式が得られる。

$$i_s = \frac{M}{L_s} i_1 \quad (3)$$

本方法においては試料回路の抵抗 R_s は零とすることはできないが、 $L_s \gg R_s t$ とすることができれば近似的には (3) 式で試料中の電流 i_s を推定することができる^(付1)。

正確には (2) 式により i_s を求める訳であるが、 i_s は時間とともに Fig. 2 のように変化する。 i_s の最大値 i_{sm} は $t = \infty$ の場合に流れるが、その値は次式のようにになる。

$$i_{sm} = \frac{M}{R_s} \frac{di_1}{dt} \quad (4)$$

したがって、 i_{sm} の値を大きくするためには、 R_s の値を小さくし、 M , di_1/dt の値を大きくすれば良いことがわかる。

このようにして、試料回路の電流を誘起させてゆくと、やがて試料の臨界電流値に達する。臨界電流に達したことは、試料にとり付けた電圧端子の振れから検出することができる。この時

Fig. 1 Experimental circuits of inductive method.

Fig. 2 Variation of the induced current in the sample with time.

の時刻および各回路定数から、(2)式によって試料の臨界電流を推定することができる。

3. 実験装置および試料

Fig.3 は前述の方法により、超電導線の臨界電流の測定実験を行うための装置の概要を示している。

超電導磁石 2 は試料に一定の直流磁界を加えるためのものであり、Fig.1 の回路Cに含まれる。超電導電磁石 1 は Fig. 1 の回路A に対応するものであり、一定変化速度の直流磁界を発生し、試料に大電流を誘起させるためのものである。

超電導電磁石 1 および 2 の寸法および形状は、

Table 1 に示すようなものである。

これらの超電導電磁石の内側に Fig. 4 に示すような試料が置かれている。試料は内径がおおよそ 2.2cm の円形でベークライト製のボビンに固定されている。この試料はハンダ付けにより両端おおよそ 5.5 cm をオーバーラップさせて接続されている。この試料の内

Fig. 3 Experimental arrangement.
Mag. 1: Magnet for the constant sweep rate of field.
Mag. 2: Magnet for constant field.

Table 1 Specification of the superconducting magnets

	MAGNET 1	MAGNET 2
INNER DIAMETER (CM)	3.40	5.83
OUTER DIAMETER (CM)	5.76	8.91
LENGTH (CM)	4.94	4.94
TOTAL TURNS	1,550	2,806
COIL CONSTANT (CENTER) (G/A)	288	392
INDUCTANCE (mH)	58.5	410

Fig. 4 Sample.

Table 2 Specification of the samples

	SAMPLE I	SAMPLE II
CROSS-SECTION	0.35 mmφ	1.2×4.0 mm
FILAMENT DIAMETER (μm)	22.5	17.0
NUMBER OF FILAMENT	121	3,025
Cu TO SC RATIO	1.0	5.6
JOINT RESISTANCE (×10 ⁻⁸ Ω)	2~3	0.5~0.6
INDUCTANCE (×10 ⁻⁸ H)	3.6	3.6

側にはサーチコイルが 100 T 巻かれている。これは後に述べるように試料の常電導転移を検出することと、試料回路の電流の減衰時定数を測定するためのものである。その他に、常電導転移を検出するために、オーバーラップしていない部分の両端 (Fig. 4 A および B) に電圧端子をとり付けた。特に電圧リード線は超電導線に沿わせて引き出した後に撚り、できるだけ誘

導電圧が重畳されないようにした。

また、試料超電導線としては、すでに別の測定により、その臨界電流が明らかとなっている試料Ⅰと部分的にしか臨界電流が明らかとなっていない試料Ⅱとを準備した。これらの超電導線の断面寸法その他は、Table 2 に示すようになっている。

4. 測定方法および測定結果

4.1 接続部の抵抗測定

試料の接続部の抵抗の値を把握するために、接続部の短い試料を作り、その接続部の抵抗測定を行った。測定に使った超電導線は試料Ⅰと同じものであり、接続部の長さを1cmとし、ハンダにより接続を行った。Fig. 5 は接続部に垂直に磁界を加えた場合の電圧電流特性を示している。ハンダが低磁界領域では、超電導性を示すため抵抗値の電流依存性がある³⁾。Fig. 5 において、通電電流 100A における平均抵抗を計算してみると Fig. 6 のようになる。図から明らかなように、接続部の抵抗は超電導線間に存在する常電導金属（銅およびハンダ）の磁気抵抗効果のため磁界の増加とともに大きくなる。また、その値は本試料の場合、 $1.1 \sim 1.4 \times 10^{-7} \Omega$ 程度である。大容量導体においては、接触面積も大きくなり、接続部も長くとれるため、このような測定では計れなくなる。したがって、次に述

Fig. 5 V-I characteristics of a joint between two superconducting wires.

Fig. 6 Resistance of a joint between two superconducting wires.

べるような試料回路中の電流の減衰率から求めるのが便利である。

4.2 試料回路の電流減衰時定数の測定

本測定法により試料回路に誘起される電流を推定するためには、試料回路の抵抗 R_s を測定しておかなければならない。ところで、試料回路のインダクタンス L_s は、計算によって求めることができる。したがって、試料回路の電流の減衰時定数 τ_s が測定できれば R_s を求めることができる。

そこで、試料回路の時定数を測定するために次のような実験を行った。まず、Fig. 3 において超電導電磁石 1 および 2 を直列に接続して、Fig. 7(a) に示すような回路を構成する。この回路において、超電導電磁石中の電流を Fig. 7(b) に示すように変化させる。時刻 $0-t_1$ の間は試料に一定の磁界を加えるために超電導電磁石中に比較的ゆっくりとした上昇速度で電流を流す。すると、試料回路中には(2)式にしたがって電流が誘導されるが、時刻 t_1 で超電導電磁石中の電流上昇を停止し一定値に保てば試料中の電流は減衰し始める。試料回路中の電流が十分小さくなった時刻 t_2 にて超電導電磁石中の電流を少しだけ比較的速い上昇率で上げ、試料回路中に測定に十分なだけの電流を誘起させる。この後、超電導電磁石中の電流を一定に保持

Fig. 7 (a) Experimental circuit to measure the decay time of induced current in the sample.
(b) Variation of the magnet current and sample current with time.

して試料回路内の電流を減衰させる。試料内の電流が減衰することにより試料回路が発生している磁界も電流に比例して減衰するためサーチコイルによって、その変化の様子を知ることができる。試料回路の電流が減衰する時には、超電導磁石回路に誘導電圧が発生するが、回路内にダイオードが入っているため誘導電流はほとんど流れない。したがって、サーチコイルの出力は、ほぼ試料回路の電流の減衰と比例したものになる。なお、この時のサーチコイルの出力電圧 E_s は次式ようになる。

$$E_s = NR_s i_s(t) \quad (5)$$

ここで、 N はサーチコイルの巻数である。

Fig. 8 は試料Ⅱについて外部磁界が 20 KG の場合のサーチコイル電圧の減衰の様子を示している。このような測定から求めた時定数の値から試料回路の抵抗を求めたものを Fig. 9 に示す。使用した電源の停止時の電流リップルが大きかったため、Fig. 8 にも明らかに、サーチコイル電圧にリップルが出てしまい精度の良い測定ができなかった。このため、抵抗

Fig. 8 Decay of the sample current with time.

Fig. 9 Magnetic field dependences of the joint resistances of the sample circuits calculated from the decay times of the sample currents.

の測定値は多少ばらついているが、性能の良い電源を用いれば、もっと精度の良い測定ができるものと思われる。

試料Ⅰの接続部の抵抗値は、おおよそ $2 \sim 3 \times 10^{-8} \Omega$ であるが、4.1 で測定した抵抗値は $1.1 \sim 1.4 \times 10^{-7} \Omega$ 程度であり、接続部の長さの違いを考慮すると、両者は大体良く一致していると考えられる。

試料Ⅱは試料Ⅰに比べ接触面積が大きく、抵抗値は小さくなっているが、あまり磁気抵抗効果は示していない。

4.3 測定例

Fig. 10 は試料Ⅱについての測定結果の 1 例を示したものである。実験手順は、まず、Fig. 3 において、

Fig. 10 (a) Current variation in the outer superconducting magnet.
 (b) Voltage variation of the sample due to the appearance of normal resistance.
 (c) Voltage variation measured by search coil inserted inside the sample.

外側の電磁石 2 により 試料に一定の 磁界を加えた後に、試料回路の誘導電流が十分減衰するまで時間をおく。次に、内側の電磁石 1 に変化する電流を流し、試料中に十分大きな誘導電流を生じさせる。

Fig. 10(a)は電磁石 1 の電流変化を示しており、時間と共に一定の変化率で上昇している。Fig. 10(b)は試料にとり付けられた電圧端子の変化を示しており、時刻 t_1 で超電導状態が破れていることがわかる。さらに、時間の経過と共に電圧は、また元へ戻り、 t_2 で

再び超電導状態が破れている。Fig. 10 (c) はサーチコイルの出力波形を示すものであり、磁界の増加と共に電圧が表われ、時刻 t_1 で大きな変化を示す。これは Fig. 10(b) の常電導転移発生による電圧上昇と、良い対応を示している。

このような測定から、外部磁界の変化につれ、試料中に電流が誘起され、時刻 t_1 で臨界電流に達したか、または flux jump が起こって超電導状態が破れたことが推定される。

4.4 臨界電流の値

以上に述べた方法により測定して求めた臨界電流の値を Fig. 11(a), (b) に示す。

Fig. 11 (a) は試料 I についての値を示すものであり、比較のために、直接 short sample 試験により通常の方法で測定した値も示してある。また Fig. 11 (b) 中における $\times$ も short sample 試験の結果である。これらの両者は、良い一致を示していることがわかる。したがって、本測定法は、十分に臨界電流の推定に役立つ方法であると思われる。なお、Fig. 11 (b) に示す臨界電流の値は、試料回路の抵抗 R_s を測定値をそのまま使用して計算したもの ($\bullet$ 印) と、 $R_s=0$ として計算したもの ($\circ$ 印) とを同時に示してある^(付-2)。図から明らかなように、高磁界側において、第 2 式において R_s/L_s の値がより小さくなるため、 $R_s=0$ と

Fig. 11 (a)

Fig. 11 Critical currents of the samples measured by the inductive method.

近似して求めた値と(2)式により求めた値とが一致するようになる。

5. まとめ

変圧器の原理を利用して、試料超電導線中に大電流を誘起させ、大容量導体の臨界電流を測定する方法について述べた。ここで得られた主な結論は次のようである。まず、利点を挙げると

(1) 小容量の電源で、大電流を試料中に誘起させることができるため、大容量超電導線の臨界電流が容易に計れる。

(2) 大電流用のパワーリードなしに測定できるため実験装置が小さくて済む(10 cm 直径のガラスデュワーを用いた実験で 6,000 A までの電流を誘起することができた)。

(3) 試料中の電流上昇速度の急上昇が容易であるため、パルス用超電導線の電流上昇に対する試験が容

易にできる。

(4) 低磁界中においては、一般に超電導線の臨界電流が高いため、常電導転移時に試料が焼ける等の事故が起こり易いが、そのようなことがない。

一方、欠点としては

(1) 臨界電流以上の電流を流した場合の特性がわかりにくい。

(2) 電圧の発生が臨界電流に達したために起こるものか、または flux jump 等の磁氣的不安定性によるものか判別しにくい。

(3) 臨界電流を求めるためには、種々の測定値を使って計算する必要があるため精度が悪くなる。

参 考 文 献

一般的に

- 1) P. Turowski et al: Proceedings of the 5th Magnet Technology Conference, p.735
- 2) G. Rupp: Proceedings of the 6th ICEC, p.385
- 3) 田中他: 第12回低温工学研究発表会 A1-10

(付録 1) $L_s \gg R_s t$ の場合の i_s の値

試料回路の電流 i_s は(2)式で与えられるが、これをテーラー展開して、2次の項までとれば次式のようにになる。

$$i_s \approx \frac{M}{L_s} \frac{di_1}{dt} t \left(1 - \frac{R_s t}{2L_s}\right) \quad (\text{付-1})$$

App. 1 Error of an approximate equation (app.-(2)) for the induced current in the sample.

App. 2 Error of the induced current in the sample due to the error of joint resistance (R_s).

電流の上昇速度が一定の場合には (付-1) 式は次式のようにになる。

$$i_s \approx \frac{M}{L_s} i_1(t) (1 - \frac{R_s t}{2L_s}) \quad (\text{付-2})$$

(付-2) 式によって i_s を求めた場合の誤差 Δi_s と i_s との比は次式のようにになる。

$$\begin{aligned} \frac{|\Delta i_s|}{i_s} &= \frac{|(2) \text{式} - (\text{付-2}) \text{式}|}{(2) \text{式}} \\ &= \left| 1 - \frac{\frac{R_s}{L_s} t (1 - \frac{R_s}{2L_s} t)}{1 - e^{-\frac{R_s}{L_s} t}} \right| \quad (\text{付-3}) \end{aligned}$$

(付-3) 式を図示すると (付-1) 図のようになる。したがって、 $R_s t/L_s < 0.51$ であれば (付-2) 式によって、5%以内の誤差で i_s を求めることができる。

(付-2) 試料回路の抵抗 R_s の誤差が i_s の値に与える影響について

本測定法においては、 R_s が磁界依存性を有するために、各強度の磁界においてそれぞれ R_s の値を測定する必要がある。しかし、ここで行った測定法では、電源の影響で良い測定ができなかったため、 R_s の値の誤差の影響について検討してみる。

(2) 式を R_s で微分すると

$$\frac{di_s}{dR_s} = -\frac{M}{R_s^2} \frac{di_1}{dt} \left\{ 1 - \left(1 + \frac{R_s}{L_s} t \right) e^{-\frac{R_s}{L_s} t} \right\} \quad (\text{付-4})$$

したがって、 R_s の誤差を ΔR_s とすれば、 i_s の誤差 Δi_s と i_s の比は次式のようにになる。

$$\frac{|\Delta i_s|}{i_s} = \frac{\left| 1 - e^{-\frac{R_s}{L_s} t} \left(1 + \frac{R_s}{L_s} t \right) \right|}{\left(1 - e^{-\frac{R_s}{L_s} t} \right)} \frac{|\Delta R_s|}{R_s} \quad (\text{付-5})$$

(付-5) 式より $|\Delta i_s|/R_s/|\Delta R_s|/i_s$ を図示すると (付-2) 図のようになる。したがって、 $R_s t/L_s = 1$ の場合でも $|\Delta R_s|/R_s = 0.1$ 程度であれば、 i_s の誤差は5%以内となる。