アルミニウム安定化 Nb-Ti 超伝導ストランドケーブル の試作とその安定性

広 田 慎 二 ・ 安 河 内 昂

日本大学理工学部 東京都千代田区神田駿河台 1 丁目 8 番地
(1979 年 7 月 18 日受理)

Fabrication and Performance of Aluminium Stabilized Nb-Ti Cabled Conductors

Shinji HIROTA and Kō YASUKŌCHI

Department of Physics, College of Science and Technology, Nihon University
1-8 Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo

(Received July 18, 1979)

Synopsis :

Aluminium stabilized superconducting cables were prepared in order to investigate their cryostatic stability. The sample are seven-strands cabled conductors composed of copper-clad, single core Nb-Ti wires and copper-sheathed, high purity aluminium wires and dipped in Pb-Sn solder. From the measurements of the voltage versus current characteristics, the cold end recovery current has been determined as a function of an external field. A considerable increase of the recovery current has been obtained as compared with the copper stabilized cable. Simple fabrication method proposed as well as the improved recovery current may prove the possibility of light-weight, compact superconducting magnets.

1. はじめに

現在、超伝導線の安定化材としては、無酸素銅が用いられているが、銅の代替物質として、高純度アルミニウムを用いる事が試みられている。高純度アルミニウムは、無酸素銅に比べて、極低温における電気抵抗を低くすることができ、熱伝導率が大きく、比重は銅と比較して 1/3 以下である。したがって安定性を向上させることができ、またマグネットが軽量となり、初期冷却の負荷が軽減される。このことは経済的には安価となるという利点につながる。さらに、アルミニウムの表面を陽極酸化することによって Al_2O_3 による絶縁をほどこすことができる。これは、従来のポリビニールフォルマル絶縁に比して 100 倍の熱伝導率をもちその厚さを 1/10 にできるものである。また、高純度アルミニウムを変形することによって生ずる歪は、数

ヶ月室温におくことによって、ほぼ取りのぞかれるので、歪を取りのぞくための熱処理を必要としない。以上のように安定化材としてすぐれた特質を持つ高純度アルミニウムが、超伝導線においてまだ実用化されていないのは、非常に軟かい材質であるために、超伝導材 (Nb-Ti) と一緒に線引することが困難であり、機械的強度が 4 kg/cm^2 (20°C にて) で銅の 1/6 程度であり切れ易いことによる理由による。

以上の欠点を克服し、実用線材に使用する方法として、アルミニウム複合超伝導線の製造法の改良、補強材の付加などが試みられ、今日までいくつかのアルミニウム安定化線材およびマグネットが試作された。Murase 等のマグネット (約 20 kG)¹⁾、Nomura 等のマグネット (約 50 kG)²⁾、井上、斎藤の線材³⁾、Wang 等のマグネット (約 20 kG)⁴⁾ Young 等の線材⁵⁾、永田、細田等の大容量線材⁶⁾ 等の仕事がそれである。これら

はいずれも、Nb-Ti をアルミニウムで安定化したものである。しかし、そのほとんどではアルミニウムの電気抵抗が無酸素銅レベルのものであり、主にマグネットの軽量化と、価格の軽減をねらったものといえる。たとえ高純度アルミニウムを使用しても、 300°C

以上での Nb-Ti の熱処理により、伸線のための補助材として用いられている銅が拡散してしまい、その電気抵抗が無酸素銅レベルまで劣化してしまっている。

そこでわれわれは、高純度アルミニウムの低い電気抵抗の特性を生かす試みの一つとして、機能分離をおこなった複合超伝導線を考えた。すなわち、従来のように、アルミニウムにうめ込んだ Nb-Ti や、銅にうめ込んだ Nb-Ti とアルミニウムという monolithic な導体構成をやめて、アルミニウムを無酸素銅管にうめ込んで純粋に安定化ユニット線として独立して作り、これを無酸素銅管にうめ込んだ Nb-Ti 線とより合わせ、その後 Pb-Sn 半田に dip することにした。こうすれば、Nb-Ti の熱処理は、安定化ユニット線とは別個におこなうことができ、熱処理による、アルミニウムの抵抗の上昇は防ぐことができる。また、高純度アルミニウムの機械的強度の低いことは、まわりの銅により強化され、線引加工での断線もなくなる。さらに強度を増す必要があれば、補強材をユニット線として加えてやることもでき、normal/super の比を変えることも容易である。したがって、これら安定化線、超伝導線、補強線を用意すれば、種々のマグネットに対応した導体を作ることができる。しかもこの方法は何等新しい技術を必要とせず、したがって容易であり、経済的である。このような考えから、まずユニットとなるストランド線を作りそれ等をより合わせ Pb-Sn 半田に dip した高純度アルミニウム安定化超伝導線を製作し、試験することにした。

2. 実験方法

われわれは、無酸素銅管（純度 99.99%）に高純度アルミニウムのロッド（純度 99.999%）を挿入し、これを伸線した安定化ユニット線（Cu/Al=19/81）を製作した。この線の表面に被覆してある銅を含めた 4.2 K 中での overall 電気抵抗率は、 $3 \times 10^{-9} \Omega \text{cm}$ 程度で

Fig. 1 The configuration of 7-strands cable strand diameter : 0.182 mm.

Fig. 2 Sketch of the sample holder.

あり、この値は一般に安定化に用いられている銅の抵抗率の $1/5$ 程度である。次にこの無酸素銅被覆高純度アルミニウム線と銅被覆 Nb-Ti 線（Cu/Sc=1/1）をより合わせた高純度アルミニウム安定化複合超伝導線を作り、その電圧（V）～電流（I）特性を実験した。なお、比較のために、高純度アルミニウム線のかわりに同じ径の無酸素銅線（純度 99.99%）を用いた同型の無酸素銅安定化複合超伝導線も作って実験した。ストラ

ドケーブルは、7本の素線よりできており、素線の直径は、0.182mm であり、Pb-Sn 半田に dip した。Fig. 1 は実験に使用されたストランドケーブル試料の断面図である。なお実験に際して、熱暴走による試料の溶断を防ぐために、試料に発生する電圧がある設定値（可変）をこえた場合、1/100 秒程度の速さで試料に流れている電流を遮断する独自の装置を用いた。

Fig. 2 は、 V - I 特性測定装置のサンプルホルダーの部分である。 V - I 特性より、臨界電流 I_c 、回復電流 I_r 、跳躍電流 I_t 、回復電圧 V_r 、跳躍電圧 V_t が得られる。ただし電圧跳躍がそのまま熱暴走に移行する場合、 I_r 、 V_r をえるために、ヒーター法を用いたので、試料の端部にヒーターを巻いてある。試料の冷却端の影響を無くすために、試料の長さは沸騰熱伝達遷移領域長に比べて充分長くなければならない。われわれは Maddock の理論⁷⁾によって、遷移領域長 ΔX のおよそその値をみつめた。Maddock によれば、

$$\Delta X = \sqrt{\frac{kA\Delta T}{2PG}} \quad \text{で表わされる。}$$

ここに k は、安定化材の縦方向熱伝導度、 A は安定化材の断面積、 P は試料の冷却周囲長、 ΔT は試料の高温領域と低温領域との温度差、 G は膜沸騰状態時の試料の単位表面積当りの発熱を表わす。ここで、 $k=5\text{ W/cm K}$ 、 $A=2\times 10^{-3}\text{ cm}^2$ 、 $P=10^{-1}\text{ cm}$ 、 $\Delta T=10\text{ K}$ 、 $G=10^{-1}\text{ W/cm}^2$ とすると、 $\Delta X=2.2\text{ cm}$ となる。われわれの試料の長さは、アルミニウム安定化試料が 50 cm、銅安定化試料が 70 cm であり遷移領域長に比して充分に長く、また電圧端子は試料の中央に、6.6 cm の間隔で取り付けである。

3. 結 果

まず、われわれの試料の安定性を論ずる上で、基本的な量となる各素線の特性についてのべる。

Fig. 3 は Nb-Ti 素線の I_c - H 曲線である。Fig. 4 は各素線 1 本当りの電気抵抗と外部磁場との関係を示す。a は銅被覆アルミ線、b は銅線、c は銅被覆 Nb-Ti 線の常伝導抵抗を示す。なお銅被覆 Nb-Ti 線の常伝導抵抗は、銅被覆 Nb-Ti 線を 7 本ストランドにした試料の膜沸騰から核沸騰への回復時の常伝導抵抗 (V_r/I_r) より求めた。この 3 種の素線の常伝導抵抗がわかれば計算により、すべての試料の常伝導抵抗を算出することができる。これについてはのちに論ずる。

次にアルミニウム安定化試料の特性を、銅安定化試料のそれと比較してみる。一例として Fig. 5 は、ア

Fig. 3 Critical current vs. field characteristics of the copper clad Nb-Ti wire.

Fig. 4 Normal resistivity of each strand wire :

(a) Copper clad Al wire; (b) Copper wire; (c) Copper clad Nb-Ti wire.

ルミ素線 6 本-Nb-Ti 素線 1 本と、銅素線 6 本-Nb-Ti 素線 1 本の試料の外部磁場 55 kOe 中における V - I 特性を比較したものである。銅安定化試料の回復電流 $I_r=47.6\text{ A}$ 、跳躍電流 $I_t=63.4\text{ A}$ 、に対しアルミ安定化試料は $I_r=76.8\text{ A}$ 、 $I_t=103\text{ A}$ と、 I_r 、 I_t 共に 1.6 倍強の値であり高い安定性を示していることがわかる。また、跳躍回復時の発熱 ($Q_t=V_t \times I_t$ 、 $Q_r=V_r \times I_r$) の値は、両試料について、ほぼ一致している。Fig. 6 はその試料における I_r - H 特性を比較したものである。 I_c は 2 つの試料について相等しいが、 I_r については、アルミと銅の電気抵抗差をはんえいした違いが見

Fig. 5 Typical examples of the voltage vs. current characteristics. The sample is composed of a single Nb-Ti wire and six normal wires. (a) Al-stabilized wire. (b) Custabilized wire.

Fig. 6 Typical examples of the recovery current vs. magnetic field. The samples is composed of a single Nb-Ti wire and six normal wires. (a) Al-stabilized wire. (b) Cu-stabilized wire. The broken line represents the critical current.

られ高磁場になるに従って、その差の割合は大きくなってゆく。これは 20 kOe 以上でのアルミの磁気抵抗が銅に比べて低いためであるといえる。他の Nb-Ti 素線数の試料についても同様な比較ができる。Fig. 7 は外部磁場 55 kOe 中における安定化材本数と I_r との関係を示す。いま I_r が I_c よりも大きい事を、完全安

Fig. 7 The recovery current vs. number of Al or Cu strands. (a) Al-stabilized wire. (b) Custabilized wire. The broken line represents the critical current.

定化の 1 つの目安とすれば (厳密に言えばこれは過剰な安定化 -excessstabilization- というべきであるが) アルミ安定化試料は安定化素線 4 本以上、銅安定化試料は安定化素線 5 本以上 (厳密には 5 本の所は $I_r < I_c$ であるが) のものがそういえるであろう。

銅被覆 Nb-Ti 素線の常伝導抵抗を R_{sc} 、銅素線のノーマル抵抗を R_{cu} とすると、銅被覆 Nb-Ti 素線 n_{sc} 本、銅素線 n_{cu} 本を含む試料の常伝導抵抗は、半田の存在を無視して、

$$R = \left(\frac{n_{sc}}{R_{sc}} + \frac{n_{cu}}{R_{cu}} \right)^{-1}$$

で表わされる。これと各試料の回復時の抵抗 $R' = V_r / I_r$ を比較してみた。結果は 5% 以内で一致していた。これにたいして、アルミニウム安定化試料の場合 R と R' は割合一致しているものもあったが、試料によっては 20% も違っているものもあった。これは高純度アルミニウムが室温で熱処理されるという効果により、試料の常伝導抵抗が変化したためと思われる。

最後にこのような高純度アルミニウム安定化超伝導線を用いて、完全安定化のマグネットを製作する場合の利点を、われわれの作った高純度アルミニウム安定化線と、無酸素銅安定化線を比較することにおいて論じてみる。一例として、銅素線 5 本、Nb-Ti 素線 2 本を用いて製作した銅安定化線は、外部磁場 55 kOe 中において、 $I_c = 45.2$ A, $I_r = 42.4$ A であり、1 m 長当りの重量は 1.74 g である、それに対してアルミ素線 4 本、Nb-Ti 素線 3 本を用いて製作したアルミ安定

化線は、同磁場中において、 $I_c=68.5\text{ A}$ 、 $I_r=69\text{ A}$ 、であり、 1 m 長当りの重量が 1.19 g である。この2種の線材は外部磁場 55 kOe 中においてはどちらもほぼ $I_r=I_c$ であり、同程度の安定性を持っていると考えられ、アルミ安定化線は銅安定化線と比べて、 I_c 及び I_r が約1.5倍、重量が1.46分の1となる。これらの線材は大型用線材ではないが、線材を液体ヘリウムでじかに冷却するためのチャンネルを持つ完全安定化の大型マグネットに理論上適用させれば、同程度の発生磁場を持つマグネットを作る場合、最も粗い計算においてさえも、アルミ安定化線を用いる事により、線材の長さ（体積とも言える）において1.5分の1で済み、その重量においては2.2分の1で済むと考えられる。さらに現実のマグネットの形状を入れて計算した場合その差はさらに大きなものとなると考えられる。またより高磁場を発生するマグネットを製作することを考えた場合、アルミニウムの低い磁気抵抗効果により、その利点はさらに生かされるといえよう。

著者は、本研究を遂行するに際し、いろいろな助言

をしてくださった小笠原武助教授に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) S. Murase, Y. Koike, Y. Nakayama, T. Toyoda and E. Suzuki : Fifth International Cryogenic Engineering Conference (1974) 399
- 2) H. Nomura, I. Tokoriki, K. Terao and M. Tago : Fifth International Cryogenic Engineering Conference (1974) 396
- 3) 井上博正, 斎藤正樹 : 第14回低温工学研究発表会 A3-18 (1977)
- 4) S. T. Wang, R. P. Smith, S. H. Kim and J. J. Peerson : Cryogenic Engineering Conference (1977) 70
- 5) M. Young, E. Gregory, E. Adam and W. Marancik : International Cryogenic Materials Conference (1977)
- 6) 永田正之, 細田義門 : 第19回低温工学研究発表会 A2-4 (1977)
- 7) B. J. Maddock, G. B. James and W. T. Norris : Cryogenics 9 (1969) 261