

## 1 km級超伝導線材に高品質銅を高速複合する新しいメッキ技術の開発に成功

— ニオブ・アルミ線材の安定化用バイパス大電流導体 —

平成19年 6月 8日

独立行政法人物質・材料研究機構

### 概要：

1. 独立行政法人物質・材料研究機構（理事長：岸輝雄）、超伝導材料センター（センター長：熊倉浩明）強磁場線材グループの菊池章弘主任研究員は、株式会社ヒキフネ（代表取締役：石川輝夫）と共同で、実用スケール長（1 km以上）の新製法ニオブ・アルミ超伝導線材<sup>1)</sup>へ高品質の銅を厚く短時間で複合する新しい高速メッキ技術を開発した。
2. ニオブ・アルミ線材は、約2,000℃の高温で連続的に急速加熱する特殊な熱処理（急熱急冷処理<sup>2)</sup>）を実施することから、処理中に銅が溶融するため銅を母材とすることができないが、実際に実用化するには銅の複合が不可欠である。しかし、クラッド圧延<sup>3)</sup>を用いても線材と銅との密着性が乏しく、また薄い銅箔しか扱うことができないため多量の銅を複合するには限界があった。さらに、平角形状の線材にしか銅を貼り合わせることができず、加速器<sup>4)</sup>や核融合炉<sup>5)</sup>等へ幅広く実用化を図るには、1 km級の長尺線材で丸形状のまま高品質銅を効率よく複合しなければならないという大きな課題が残されていた。
3. 今回、1 km級のニオブ・アルミ超伝導線材に、150ミクロン（0.15 mm）の厚みの高品質銅を高速電気メッキ<sup>6)</sup>することに成功し、処理速度は1日あたり120 mと従来のメッキの常識を超えて効率を格段に高めることができた。これほどまでに高速化したメッキでも、表面にざらつきや凹凸はなく、線径の寸法精度を±3ミクロン（0.003ミリ）に保つことができ、メッキ内部にもボイド等の欠陥がない。また、従来のクラッド圧延で複合していたものと比較して極低温において4～5倍も電気抵抗が小さく、超伝導安定化導体として1,000A級の運転

電流に十分耐え得ることができる。

4. 今回開発した高速電気メッキ技術は、ニオブ・アルミ超伝導線材の実用化を一層加速させるとともに、超伝導線材以外の分野にも大きな波及効果がある。例えば、機械的な複合加工が困難な、高強度ピアノ線や光ファイバーなどにも高品質の銅を多量に効率よく複合することができ、電気自動車や航空機部品等の幅広い応用が開けるとの期待が高まっている。

5. 今回作製した1 km級の銅安定化<sup>7)</sup>ニオブ・アルミ超伝導線材は、米国・フェルミ国立加速器研究所<sup>8)</sup>と共同で、次世代加速器のための新しいラザフォードケーブル<sup>9)</sup>が試作される予定となっている。なお、当機構とフェルミ研究所は、2年前から次世代加速器用超伝導線材の開発に関する国際共同研究を推進している。これらの結果は、8月27日から米国フィラデルフィアで開催される第20回マグネット技術会議で発表される。なお、本研究の一部は文部科学省科学技術振興費委託研究（新方式NMR分析技術の開発）の一環として行われた。

## 【研究の背景】

### 1. ニオブ・アルミ超伝導線材の実用化の壁

10年前に当機構で開発したニオブ・アルミ線材は、現在のニオブ・スズ線材<sup>10)</sup>に代わる次世代の強磁場超伝導線材として期待が寄せられている。最近では、絶対温度4.2Kにおける超伝導コイル発生磁場としては世界最高の19.5テスラの磁場を発生させることに成功している。このニオブ・アルミ線材は、約2,000°Cの高温で連続的に急速加熱する特殊な熱処理（急熱急冷処理）を実施することから、処理中に銅が溶融するため銅を母材とすることができない。実際に実用化するには銅の複合が不可欠であり、これまでは、急熱急冷処理を行った後に銅箔を貼り合わせながら線材を平角成型するクラッド圧延を行っている。昨年に19.5テスラの磁場を発生させたニオブ・アルミ線材も平角成型することで銅を複合している。しかし、一般的に硬さが大幅に異なる材料の複合加工は困難で、線材と銅との密着性がまだまだ乏しい問題があった。図1は線材断面の一例であるが、安定化銅とニオブ・アルミ線材の間には多数の亀裂が確認される。これらの亀裂は超伝導線材の不安定化の要因となる。また薄い銅箔しか扱うことができないため、より高い安定度を得るために多量の銅を複合するには限界があった。さらに、平角形状の線材にしか銅を貼り合わせることができず、ニオブ・アルミ線材の用途が限られたものになっていた。加速器や核融合炉等へ幅広く実用化を図るには、1km級の長尺線材で丸形状のまま銅を効率よく複合しなければならないという大きな課題が残されていた。

### 2. 従来の電気メッキ

一方、各種金属の電気メッキといえば古くは江戸時代からある伝統的技術で、東京では下町に数多くの町工場が存在する。伝統的技術でありながら、それを継承する若い世代の技術者が年々少なくなっている問題も浮上している。最近では、携帯電話やデジタルカメラのための細かな部品の表面処理を電気メッキで行っている。それらの電子部品、装飾品や工芸品への表面処理がメッキの主力製品で、厚みは1ミクロン以下（0.001mm）と非常に薄いものである。金型などをメッキで製造する「電鍍<sup>11)</sup>」という技術があるが、厚メッキには数ヶ月の時間を要するため、数kmに及ぶ超

伝導線材への厚メッキの実用化は難しいという懸念があった。実際に 2 年前にニオブ・アルミ線材のためのメッキ開発に着手した時点では、1 時間あたり 1 m という低いメッキ効率で生産性が低かった。また、従来の表面処理とは異なって、メッキでつけた銅が高品質で低い電気抵抗の大電流導体として使用できるという確信もなかった。

### 【成果の内容】

銅メッキの厚みは 100～150 ミクロンと従来の常識を超えるため長時間の処理を要する。メッキ処理速度はメッキ浴からの銅の析出効率と等価であり、析出効率を上げるためには、メッキ時の電流密度の増加が有効である。しかし、極端に電流密度を増加させたメッキでは不均一な析出となり、線材表面に付着する銅は凹凸が激しくボイドの多いものとなって超伝導線材の安定化導体として使用できない。図 2 は異なる電流密度でメッキした線材の断面写真である。20 A/dm<sup>2</sup>では均一な銅が付与できているのに対し、30 A/dm<sup>2</sup>及び 40 A/dm<sup>2</sup>の電流密度になると、メッキ表面が著しく荒れて凹凸が激しくなっている。従って均質な銅を線材周囲に付着させるには、極端に電流密度を高めることができず 20 A/dm<sup>2</sup>の電流密度が限界であった。処理速度に換算すると毎時 2 m となり、長さ 1 km の線材に安定化銅を付与する場合、約 21 日もの期間を必要とする。今回、メッキ浴の硫酸銅及び硫酸濃度、メッキ浴の温度、アノード電極の材質及び純度、アノード電極と処理線材との距離、メッキ浴内の電解分布等の各種パラメータを最適化した。その結果、図 3 に示すように、約 33 A/dm<sup>2</sup>の電流密度まで電流密度を高めても均質な高品質銅を付与することに成功した。図 4 にこれまでのメッキ処理速度の推移をまとめた。今回のメッキ処理速度は、毎時約 5 m と開発に着手した時点と比較して 5 倍まで高速化され、実用処理としての目処がたった。今後さらに改良を加えれば、今回の倍（毎時 10 m）まで高速化できる見通しを得ている。ニオブ・アルミ線材と安定化銅の密着力は極めて高い。優れた接続強度を得るために、厚メッキの前に 1 ミクロン（0.001 mm）の薄い銅下地を被覆するイオンプレーティング処理<sup>12)</sup>を行う工夫が施されている。イオンプレーテ

イングに要する時間は1時間あたり120mと非常に速く、1km以上の長尺線材も短時間で容易に完了する。図5は外径1.0mmの丸線材の密着曲げ試験を行った結果である。180度まで極端に曲げても、ニオブ・アルミ線材とメッキ銅の間で剥離はない。さらに、図6は外径1.0mmの丸線材を様々な厚さにロール圧延した結果である。この様な大きな加工を行っても、ニオブ・アルミ線材とメッキ銅の間で剥離は一切認められず、ニオブ・アルミ超伝導線材に大きな安定度を確保することができる。

### 【波及効果と今後の展開】

開発に成功した高速電気メッキ技術は、機械的ひずみに強いことで期待されているニオブ・アルミ超伝導線材を本格的に実用化のステージへ引き上げる大きな成果と言える。強磁場超伝導磁石を必要とする加速器や核融合炉への実用化を一層加速させることが期待される。また、超伝導線材以外の分野にも大きな波及効果があり、例えば、機械的な複合加工が困難な高強度ピアノ線や光ファイバーなどにも高品質の銅を多量に効率よく複合することができ、電気自動車や航空機部品等の幅広い応用が開けるとの期待が高まっている。

今回作製した1km級の銅安定化ニオブ・アルミ超伝導線材は、米国・フェルミ国立加速器研究所と共同で、今夏、次世代加速器のための新しいラザフォードケーブルが試作される予定となっている。当機構とフェルミ研究所は、2年前から次世代加速器用超伝導線材の開発に関する国際共同研究を推進している。これらの結果は、8月27日から米国フィラデルフィアで開催される第20回マグネット技術会議で発表される。

なお、本研究の一部は文部科学省科学技術振興費委託研究（新方式NMR分析技術の開発）の一環として行われた。

### 【各方面からの反響のコメント】

1. 「The recent development of electroplating Nb<sub>3</sub>Al strands with copper, which was accomplished at the National Institute of Materials Science under Dr. Akihiro Kikuchi is a very impressive achievement. The copper stabilization of the Nb<sub>3</sub>Al has been a serious bottle neck for its industrial application for a long time. Judging from the test results of 180 degree bent and rolling down, the bonding of the copper to Nb<sub>3</sub>Al precursor is as strong as the regular bonding of the copper to Nb<sub>3</sub>Sn strands. It seems now the copper stabilized Nb<sub>3</sub>Al strand can be applied to the High Field Accelerator Magnets as good as the Nb<sub>3</sub>Sn strand. Because the Nb<sub>3</sub>Al strands have higher strain tolerance over the Nb<sub>3</sub>Sn strand, and does not have the problem of tin leakage, we could expect the Nb<sub>3</sub>Al Rutherford cables will be applied to much higher field magnets over 15 Tesla.」

Fermi National Accelerator Laboratory, Group Leader, Dr. Alexander Zlobin

2. 「我々は、ニオブ・アルミ超伝導線材を用いた加速器用高磁場磁石の開発計画を推進しているが、その安定化材付着技術には多少の不安を感じていた。今回の開発成果はその不安を解消してくれるものであり、今後の磁石開発を強力にサポートしてくれるものである。」

高エネルギー加速器研究機構 超伝導低温工学センター 土屋 清澄 教授

3. 「ニオブ・アルミ超伝導線材は、その高臨界磁場、優れた耐歪特性から、次期核融合炉用超伝導線材の最有力候補と考えていた。一方、長尺線材の工業的安定化技術の開発が重要課題として残っていたが、今回の開発成果により、ニオブ・アルミ超伝導線材の核融合炉用導体への応用に目処がたった。」

日本原子力研究開発機構 ITER超伝導磁石開発グループ 小泉 徳潔 博士

**問い合わせ先：**

〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1

独立行政法人 物質・材料研究機構

広報室

TEL 029-859-2026 FAX 029-859-2017

**研究内容に関すること：**

独立行政法人 物質・材料研究機構

超伝導材料センター 強磁場線材グループ

主任研究員 菊池 章弘

E-mail : KIKUCHI.Akihiro@nims.go.jp (海外出張のため電子メールで対応)

**文部科学省科学技術振興費委託研究（新方式NMR分析技術の開発）に関すること：**

独立行政法人物質・材料研究機構

超伝導材料センター 高温線材グループ

グループリーダー 北口 仁

TEL : 029-859-2323

E-mail : KITAGUCHI.Hitoshi@nims.go.jp

## 用語説明

### 1) ニオブ・アルミ超伝導線材：

$Nb_3Al$ 化合物。ニオブ (Nb) とアルミニウム (Al) が原子比で 3 : 1 の A15 型結晶。超伝導状態になる臨界温度が絶対温度で約 18 度。ただし、超伝導特性に優れた化学量論組成比 (Nb:Al=3:1) の結晶は 2, 000°C 近傍の高温熱処理が必要とされる。現在、10 テスラ以上の超伝導磁石に使用されているニオブ・スズ化合物よりも機械的ひずみに強いことから、巨大な電磁力が加わる強磁場マグネットへの応用が期待されている。

### 2) 急熱急冷処理：

化学量論組成比 (Nb:Al=3:1) に近い  $Nb_3Al$  化合物を長尺線材において合成するために、金属材料技術研究所 (現 物質・材料研究機構) で考案された製法。移動する線材に直接通電し、抵抗加熱により 2, 000°C まで瞬間的な熱処理を行って、その後引き続いて室温程度の金属ガリウムで急冷する。

### 3) クラッド圧延：

2 種類以上の金属を重ねて圧延し、貼り合わせにより機械的に接続する加工。

### 4) 加速器：

高エネルギーの荷電粒子を加速する装置。高周波の電場を利用した線型加速器や、強い磁場を利用したリング状の加速器がある。素粒子の研究に用いられる。

### 5) 核融合炉：

核融合 (軽い核種同士が融合してより重い核種になる反応) の際に放出される膨大なプラズマエネルギーを利用した将来の発電炉。超高温プラズマは超伝導磁石による強い磁場で閉じこめられる。最近、ITER (国際熱核融合実験炉) がフランスに建設されることが決まった。



6) 電気メッキ :

メッキされる対象物を陰極 (カソード) とし、メッキする金属を陽極 (アノード) として電解液中で直流通電すると、陽極が電気分解され金属イオンとなり電解液中を通じて対象物に金属を付着させる。

7) 安定化材 :

熱的あるいは電磁氣的擾乱に対して超伝導状態を安定して保つため、実用超伝導線材には極低温で電気伝導度の高い材料 (銅、アルミニウム等) が複合されている。擾乱により局所的に超伝導状態が破壊した場合でも、瞬間的に安定化材へ大電流がバイパスされることで、破壊された超伝導状態を瞬時に回復することができる。安定化材として、無酸素銅が一般的に用いられており、高純度かつ高品質でなければならない。

8) フェルミ国立加速器研究所 :

米国イリノイ州シカゴ近郊にある国立高エネルギー物理学研究所。世界初の超伝導磁石を用いた大型の陽子・反陽子衝突型加速器テバトロン (直径約 2km、最大磁場 4.5 テスラ) を保有し、トップクォークの検出に成功した。

9) ラザフォードケーブル :

数十から数百本の超伝導線材を袋状に編み込んで、平たくテープ状に圧縮成型された大電流導体。

10) ニオブ・スズ超伝導線材 :

$Nb_3Sn$ 化合物。ニオブ (Nb) とスズ (Sn) が原子比で 3 : 1 の A15 型結晶。超伝導状態になる臨界温度が絶対温度で約 18 度。既に実用化され、10 テスラ以上の超伝導磁石に広く応用されている。主にブロンズ合金 (Cu-Sn 合金) とニオブとの反応で合成される。ITER (国際熱核融合実験炉) でも超伝導磁石の導体として使用さ

れる予定。

1 1) 電鋳：

電気分解により電解液の中に溶けた金属イオンを原型に電着させ、原型と同じ型を精密に複製する方法。プラスチック用金型、ゴム金型、RIM 成形用金型などの製造に利用されている。

1 2) イオンプレーティング処理：

イオン化された金属蒸気あるいは励起粒子を、対象物に数十～数百ボルトの電圧で引き付け加速衝突させながら膜を被覆する物理蒸着法。

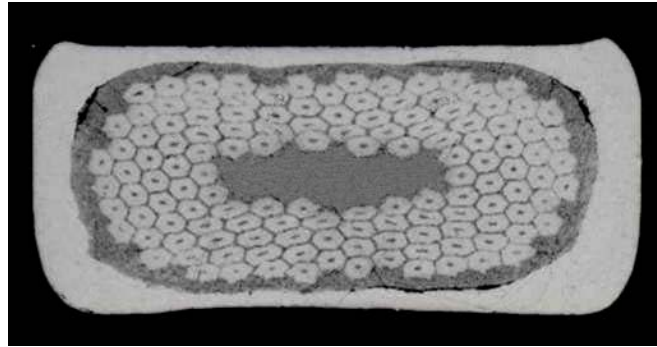


図1. 従来のクラッド圧延により作製した平角形状のニオブ・アルミ線材の断面写真。外側の薄い灰色部が安定化材となる銅。昨年、絶対温度4.2度で19.5テスラの世界最高磁場を発生させた線材。線材と銅との密着性がまだまだ乏しい問題があり、多数の亀裂が確認される。薄い銅箔しか扱うことができないため、より高い安定度を得るために多量の銅を複合することができない。複合できる銅の分量は線材全体の20%程度が限界。

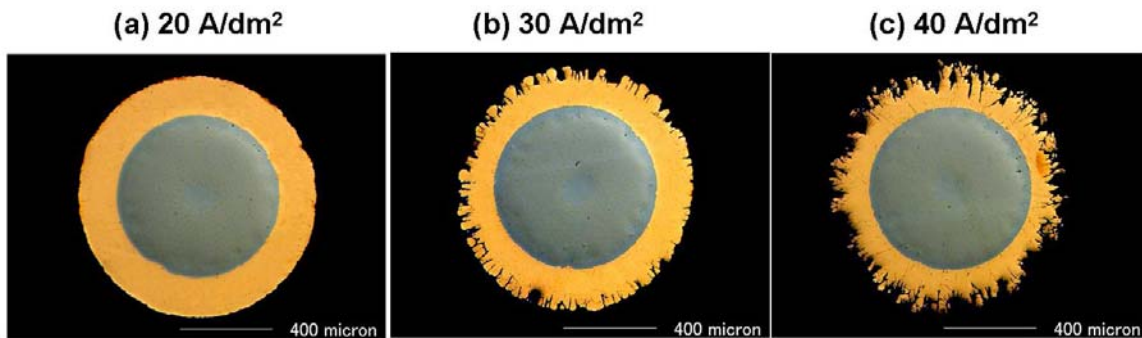


図2. 従来の電気メッキにより銅を複合したニオブ・アルミ線材の断面写真。外側のオレンジ色が銅。効率を上げるためにメッキ時の電流密度を高めると、表面の凹凸が著しくなり超伝導安定化材として使用できない。従来のメッキは非常に効率が低く、1 kmを超える長尺線材に応用するには生産的でなかった。

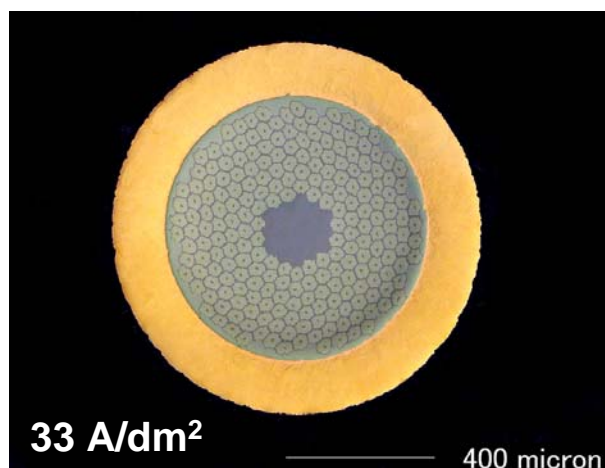


図3. 今回開発した高速メッキ技術により銅を複合したニオブ・アルミ超伝導線材の断面写真。外側のオレンジ色が銅で厚さは150ミクロン(0.15mm)。従来では不可能であった高い電流密度でメッキが可能。線径の寸法精度を±3ミクロン(0.003mm)に保つことができ、メッキ内部にはボイド等の欠陥がない。1 kmを超える長尺線材を連続的にメッキすることができる。複合する銅の分量に制限はない。写真の線材の銅の分量は全体の50%。

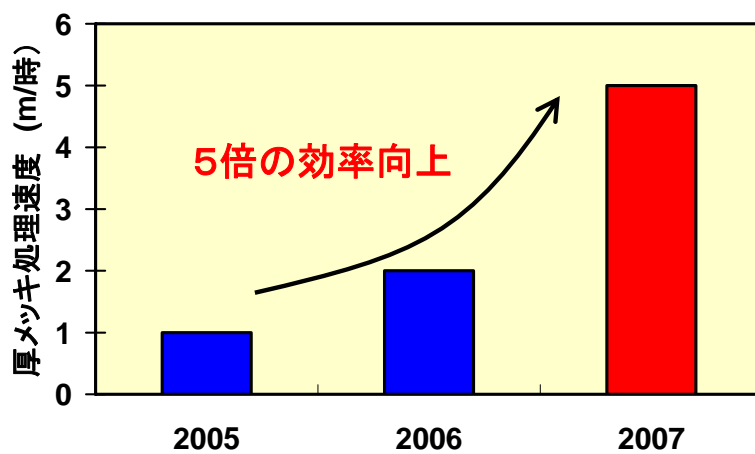


図4. 長尺線材への厚メッキ処理速度の推移。2年前の開発当初と比較すると、5倍まで高速化に成功。1日あたりの処理長さは120mであり、実用的な作業効率となる。

**(a) 外観写真**



**(b) 断面写真**

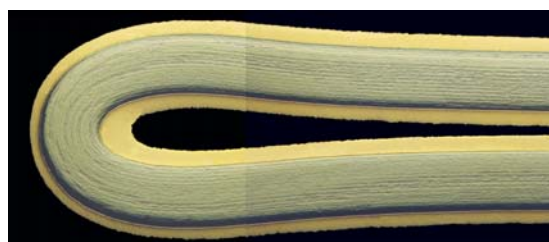


図5. 高速メッキ線材の密着曲げ試験の結果。線材の外径は1.0mm。180度まで極端な曲げを行ってもメッキ銅の剥離はなく、強固に密着している。用途に合わせて自在に曲げることができる。

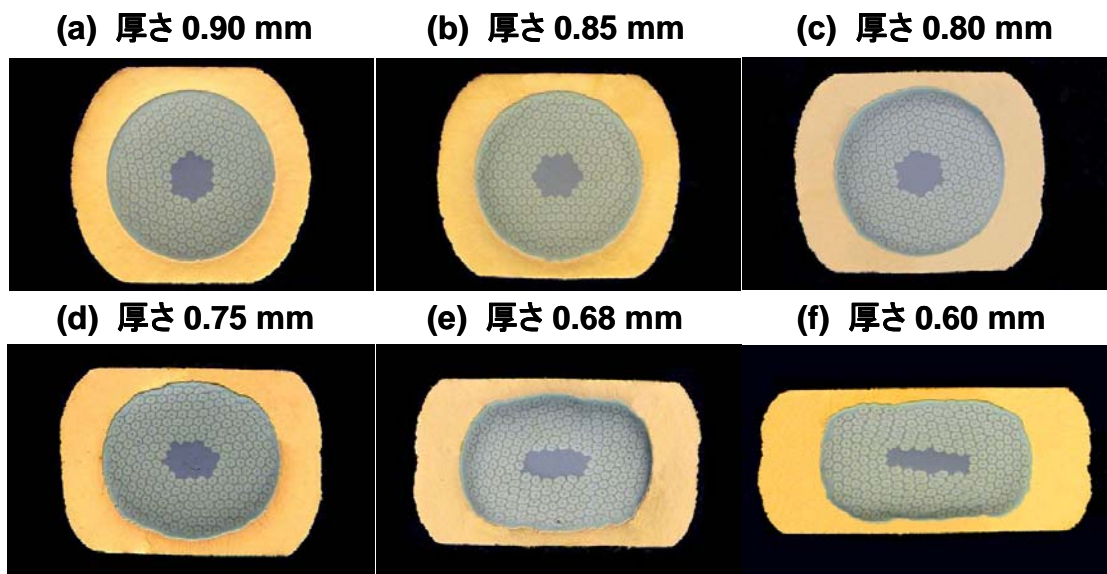


図6. 外径が1.0mmのメッキ線材を圧延加工試験した結果。大きな機械加工を行っても、メッキ銅は強固に密着している。高品質の銅が剥離することなく、様々な断面形状に変形させることができる。