

## APPLIED TECHNIQUES OF PERIODIC REVERSE COPPER ELECTROFORMING FOR COMPONENTS OF THE JAPAN HADRON FACILITY

K. Tajiri<sup>\*</sup>), Z. Kabeya, T. Kawasumi, Y. Yamanaka<sup>A)</sup>, F. Naito<sup>B)</sup>, T. Kato<sup>B)</sup> and E. Takasaki<sup>B)</sup>

Mitsubishi Heavy Industries Ltd., Nagoya Aerospace Systems  
10, Oye-cho, Minato-ku, Nagoya 455-8515 Japan

<sup>A)</sup>Asahi Kinzoku Kogyo Co. Ltd.

4851-4, Maki, Anpachi-cho, Anpachi-gun, 503-01 Japan

<sup>B)</sup>KEK-High Energy Accelerator Research Organization  
1-1, Oho, Tsukuba, 305-0801 Japan

### Abstract

We developed the technology for applying periodic copper electroforming to DTL (drift tube linac) of the Japan Hadron Facility. Highly pure copper is deposited on components of DTL by the copper electroforming. Key techniques which improve productivity or quality of electroformed copper are introduced.

### 大型ハドロン計画におけるPR銅電鍍法適用技術

#### 1. 緒言

文部省高エネルギー加速器研究機構(KEK)が建設中の大型ハドロン計画用DTL(ドリフトチューブリニアック)の部品である空洞、ドリフトチューブ並びにこれに内蔵される電磁石用中空コイルの製作には、高純度の銅電析物が得られる新しい銅電鍍法が用いられている。

この銅電鍍法は光沢剤等の有機性添加剤を浴中に一切含まない酸性硫酸銅浴を用い、極性を周期的に反転しながら(Periodic Reverse: PR)通電する方法である。(以後PR銅電鍍法と呼ぶ)

中空コイルにおいては中空を構成する銅壁の形成に、また空洞およびドリフトチューブにおいてはライニングの形成にこの銅電鍍法が用いられている。本稿では、PR電鍍法の特徴、並びにこの特徴を踏まえて開発・実用化した銅電鍍法適用技術について紹介する。

#### 2. PR銅電鍍法の誕生

光沢剤等の有機性添加剤を含まない酸性硫酸銅浴(無添加浴)から無酸素銅並みに高純度な銅電析物が得られることは以前から知られていた。<sup>1)</sup>しかし、本浴から直流電解によって得られる電析物は、厚さが増すとともに表面の凹凸が激しくなってポイド等の欠陥を含む様になる。<sup>2)</sup>このため、滑らかな表面が得られる光沢剤が開発されて以来、無添加浴は電鍍にはおろか、薄いめっきにさえも用いられなくなった。

<sup>\*</sup>keisuke\_tajiri@mx.nasw.mhi.co.jp

そうしたなかで、極性を周期的に反転しながら通電することによって無添加浴から厚い電析物が得られることを示したのはG.A. Maloneである。<sup>2)</sup>しかしながら、Maloneの方法は汎用の高濃度タイプの浴(硫酸銅濃度が202~225g/lの浴)を用いていたため適正電流密度範囲が狭かった。そのため、この方法は処理時の電流密度分布が広がる複雑形状部品に適用することができず、銅電鍍法の主流となることができなかった。

我々は付き廻り性能が優れている低濃度タイプの浴<sup>3)</sup>を基本とし、周期的極性反転通電下において電析物の微細構造や物性に大きく影響する塩素イオン濃度を最適化した浴を用いるPR銅電鍍法を開発した<sup>4)</sup>。本法は初めロケットエンジン燃焼室に、そして今回DTL部品に適用された。本銅電鍍法における浴組成と処理条件を表1に示す。

表1 PR銅電鍍法における浴組成と処理条件

Sulfuric acid	135 ~ 145g/l
Copper sulfate	138 ~ 148g/l
Chloride ions	15ppm or so
Bath temperature	24 ~ 28°C
Cathodic-anodic time ratio	5
Current density	1 ~ 5.5A/dm <sup>2</sup>

### 3. DTL部品における銅電鍍

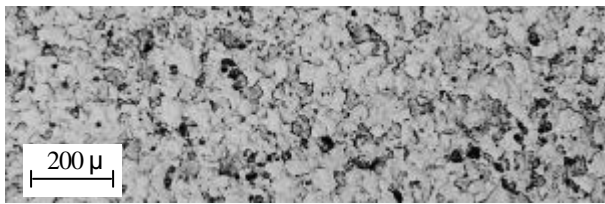
中空コイルはロストワックス法にて製作される。<sup>5)</sup>本法においては、図1の様に溝加工が施された銅母材の溝内部に充てんしたワックス表面に銀粉を擦り込み、銅母材の露出部に密着し、溝に架橋した銅電鍍層を形成させるものである。



図1 溝内部に充てんされたワックス上に銀粉を擦り込んだコイルの母材

空洞およびドリフトチューブにおいては、炭素鋼あるいはステンレス鋼製の母材に0.5~0.8mmの銅電鍍ライニングを施す。このライニングは形成された銅電鍍層の表面を3Sの粗さに機械加工仕上げした後、電解研磨処理を施こして製作される。こうして得られるライニングの表面は清浄で、かつ光沢めっきに劣らない平滑さを有する。

厚さ約0.4mmの銅電鍍供試体の垂直断面並びに水平断面(電鍍表面付近)についてのエッチング後の観察像を図2に示す。垂直断面観察像から結晶粒が極めて微細であることが分かるが、水平断面では1つ1つの結晶粒ではなく、電鍍表面の凹凸に対応した云わば「結晶粒群」の境界が観察される。



(a) 水平断面



(b) 垂直断面

図2 銅電鍍供試体断面のエッチング後の顕微鏡観察像

この様に、機械加工前に存在していた電鍍表面の凹凸がエッチングによってミクロな凹凸として顕在化するという事は、同様なエッチング効果のある電解研磨処理によって良好な電解研磨面を得るためには、凹凸の少ない良質の電鍍層形成が必須であることを示している。

### 4. 銅電鍍適用技術

#### 4.1 重層電鍍

PR銅電鍍は中間の手入れ加工なしで、一度に3mm以上の厚みの電鍍層を形成し得る。しかし、我々は1mm以下の電鍍厚みしか要求されていないDTL部品に対して重層電鍍を実施している。これは電鍍を複数の層で形成させることにより、欠陥のない電鍍層や凹凸の小さい電鍍表面を得ることを狙ったものである。

##### (1) 中空コイル

中空コイルでは、3項で述べた様にワックス上に保持された銀粉が下地の一部となるが、この銀粉は電鍍開始前の水洗・活性化工程、並びに電鍍開始時の揺動で脱落する可能性がある。銀粉が脱落した箇所には正常な電鍍層が形成されず、放置すると銅電鍍層を貫通するピンホールを生じる可能性がある。

図3に銀粉脱落を模擬した供試体における電鍍成長とピンホール発生の様子を示す。銀粉脱落部は周りから成長してくる電析物により次第に小さくなるが、成長してきた電析物どうしがぶつかり合うため、いつまでもたっても穴が閉じず貫通ピンホールを発生してしまう。そこで一旦電鍍を止めて中間加工を施すと、加工した面からは真直に電析物が成長するので、二層目電鍍層においては電鍍開始後速やかに穴が閉じると考えられる。

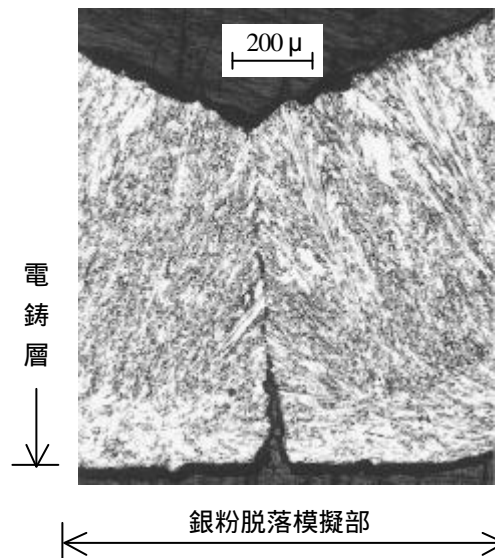


図3 銀粉脱落模擬部における電析物の成長とピンホール発生の様子

## (2) 空洞

炭素鋼の鍛造材でできたこの大型空洞本体は、その表面にひげ巣、腐食痕および加工傷等の欠陥を有することが避けられない。一層目の電鍍層にこれ等の素材欠陥に起因するピンホールを生じた場合、二層目の電鍍層ではこれを遮断し、無欠陥の電鍍表面を形成させる様にした。

また、3項で述べた様に、形成された電鍍層は機械加工仕上後に電解研磨処理されるため、加工前の電鍍表面は凹凸の小さいことが要求される。形成される電鍍層の厚さが薄いほどこの凹凸は小さいので、電鍍層を二層にし、上層を薄くするとこの目的が達成され、光沢めっきを凌ぐ平滑な面が形成される。

## 4.2 染み出し検査法による欠陥検出

重層電鍍によって欠陥発生を防止する場合、機械加工した下層の電鍍層表面に存在する欠陥を検出し、その部分をリユーター等でブレードすることにより、以後の電鍍における欠陥発生防止をより確実なものとする事ができる。しかしながら、汎用のザイグロ検査は、欠陥部へのザイグロ液残留により上層の電鍍層中にピンホールを発生させる恐れがあるため、電鍍工程への適用は好ましくない。そこで実施したのが「染み出し検査法」である。本法は機械加工した部品をエッチング液に浸せき後水洗して放置すると、ピンホール等の表面欠陥中に残留したエッチング液の染み出しにより、欠陥部を起点にした銅の変色が認められる現象を利用したものである。変色は欠陥部のみではなく付着したパーティクル等を起点としても生じるが、両者を特に区別せずに全点ブレードすることにより、見落としなく欠陥箇所を処置できる。

## 4.3 電鍍液中での再活性化

空洞本体内面の電鍍に於いては空洞と電極との位置関係に厳密さが要求される。従って電極は予め空洞に取付けられたうえで電鍍槽中に浸漬される。しかし、電極を取付けたままで電鍍前の活性化処理を行なうと活性化処理液や水洗水を電鍍液中に持ちこんでしまうことになる。これを避けるためには空洞単独で活性化処理した後に電極等を取付けざるを得ないが、これにはある程度の時間を要し、その間に被処理面の活性度が失われる。

そこで考えたのが電鍍槽中で被処理面を再活性化する方法である。すなわち、電極等を取付けた空洞を約10分間電鍍液中に浸漬し、更に数秒間反転通電した後に電鍍を開始する。

本法は、使用している電鍍浴が添加剤の異常吸着による密着不良を心配しないで良い無添加浴であること、並びに硫酸濃度が高くエッチング能力が優れていることにより、初めて採り得る方法である。

この再活性化法にて銅母材上に形成させた銅電鍍供試体の密着性を試験したところ、銅母材の強度を越える密着力を示した。

## 4.4 セル電鍍

エアポケットや液だまりのために漬浸法では無欠陥の電鍍層を形成させることが困難なポート部には「セル電鍍」を適用した。本法はポート部に電極を有するセルを取付け、電鍍槽から液をポンプアップしてセル内部に供給した状態で電鍍するものである。

このセル電鍍によって形成させた電鍍層表面は非常に滑らかであると同時に、光沢浴で通常発生する角部における電鍍の異常成長や液流れにそった電鍍面のうねりも認められなかった。これは吸着して作用する有機性添加剤を浴中に含まないP R銅電鍍法の特徴であり、本電鍍法がセル電鍍に大変適していることを示している。

## 4.5 部品設計上の工夫

効率的に電鍍層を形成させたり、欠陥のない電鍍層を得るうえで、母材の形状は極めて重要である。

そこで、D T L部品においては可能な限り電鍍に適した形状に設計を行なった。このうち最も顕著な効果があったのは、試作段階で図1の形状であったコイル母材に対して量産段階で設計変更を行い、その端部を丸くしたことである。これにより、端部への電解電流集中を防いで均一な電鍍層を形成させることができ、その後の機械加工作業を大幅に軽減できた。

## 5. 結言

P R銅電鍍法の特徴、並びにK E Kの大型ハドロン計画用D T L部品に対する本法の適用技術を紹介した。P R銅電鍍法で得られる銅電析物は高純度であるとともに電解研磨に適し、かつ機械的性質も優れている<sup>4)</sup>。これに加えて、本法は適正電流密度範囲が広く複雑形状部品に対応できるため<sup>4)</sup>、今後の加速器部品への適用拡大が期待される。

## 参考文献

- [1] W.H.Safranek, The Properties of Electrodeposited Metals and Alloys, 2nd ed., P.99, American Electroplaters and Surface Finishers Society, Orlando, FL (1986).
- [2] G.A.Malone, NASA CR-134959, P.10, NASA Lewis Research Center (1975).
- [3] A.C.Hamilton Jr., Plat. and Surf. Fin., **84**, 47 (Aug. 1997).
- [4] K.Tajiri and T.Imamura, "Controllable Copper Electro-forming for Mechanical Properties form Acid Copper Sulfate Bath", Abstracts of the 195th Meeting of the Electrochemical Society, No.102 (1999).
- [5] K.Tajiri, Y.Yamanaka, F.Naito, T.Kato and E.Takasaki, "Coil, New Application of Electroforming", AESF/SFSJ Advanced Surface Technology Forum Proceedings, P.145 (1998).