

ADVANCED COPPER LINING FOR ACCELERATOR COMPONENTS

H. INO*, K. TAJIRI*, Z. KABEYA*, T. NAKAMURA**, Y. YAMANAKA**,
K. YOSHINO***, F. NAITO***, T. KATO***, E. TAKASAKI***, and Y. YAMAZAKI***

*Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Nagoya Aerospace Systems
10, Oye-cyo, Minato-ku, Nagoya 455-8515 Japan
**Asahi Kinzoku Kogyo Co. Ltd.
4851-4, Maki, Anpachi-cyo, Anpachi-gun, 503-0125 Japan
***KEK-High Energy Accelerator Research Organization
1-1, Oho, Tsukuba, 305-0801 Japan

Abstract

We developed a pure copper lining process for RF cavities using a new copper electroforming, an periodic reverse copper electroforming (PR process) with a low Cu-content acid copper sulfate bath which contains no organic additives. The PR process offers pure copper that contains impurities less than 35 ppm or so, and that has equivalent IACS (International Annealed Copper Standard) value to that of oxygen-free copper. The lining process can be applied to complex accelerator components such as hollow coils for quadrupole magnet. We produced the trial model of DTL (drift tube linac) by using this new electroformed copper lining process and achieved high vacuum and excellent Q value.

革新的銅電鍍法の開発と加速器コンポーネントへの応用

1. 緒言

高い導電率、低いガス放出率、高い放電開始電圧等の物性が要求される加速空洞材料として、常温では通常高純度の無酸素銅を使用する。そこで電子リニアックでは純度が4ナイン以上の無酸素銅材から空洞を切削により製作する。一方、陽子リニアックでは加速周波数が低いいため、空洞サイズが銅の無垢材では構造上の強度不足をまねく程度に大きくなる。従って、空洞の構造強度を他材に持たせ、内面を銅ライニングした加速空洞が用いられる事が多い。

加速器に良く使われる銅のライニング方法の一つとしては電鍍法があり、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(JHF)用リニアックに向けて開発した本電鍍法は、無酸素銅と同等の高純度な銅ライニングが可能な革新的銅電鍍法である。

2. 革新的銅電鍍法

2.1 銅電鍍の概要

電鍍とは、溶液中からの金属イオンの析出(電析)により、下地上に厚い金属の層を形成させる製法で、複雑な構造体を製造できる有用な技術である。メッキ技術の応用とも云えるが、メッキが数十ミクロンの厚みで、素材の表面を保護したり機能を付与したりするのに対し、電鍍は厚みがミリメートルのオーダーである点、及び単なる被覆ではなく、それ自体で独立した構造体になりうる点でメッキとは大きく異なる。加速器コンポーネントに適用される電鍍は、銅電鍍である。

2.2 従来の銅電鍍法

直流電流による通常の銅電析物は成長とともに急速に結晶が粗大化して表面が粗くなり、気泡を巻き込んで多孔性になるなど緻密でなくなる。従来は、析出する金属結晶を微細化させる効果のある有機物(光沢剤)を電鍍液中に添加して電析物表面を平滑化させ、数ミリオオーダーの電鍍層を形成させていた。しかし、この光沢剤の影響で電析物は、高温下でアウトガスとなる不純物(酸素、水素、炭素等)を含み、一般に硬くてもろくなり、また強度や伸びを一定値に制御するのが困難となる。従って、光沢剤法によって得られる銅電鍍は、厳密な強度要求のある部品や加工工程、また使用時に高温下に曝される部品には適用できない。

この光沢剤添加式銅電鍍法は高速電鍍に向く事から、我々は電子リニアックの加速管組立用として、空洞外面に施工している。しかし、KEK/陽子シンクロトロン入射器のDTLタンク及びドリフトチューブのような、運転負荷や電場が高くなる加速器の内表面へ適用するには、より高性能な銅電鍍のニーズがあった。

2.3 革新的銅電鍍法

従来のピロリン酸銅浴や光沢硫酸銅浴のように、添加剤を使用して平滑で緻密な電鍍面を得ていた方法に対し、我々は、電鍍時に印加する電圧(電流)の極性を周期的に反転(例えば正電圧印加20秒、負電圧印加4秒の交番電界)することによって、光沢剤を含まない酸性硫酸銅低濃度浴(硫酸銅 138~148 g/l、硫酸 135~145 g/l)か

ら、厚い緻密な銅電鍍層を得ることに成功した。正電圧印加時に電析した銅の一部は、反転時に陽イオンとなって浴中へ溶解するが、この電析—溶解の繰り返しによって結晶の粗大化が防止され、微細な針状結晶又は柱状結晶の銅電鍍層が形成される。交番電界を用いることから本法はPR (Periodic Reverse) 法と呼ばれる。PR法によって得られる銅電鍍は、添加物が無いため無酸素銅並みに高純度であり、電子ビーム溶接やろう付けの施工も可能である。この銅電鍍は構造材として求められる優れた機械的性質(引張強さ 19.1~30.9 kg/mm²、伸び 37.2~61.5%)を有しており、電鍍液中の塩素イオン濃度を調整して電析物の結晶構造を制御することにより、所望の強度と伸びを得ることができる¹⁾。

我々は、もう一つの優れた性質である、無酸素銅並みの高純度という点に着目し、種々の基礎試験を実施した結果、本電析物は不純物ガス放出が少ない事、高い導電率を持つ事、放電開始電圧が高い事などが判明し、加速器の主要構成部品に適用する方針が定まった。

3. 銅電鍍層のキャラクタリゼーション

3.1 導電率

銅電鍍方式として一般的な2方式(ピロリン酸銅浴、光沢硫酸銅浴)と本PR銅電鍍とで、試験片を作製し、導電率を比較測定した。導電率の測定には、IACS Standard 認定を受けた「基準軟銅」で校正した導電率計を使用した。これはプローブ先端のコイルに交流(100kHz)を流し、試験片側の渦電流で誘起される電圧を測定する方式である。無酸素銅材の導電率を示す際に良く用いられる IACS (International Annealed Copper Standard) 値は、軟銅 ($\rho=1.72 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}$) の導電率を100%IACS として表わしたもので、加速器コンポーネントに使用される各材料メーカーの無酸素銅 class 1 は、通常、102のカタログ値を載せている。

表1に測定結果を示す。不純物含有量が少ないPR銅電鍍による試験片は101.9の高い値を示し、無酸素銅と同等なIACS 値を有することが示された。次に高い値を示したのがピロリン酸銅浴、次いで光沢硫酸銅浴の順であるが、電鍍法によりかなりの差があることが分かった。

表1 電鍍銅の導電率測定結果

材料	製造元	IACS値
IACS基準軟銅	—	100.7
無酸素銅(FOFC)	古河電工	102.0
PR銅電鍍	旭金属工業	101.9
光沢硫酸銅電鍍	三菱重工業	76.8
ピロリン酸銅電鍍	野村鍍金	80.1

3.2 実大空洞試験

PR銅電鍍のJHF/DTLへの適用性を見るために、ポート部を省略した実機大タンク(電鍍後寸法:内

径 $\phi 560 \times L 3,321 \text{mm}$)と端板を製作し、内面0.5mm厚の銅電鍍と電解研磨後、Q値測定および真空特性試験を実施した。タンク素材は炭素鋼鍛造品(SF440A)であるが、電鍍時の欠陥となる“ひげ巣”やブローホールを避けるため中空鍛造を行い、且つ、タンク内面に溶接ビードが極力でない設計としている。

電解研磨後タンクと端板を組み立て、Q値測定を行った結果、TM₀₁₀モードで計算値の約98%Q値が得られた。(更にその後製作したJHF/DTLホットモデルでは、ドリフトチューブやチューナー等を取付けた場合でも約95%のQ値が得られた。)

真空排気試験では残留ガスに重い成分は無く、主ピークは水であり、初回排気のみでガス放出率は $4 \times 10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ に達し、リニアックに要求される 10^{-6}Pa 台の真空度は十分に達成しうる見通しを得た。

3.3 放電特性試験

材料の加速器への適合性を調べる方法の1つとして、真空中での絶縁破壊特性を、表1に示した3種の銅電鍍法で作製した電極を用いて比較測定を行った。電極は同形状の無酸素銅材の上に、それぞれ、0.5mm厚の銅電鍍層を形成させたものである。

コンディショニングを模擬して、電界を徐々に上げながら、300MV/m程度まで500回の繰り返し絶縁破壊試験を行った結果、初期の絶縁耐力がPR法では他の約2倍であること、試験前のXPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy)表面分析で、同法でのみ銅のピークが顕著であること等が確認された。この結果は、PR法による空洞では、コンディショニング時間を短縮できる事を予測させるもので、事実、その後のJHF/DTLホットモデルでは極めて短時間(約半日)でフルパワー投入が可能となった。

詳しくは、本研究会13P-22「電鍍法により形成した無酸素銅電極の放電特性」にて報告する。

4. 加速器コンポーネントへの応用

PR法による銅電鍍は、KEK/JHFリニアックでは、DTL(Drift Tube Linac)とSDTL(Separated DTL)の加速空洞タンク内面、及び加速電極であるドリフトチューブ(DT)表面の銅電鍍に適用されている。また、DTLのDTに内蔵される四重極電磁石用コイルの冷却溝形成にも適用されており、現在、量産中である。

各製品の製造技術については、本研究会13B-03「大型ハドロン計画におけるPR銅電鍍法適用技術」にて詳しく報告する。

4.1 加速空洞

DTLのタンクは、内径560mm、長さ3.3mの鍛造鋼製で、大小様々な寸法のポートが50箇所程度あり、その内、ステンレス鋼製フランジが付く大型ポートが7個

所と、複雑な形状をしている。ポートも含めたタンク内表面全体には、厚さ 0.5mm 以上の銅電鍍層を形成することが必要とされる。また、この電鍍層は、ピットやボイド、割れ等の欠陥が無く、下地である鍛造鋼やステンレス鋼との密着性が強く、表面が鏡面状に平滑でなければならない。この仕様を満たすために、タンク内表面に、PR法で厚さ 1mm 以上の銅電鍍を施し、機械加工で所定の厚さまで切削した後、電解研磨を行って鏡面状の最終表面を得ている。従来の光沢剤法による最終表面は、フラッシュメッキとクロメート処理で得られる点でも、本法の製法とは異なっている。

電界研磨処理を施した表面は、安定で緻密な酸化物層（高周波による誘導電流が流れるスキンプスより十分に薄い）に覆われるため変色も無く、十分な水洗と乾燥のみで高真空域に達する事が、実大タンクモデルおよびホットモデルで実証された。

4.2 ドリフトチューブ

DTは外径 140mm、の円筒の中心に、陽子ビームの通る $\phi 20\text{mm}$ 前後の穴があいたものをステムと呼ばれる $\phi 34\text{mm}$ の支持棒でDTLタンク上端より吊るす構造を持つ。今回の工事ではこのDTを約 150 個（円筒長さが 50~165mm の間で全部異なる）製造する。全部品がステンレス鋼の溶接組立でできており、ビーム穴の内面を除いては、タンクと同様、厚さ 0.5mm 以上の銅電鍍層を表面に形成させる必要がある。

DTは高電界がかかる加速用電極であるため、放電を起こさないよう滑らかなR仕上げをして、且つ、タンク以上に平滑な鏡面に仕上げなければならない。従って、1mm 以上の銅電鍍を施し、機械加工で所定の寸法まで切削されたDTは、機械研磨の後電解研磨を行う。電解研磨には、この際に銅電鍍層に埋め込まれた砥粒や、機械加工時の加工変質層を除去する効果もある。図1にタンクにDTを取付けたDTLホットモデルの写真を示す。



図1 加速空洞とDT (ホットモデル)

4.3 四重極電磁石用銅電鍍コイル

DTの内部には、強力な四重極電磁石が封入されており、小型であるが約 1,000A の励磁電流を要する。従っ

てコイルにはホローコンダクターを使用したいが、小さな磁極に巻く際の曲げR制限等で、実際には余りコイル部の体積を減らせないため、DT小型化のためにR部の無いコイルのニーズがあった。そこでロストワックス法を用いた銅電鍍により、中空溝を形成し、銅ブロック材からコイルを削り出して製作した。図2に電鍍コイル（通称“栄コイル”）の外観を示す。接続端子をロウ付けするため、本コイルの銅電鍍層（1mm 厚）はロウ付け温度でも熱的に安定で、変形しない事が要求される。従って、銅電鍍は必然的にPR法となる。

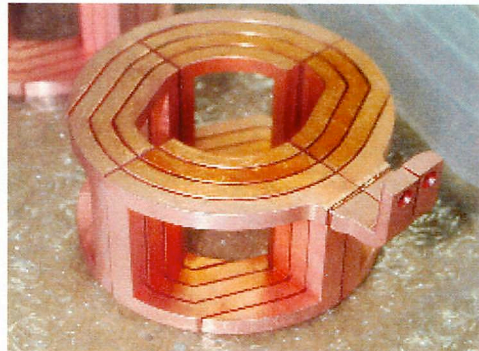


図2 栄コイルの概観

本コイルの製造法は概略次のとおりである。コイル母材となる無酸素銅ブロックに、四重極電磁石の1ブロック毎、冷却溝となる貫通穴と溝を機械加工で螺旋上に連結させる。この溝内部にワックスを充填し、表面に金属粉をすり込んで導電性を与えた後、銅電鍍を施し、溝の蓋とする。温度を上げてワックスを抜けば銅ブロック内にコイルの中空部が形成されている事になる。後は冷却穴に沿って、不要なブロック部を削り出すと共にワイヤークット等でコイル状に切り離して行けば完成する。²⁾

4. 結言

熱負荷のかかる、複雑な銅構造体を形成する手法として適用されていたPR銅電鍍法は、無酸素銅並みの高純度な銅電鍍層を作る手段でもあった。この点に着目した我々は、前述したような基礎データを得るための特性試験を経て、本電鍍法を高電界及び高真空環境下の加速器コンポーネントへ適用する事とした。その第1歩がKEK/JHFリニアックである。本電鍍法による電析物の優れた特性は、加速器本機のみならず、加速器周辺製品への幅広い適用が期待される。

参考文献

- [1] K.Tajiri et al., Controllable Copper Electroforming for Mechanical Properties from Acid Copper Sulfate Bath, Abstracts of the 195th Meeting of the Electrochemical Society, (1999) No.102
- [2] K.Tajiri et al., Coil, New Application of Electroforming, AESF/SFSJ Advanced Surface Technology Forum, (1998) p.145