

Status report for the copper electroforming on an aluminum alloy

F. Naito^{*)}, Y. Saito, E. Takasaki, K. Tajiri^{A)} and Z. Kabeya^{A)}

High Energy Accelerator Research Organisation

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0308 JAPAN

^{A)} Mitsubishi Heavy Industry, LTD

Nagoya Aerospace Systems

10, Oye-cho, Minato-ku, Nagoya-shi, Aichi-ken, 455-8515 JAPAN

Abstract

The basic study for the copper electroforming on an aluminum alloy has been started for the application of the high-duty linac construction. The recent results of the study is rescribed in this report.

アルミニウム合金上への銅電鍍顛末記

1. 序

最近の陽子リニアック開発の傾向としては、大電流加速と高デューティー化運転がある。この運転形態を実現する場合、特に冷却能力を高めることを考慮した加速空洞（例えば低エネルギー部ではアルバレ型DTLなど）の開発は重要な項目となる。

大型の加速空洞（主に共振周波数がUHF帯）の一般的な構造は、構造材として鉄を使用し、高周波にさらされる内部表面にはメッキやHIP及び爆着等により銅被覆を形成している。しかし前述のように将来的にビーム電流量の増加等により冷却能力の問題がより重要になった場合でも構造材として鉄が良いのかという疑問がある。これは、鉄に換えるものがあるかという設問に置き換えられる。我々は候補の一つとしてアルミニウム合金を考えた。一般的にはアルミニウム合金上に十分な密着性を持った銅被覆を施すことは容易ではないと言われていた。過去にはロスアラモスに於てアルミニウム合金上への銅メッキを施した材料でRFQが試作はされている[1]が、あまり巧くはっていないようであった。しかし最近の情報で、アルミニウム合金への銅被覆はそれ程難しい技術でないことが分かった。そこでアルミニウム合金+銅被覆の系によるRF空洞の製作を考える価値があると判断し、そのR&Dを開始した[2]。

銅被覆の方法としては先に述べたようにメッキ、HIP、爆着等があるが、最近なって高純度の硫

酸銅溶液を用いたPeriodic Reverse (PR) 銅電鍍法により非常に良い特性の銅厚メッキ面を持った空洞が製作できることが分かってきた[3,4]。そこで、アルミニウム合金上にPR銅電鍍で銅被覆を形成した加速空洞の製作を目標にして開発を進めている。

2. アルミニウムの一般特性

アルミニウム合金と他の金属材料を比較するために、各種物理的特性を表1[2]にまとめておく。それによればアルミニウム合金の一般的な物理的性質は、密度=2.7g/cm³、縦弾性係数=70kN/mm²、横(せん断)弾性係数=26kN/mm²、線膨張係数=24X10⁻⁶/°C、ポアソン比=0.33、熱伝導度=140-210W/(m°C)である。

即ち、長所としては、熱伝導度は、アルミニウム合金は通常タンク材料(鉄)の約3倍の熱伝導度を持ち、SUS304の約10倍の熱伝導度を持つ。質量は、銅、鉄、SUS材の約1/3となり、製品の軽量化に有効である。短所としては溶融点(500-600度)が他の金属材料(1000度以上)より低い。これは、ビーム照射のような熱衝撃に弱いことを意味する。更に一般的に、機械的強度が弱い。線膨張率は、鉄の約2倍あり、熱による(溶接)ひずみが発生しやすいと言える。しかし短所に関しては使用方法を十分吟味することで回避できると思われる。(ただし、まだ「十分な吟味」はされていない)

3. 銅電鍍試験

アルミニウム合金上に金属を被覆する場合、

^{*)} F. Naito, 0298-64-5216, fujo.naito@kek.jp

材料	引っ張り強さ (N/mm ²)	耐力 (N/mm ²)	伸び (%)	剪断強さ (kN/mm ²)	縦弾性係数 (kN/mm ²)	比重	溶融点 (℃)	導電率 (IACS%)	熱伝導度 (W/m/K)	線膨張係数 (10 ⁻⁶ /K)
銅				48.4	129.8	8.9	1083		397	17
銅 (硬質)	343	309	6	192	117	8.9	1065-1082	100	390	16.8
銅 (熱間圧延材)	233	69	45	158	117	8.9	1065-1082	100	390	16.8
Al				26.2	70.6	2.7	660	57	238	23.5
Al (5052-O)	195	90	25		70.3	2.7	607-649	35	140	23.8
Al (6063-T5)	185	145	12	~150	68.9	2.7	615-655	55	210	23.4
Fe						7.9	1536		75	11.8
Fe (鋳物)	206	172	0.5	302	96	7.1	1093-1316	2	50	10.1
Fe (板)	350	213	21	288	192	7.7	~1530	16	70	11.7
鋼 (熱間圧延材)	412	216	30	309	192	7.9	1466-1510	12	60	11.7
SUS304 (軟質)	618	275	55	460	199	7.9	1427-1471	2.4	20	17.3
SUS304 (硬質)	1059	858	15	769	199	7.9	1427-1471	2.1	20	17.3

表1. 金属材料の特性

銅メッキ面との密着性を確保するために前処理が必須である。我々が、試作に使用したのは

- (1) Cu-Al 混合金属のプラズマ溶射
- (2) ジンケート (Zn) 処理[5]

の2種の前処理である。(2)のジンケート処理の方が一般には信頼されている。が、我々の目的が加速空洞用であるため真空材料としても良い特性が求められる為、亜鉛が真空面に出てくる可能性がある処理はあまり好ましくない。それが(1)のプラズマ

溶射も試みた理由である。

最初はアルミニウムの板材を用いて試作を行い、銅電鍍が形成できることを確認した。次いで、母材としてアルミニウム(5052-O材)丸棒(60φ x 80mm)を使用し、その側面に
(1) Cu-Al溶射(Cu 85%+Al 15%、厚さ~400μm)
(2) ジンケート処理+シアン化銅メッキを施し、その上にPR銅電鍍を行った。電鍍層の厚さはまず予備試験として0.5mm厚のものを製作し、次に引っ張り試験用に8mm厚のものを製作した。図

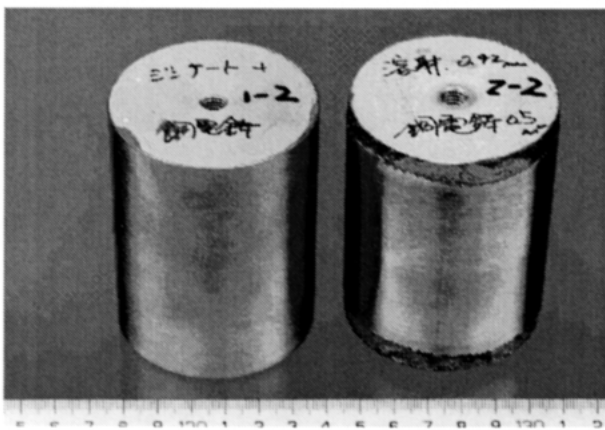


図1. 0.5mm厚のPR銅電鍍を施したアルミ円柱母材 (左がジンケート処理、右がプラズマ溶射処理)

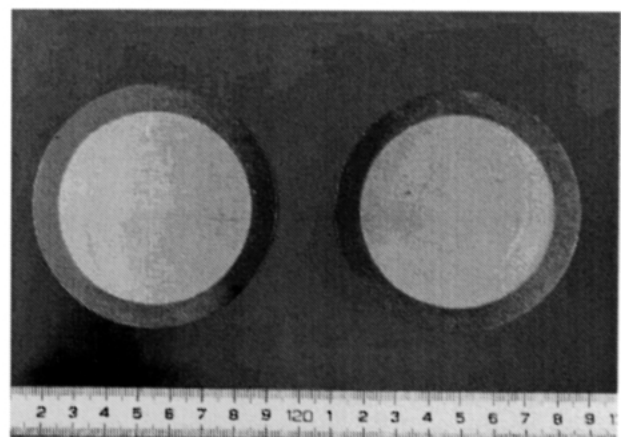


図2. 8mm厚のPR銅電鍍を施したアルミ円柱母材の輪切り (左がジンケート処理、右がプラズマ溶射処理)

1に予備試験として0.5mm厚の銅電鍍をしたアルミ母材を示す。左側がジンケート処理、右が溶射処理である。

8 mm厚の銅電鍍をした試験体を輪切り（高さ10 mm）にしたものを図2に示す。内側の比較的白い部分がアルミ母材でありその周囲を銅電鍍層が被っているのが分かる。左側がジンケート処理、右が溶射処理である。溶射処理の試験体では銅電鍍層とアルミ母材の境界に薄く境界層が観察できる。

次いで、図2の部品から接合部を中心に図3に示すような引っ張り試験用ミニダンベル試験片（中央部の直径3 mm）を切り出した。図3の左側3個がジンケート処理のもの、右側3個が溶射処理のものである。後者はミニダンベルの加工中に接合部（アルミ溶射界面）で外れてしまった。（最も右側のもは外れる前に加工を中止している。）

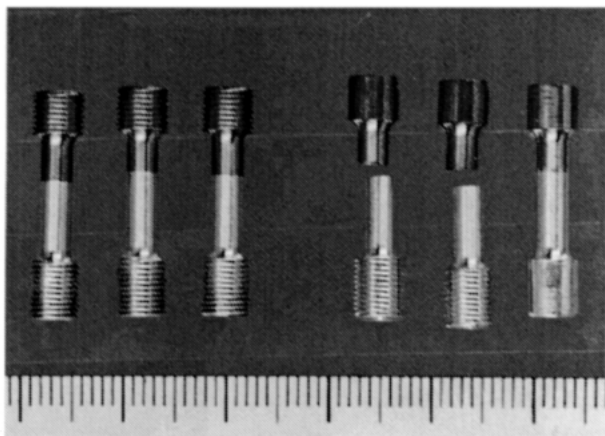


図3．引っ張り試験用ミニダンベル
（左3個がジンケート処理、右3個がプラズマ溶射処理）

結局、ジンケート処理を施したミニダンベルのみ引っ張り試験を行った。結果は119, 141, 124 MPa(=N/mm²)であり、ほぼ5052アルミ材の文献値に近い値を示した。実際に破断面の位置はアルミニウムと銅の接合部では無く、アルミニウム母材のほうであった。したがって、アルミ母材面上に前処理として「ジンケート処理+シアン化メッキ」を施せば十分な密着性を持った銅電鍍層を母材上に形成できることが判明した。

今回、前処理として行ったアルミニウム+銅のプラズマ溶射は全く引張強度が無かったわけであるが、この結果から短絡的にプラズマ溶射が採用できないと結論はできない。なぜなら溶射する金属の組成を今回は1種類きり試していないので、実験を

繰り返し組成の最適化を行えば密着性の高い溶射条件が得られる可能性は否定されていないのである。

5. 今後の課題

仮にジンケート処理+銅電鍍を進める場合でも、以下のような工程を逐一確認しながら開発を進めて行くことになる。

- (1) 試験片を用いた真空特性（放出ガス量、ガス組成の測定）測定（特に亜鉛成分の混入の有無）
- (2) 小型空洞による高周波特性の測定
- (3) 大型空洞を製作する場合の大口径アルミ円筒製作方法の検討
- (4) 各種ポート用のフランジ取付法の確立。即ちフランジ溶接方法の確立。（これはまさに文献[1]の内容である。）
- (5) 冷却水配管方法（電蝕の防止法）
- (6) その他

これらは今後随時検討していかなければならない。

参考文献

- [1] W. E. Fox and N. K. Bultman, "Transition Fitting Between Aluminum and Stainless Steel Components of Cryogenic Accelerator", Proceedings of the 1992 LINAC conference, Ottawa, 725, (1992)
- [2] 高崎栄一、内藤富士雄、福本貞義「アルミニウム合金製品+銅メッキによるリニアックの可能性」、KEK-PS-LINAC MAINTENANCE REPORT No.211, (2000)
- [3] H. Ino, et al, "Advanced Copper Lining for accelerator Components", 本研究会
- [4] Y. Saito, et al, "Electrical Breakdown Characteristics of Electroformed Copper Electrode in Vacuum", 本研究会
- [5] 田尻桂介、「アルミ基板銅電鍍試験まとめ」三菱名航化研レポート、(2000)

アルミニウムの表面の一部を溶かし、薄い密着性の良い亜鉛被膜を形成することをジンケート処理と呼ぶ。次いでその上に目的のメッキ（我々ならば銅メッキ）をすると、メッキ液により亜鉛薄膜が溶解し、現れたアルミニウムの素材にメッキが施される。