

精密機械加工が施された無酸素銅の真空中絶縁破壊特性

小林信一^{1,A)}、大塚尚弘^{A)}、山納 康^{A)}

肥後寿泰^{B)}、峠 暢一^{B)}、高田耕治^{B)}、東 保男^{B)}、齊藤芳男^{B)}、人見宣輝^{B)}

^{A)}埼玉大学 工学部

〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保 255

^{B)} 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

Xバンド加速管に適用されている製作技術で得られる表面を有する無酸素銅電極について、インパルス電圧を繰り返し印加して真空中の絶縁破壊特性を調べ、これまでに行われた実験の結果と比較した。インパルス電圧印加の初期段階では、絶縁破壊電界は必ずしも高くはないが、繰り返し絶縁破壊により絶縁破壊電界は上昇し（コンディショニング効果）、約 270 MV/m 程度に到達した。また、このような高い絶縁破壊電界に到達するのに必要な絶縁破壊回数は数十回程度であった。これらの結果は、以前行われたダイヤモンドターニングによる加工が施された無酸素銅電極と同様の特性であり、熱処理後のダイヤモンドターニングによる加工は、高いコンディショニング効果をもたらすことが確認された。

1. はじめに

真空中の電極間の絶縁破壊は、電極表面状態に支配される^[1]。現在開発中のXバンド加速器では、加速電界は 55–75 MV/m のレベルが要求され、表面電界として 200 MV/m を越えることが想定されている^[2]。実験室的には、インパルス電圧印加による繰り返し絶縁破壊がもたらすコンディショニング効果を利用して、200 MV/m 以上の絶縁破壊電界が得られている^[3]。しかし、この方法は、絶縁破壊を起こさせるため、表面の損傷を受けること、電極の形状が制限される等の問題点があり、実用的には、電極表面の加工・処理のみで、要求される絶縁破壊電界が得られる必要がある。

ここでは、Xバンド加速管に適用されている製造技術で得られる表面を有する無酸素銅電極について、インパルス電圧を繰り返し印加して真空中の絶縁破壊特性（コンディショニング特性）を調べ、これまで行われた実験で得られた結果と比較した。

2. これまでの実験の概略

これまで、筆者らにより、無酸素銅電極表面に各種処理を施した時の真空中絶縁破壊特性が調べら

れてきた^[3]。そのうちの幾つか代表的なものをまとめて述べる。

図1は、無酸素銅のグレードによる絶縁破壊電界の違いを示したものである。この図から、真空容器に電極をセットし最初に電圧を印加したときの絶縁破壊電界にはグレードによる違いがないこと、Class-1 の無酸素銅が最も高いコンディショニング効果と絶縁破壊電界のバラツキが少ないことが示されている。この場合の電極表面は旋盤加工のみであり、真空容器導入後、Ar イオンによる in situ 表面清浄化処理が施された後、絶縁破壊試験が行われている。

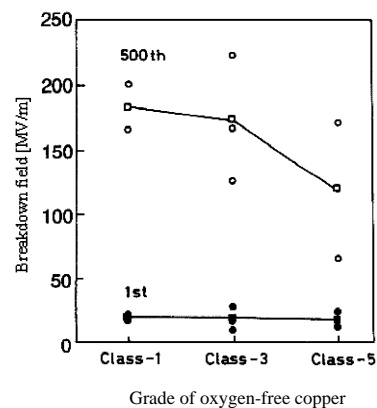


図1：無酸素銅のグレードと絶縁破壊電界

図2は、電解複合研磨^[4]が施された無酸素銅電極のコンディショニング特性である。この図には、旋盤加工のみの場合と、図3に示されるダイヤモンドターニングの効果も併せて示されている。この場合もイオンビームスパッタによる in situ 表面清浄化処理が施されているが、イオン種は He に変更されている^[5]。この図から、電解複合研磨を施すと、コンディショニングに要する絶縁破壊の回数を大幅に減少させることができることがわかる。また、ダイヤモンドターニングの場合も、同様に、少ない繰り返し回数でコンディショニングを達成することができる。電解複合研磨、ダイヤモンドターニングとも、

¹ E mail:s.kobayashi@ees.saitama-u.ac.jp

電極表面を鏡面に仕上げていることから、表面に存在する微小な不整が取り除かれる結果、コンディショニングに必要な絶縁破壊回数が減少したものと考えられる。しかし、鏡面仕上の効果は、第1回目の電圧印加時の絶縁破壊電解には現れず、その後のコンディショニング効果にその差が現れている。

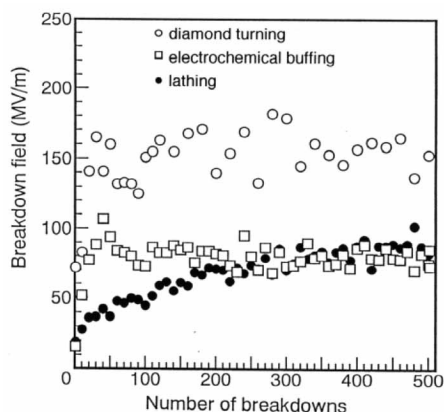


図2：電解複合研磨の効果

図3には、ダイヤモンドターニングと熱処理を併用したときのコンディショニング特性が示されている。この場合も He イオンビームによる in situ 表面清浄化処理が施されている。この結果より、コンディショニング処理に必要な繰り返し絶縁破壊の回数が少ないこと、及び熱処理の効果は明瞭で、700 °C の熱処理が施された電極の場合は、コンディショニング後に絶縁破壊電界が 250 MV/m 程度まで達することがわかる。この時のダイヤモンドターニングは、文献[6]に示されている条件に従って行われた。旋盤加工された電極について、熱処理無しのもの、400 °C（真空中1時間）、700 °C（真空中1時間）熱処理が施されたものを用意した。そして、これらの電極についてダイヤモンドターニングが施された。

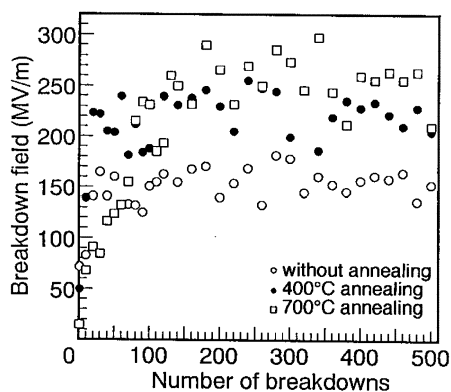


図3：熱処理及びダイヤモンドターニングの効果

3. 無酸素銅素材の前処理とダイヤモンドターニングによる精密機械加工

3.1 前処理及び機械加工

今回の試験で用いた電極の製作工程は表1の通りである。

表1：製作工程および条件

項目	内容
材料	Class-1 無酸素銅 φ36
アニール	窒素 500°C 2時間
バイト	天然
バイト半径	0.4 mm
回転数	2800 rpm
最終切り込み	2 μm
送り	3 mm/min
切削液	ケロシンミスト

また、製作後の洗浄・乾燥は、Xバンド加速管で標準的に行われている方法によった。すなわち、作業の順に、アルコール浸析、窒素ブロー、アルコール中での超音波洗浄 1 分間、窒素ブロー、アセトン中での超音波洗浄 1 分間、そして窒素ブローである。

このようにして準備された供試電極は、絶縁破壊試験用に埼玉大に運ぶまで、高エネ研のクリーンルーム内のデシケータに保管された。

3.2 残留応力

表2に各種処理後にダイヤモンドターニングが施された電極の残留応力測定結果を示す。いずれも、値そのものは小さいと言えるが、バラツキが非常に大きい結果となっている。これは、熱処理による結晶粒の成長が顕著であることによる。

表2：残留応力

処 理	残留応力 [MPa]
加工のまま	-25.31 ± 45.70
加工後 高圧洗浄	-5.92 ± 28.31
加工後 H ₂ 1000°C アニール	126.09 ± 115.25
加工後 H ₂ 1000°C アニール、加工	7.31 ± 130.65
加工後 真空中 900°C アニール	38.09 ± 48.39
加工後 真空中 アニール、加工	-28.68 ± 63.71

4. 真空中絶縁破壊破壊特性

4.1 実験手順

供試電極は高エネ研で準備され、クリーンルーム内のデシケータに保管された後、そのクリーンルーム内で運搬用の真空容器に移され、埼玉大に運ばれた。そして、in situ イオンビームスパッタ清浄化処理、XPSによる表面分析、および真空中絶縁破壊試験が行える実験装置の試料導入部にその運搬用真空容器を取り付け、供試電極を試料導入室に移した。

これにより、クリーンルームで電極を運搬用真空容器に移した後は、大気に触れることなく、電極を真空中絶縁破壊試験に供することができる。

試料導入室に移された電極は、He イオンビームにより表面の清浄化処理が施された後、XPSにより表面分析され、真空中絶縁破壊試験に供される。この間、電極は大気に曝されることなく、超高真空中で一貫してこれらの作業を行うことができる。真空容器内の圧力は 10^{-7} – 10^{-8} Pa であり、印加電圧は、立上がり時間 64 μ s、立下がり時間 700 μ s のインパルス電圧である。

4.2 絶縁破壊特性及び電極表面状態

図4に絶縁破壊特性を示す。絶縁破壊初期段階では絶縁破壊電界が低く、破壊を重ねるに従い破壊電界が上昇するコンディショニング効果が認められる。また、コンディショニングが飽和するまでの破壊回数が数10回と少なく、また、コンディショニング後の到達破壊電界も極めて高いもの(約270MV/m)となっている。この特性は、図3と良く類似している。

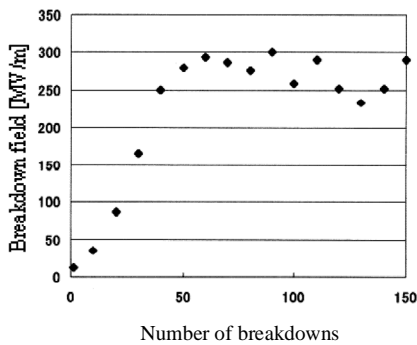


図4：絶縁破壊回数に対する絶縁破壊電界の関係

また、この実験での特徴的な点として、電圧を印加した最初の数回は、ダイヤモンドターニングが施された電極面間ではなく、距離のはるかに長い電極側面間で絶縁破壊が発生したことが挙げられる。このことは、今回の加工、および実験に至るまでの電極の取り扱いが、初めから高い絶縁破壊電界をもたらしていることを示唆している。

図6に、真空容器導入から150回絶縁破壊後までの電極表面状態の変化を示す。スパッタ前のXPSスペクトルより、電極製作後かなり注意深い取扱を行ったにも拘わらず、Cのピークが確認され、またCuのピークも小さい。絶縁破壊試験前のHeイオンビームスパッタにより、僅かなCは残留しているが、Cuのピークが明瞭になり、概ね清浄な表面となっていることが確認できる。そして、150回の絶縁破壊後には、Cも完全に除去され、極めて清浄な表面となっていることがわかる。

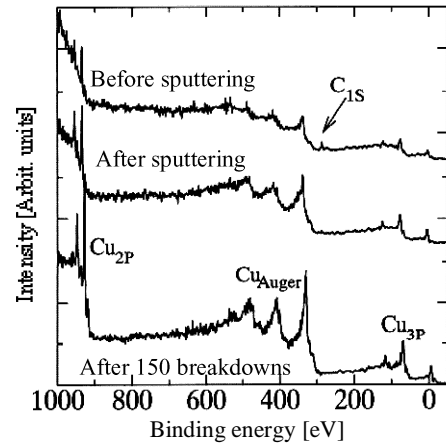


図5：電極表面状態の変化

5. まとめ

無酸素銅に対する表面処理と真空中絶縁破壊特性との関係について、これまでに行われてきた実験で得られた結果をまとめて示すとともに、今回、Xバンド加速管で適用されている製造技術で得られる表面を有する無酸素銅電極の真空中絶縁破壊特性を調べ、比較した。その結果、熱処理後ダイヤモンドターニングにより平滑で残留応力の少ない表面に精密加工することにより、コンディショニング後の絶縁破壊電界が極めて高くなると共に、比較的再現性の良い絶縁破壊特性が得られることが明らかにされた。また、同時にダスト等の付着を避けるような配慮をすることにより、電圧印加初期段階から高い破壊電界が得られる可能性のあることが示された。

謝辞

残留応力の測定には理学電機の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] R. V. Latham ed., "High Voltage Vacuum Insulation : Basic Concepts and Technological Practice", Academic Press, London, pp.2-4, 1995
- [2] 肥後寿泰, "ディスクの高電界特性からみた問題点", 高エネ研メカ・ワークショップ報告書, 2001
- [3] S. Kobayashi, "Recent Experiments on Vacuum Breakdown of Oxygen-free Copper Electrodes", IEEE Trans. DEI, Vol. 4, pp.841-847, 1997
- [4] Y. Baba and K. Sato, "Super Mirror-Flat Finishing of Metal Surfaces by Electrochemical Buffing", Proc. 15 th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, (ISDEIV), pp.3-10, 1992
- [5] S. Kobayashi, H. Kojima and Y. Saito, "Influence of *in situ* Ion Beam Sputter Cleaning on the Conditioning Effect of Vacuum Gaps", SPIE Vol. 2259 (Reprint from Proc. of 16 th ISDEIV), pp. 364-367, 1994
- [6] 竹内、菅野、吉田, "無酸素銅の鏡面加工について", 日本機械学会論文集C編, Vol.57, pp.3263-3268, 1991