

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 12 日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2012

課題番号：22686029

研究課題名（和文） 表面処理および表面分析手法による真空長ギャップ絶縁の新体系化

研究課題名（英文） Vacuum Breakdown Characteristics for long gap and large surface area electrodes and investigation of the electrode surface condition

研究代表者

山納 康 (YAMANO YASUSHI)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：30323380

研究成果の概要（和文）：

本研究では、平等電界下の長ギャップ・大面積の電極について、機械加工条件や研磨などの表面状態を変えて真空中絶縁破壊特性を調査した。電極は、ロゴウスキー電極を用いて、すべて無酸素銅を用いた。本研究で用いた電極と加工条件、化学研磨の有無、保存状態の同じ小型電極を用意し、その小型電極の XPS 表面分析の結果を用いて、実験結果を検討した。これらの電極について、長ギャップ・大面積の無酸素銅電極における真空絶縁破壊特性の電極表面状態の影響や面積効果に関する基礎的データを得ることができた。

研究成果の概要（英文）：

Vacuum breakdown characteristics for long gap and large surface area electrodes under uniform electric field condition were investigated. Sample electrodes have different surface conditions which are machined by a diamond cutting tool or normal cutting tool. Another electrode is processed by the chemical polishing method. These electrode surfaces are analyzed by the XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy). We obtained the influence of the surface condition on the vacuum breakdown characteristics for large sized electrode and long gap distance. And the area effect on the breakdown voltage for the copper electrode gap in vacuum was investigated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
2011 年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2012 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	19,500,000	5,850,000	25,350,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学

キーワード：電気絶縁，真空，長ギャップ，表面分析，大面積

1. 研究開始当初の背景

真空絶縁方式は、電力用真空遮断器、高エネルギー粒子加速器、核融合用中性粒子入射装置などの電力・先端科学機器に幅広く利用されている。これら機器においては、真空中の絶縁耐力がそれら機器の性能向上に直結している。また、多くの分析機器や表面処理装置などでも真空中の放電抑止が問題となっている。これら機器の更なる性能の向上においては、真空ギャップの絶縁特性のデータが必須となる。機器の小型化や、性能および信頼性の向上を図る上で、真空ギャップでの絶縁破壊現象が障害となっており、特に大型の装置においてはこれが問題となっている。また、電力用高電圧機器のガス絶縁・アーク消弧媒体として主流となっているSF₆ガスが地球温暖化ガスとして定められたため、現在真空の絶縁・アーク消弧媒体としての重要度は増している。真空ギャップが数mm~数十mmの長ギャップになると絶縁破壊はクランプ則により発生すると考えられているが、電極の絶縁耐力に大きく影響すると考えられている表面状態との関係は詳細には明らかにされていない。このため真空中の大面積且つ長ギャップの絶縁破壊機構の解明、および絶縁破壊耐力の向上が求められている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、真空長ギャップの高電圧絶縁特性に関して、材料技術、表面処理技術による電極表面状態を変えたときの真空長ギャップ放電の絶縁耐電圧特性を調査することである。また、それらの放電特性から材料表面状態と真空絶縁破壊機構との関係で未解明であった面積効果についても調べることを目的としている。

3. 研究の方法

本研究の真空長ギャップの試験は、埼玉大学実習工場棟の高電圧実験室で行った。真空ギャップに印加する高電圧は開閉インパルスとした。実験回路の回路図を図1に示す。同図の(a)部は多段式開閉インパルス電圧発生装置である。各コンデンサには50kVDCまで充電可能となっており、それらのコンデンサが20段で公称電圧は1000kVである。各コンデンサの充電電圧5.9kVの出力波形を図2に示す。波頭長は276μs、波尾長は2700μsである。電圧は分圧器を介してオシロスコープにより測定した。また保護抵抗は20kΩである。

長ギャップ・大面積の電極の真空中絶縁破

壊特性を調査するための実験装置(図3)は、絶縁筒を介して高電圧電極を絶縁した真空チャンバーを用いた。真空チャンバー内はターボ分子ポンプ(排気速度480L/s)により排気した。また、この装置は下部に取り付けられているXYZ軸可動装置により、真空チャンバー内で電極を上下左右に移動可能である。また観測窓から電極間の絶縁破壊時の発光をビデオカメラで撮影した。電極の入れ替えは、観測窓を外して行った。

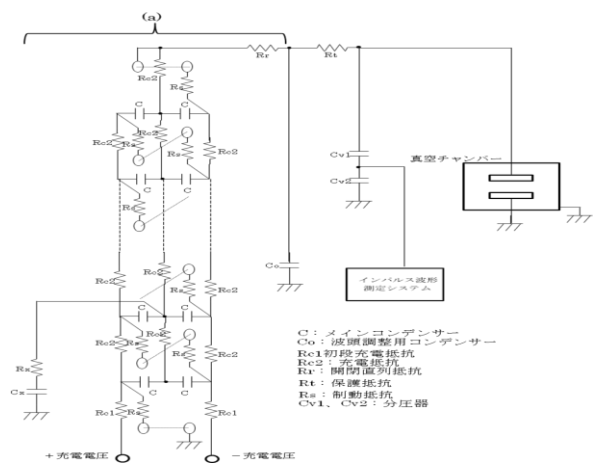


図1 実験回路

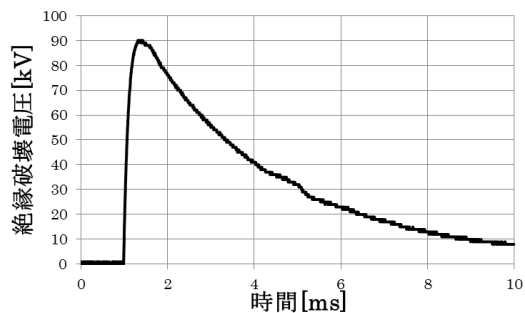


図2 開閉インパルス電圧波形

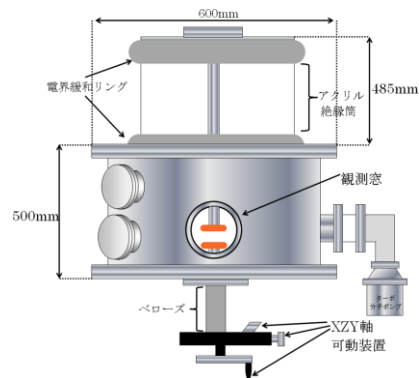


図3 実験装置

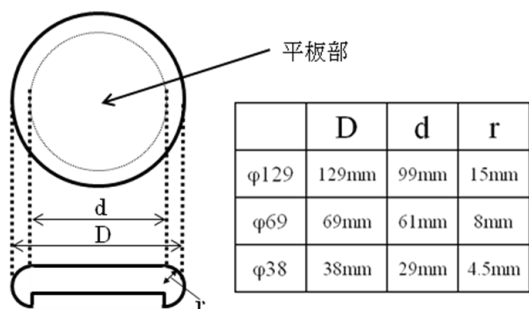
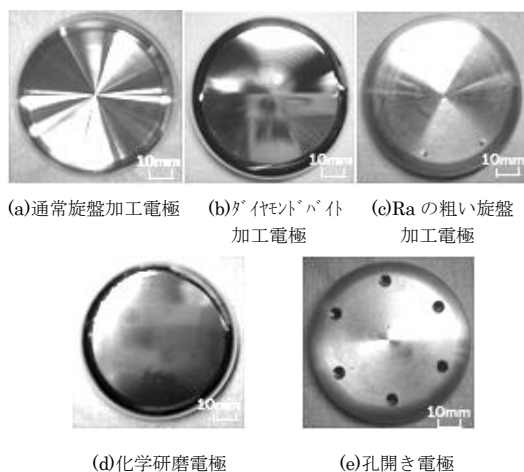


図4 供試電極形状



(a)通常旋盤加工電極 (b)ダイヤモンドバイト加工電極 (c)Raの粗い旋盤加工電極
(d)化学研磨電極 (e)孔開き電極

図5 試料電極

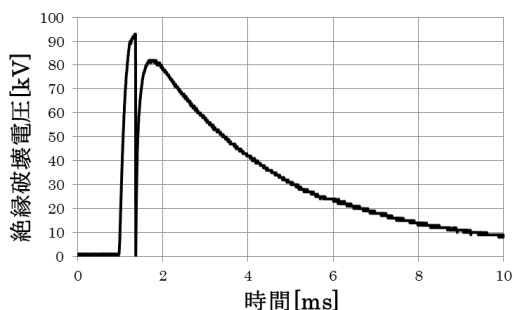


図6 ギャップ間放電時の電圧波形

本研究では、平等電界下の真空中絶縁破壊特性を調べるために、図4に示す近似ロゴウスキー電極を用いた。試料電極は、すべてC1020製の無酸素銅を用い、通常旋盤加工のφ129、φ69、φ38の電極、ダイヤモンドバイト加工仕上げのφ69の電極、加工業者の異なる表面粗さが粗いφ69の電極とその電極に化学研磨を施した電極を用意した。さらに不平等電界下でのデータを得るため表面粗さが粗いφ69の電極に、φ5の孔がφ50の円上に等間隔に6個ある電極も用意した。φ69の5種類の電極の写真を図5に示す。また本研究で用いた電極と加工条件、化学研磨の有無、保存状態の同じ小型電極を用意し、その

小型電極についてXPS表面分析や表面観察を行い、その結果を用いて、実験結果を検討した。

絶縁破壊試験は、昇降法によって電圧印加を行った。実験では30mmの長ギャップから絶縁破壊試験を行い、絶縁破壊電圧が飽和して一定となるまで繰り返し絶縁破壊を行った。絶縁破壊の試験中は、観測窓からギャップ間の様子をビデオカメラにより観察した。実験ではギャップ間の絶縁破壊の有無は図6に示すような電圧波形の急落と電極間のスパーク発光の発生により確認した。

4. 研究成果

(1) 加工条件、および表面処理の異なる電極の絶縁破壊特性

φ69の加工条件や表面処理の異なる4種類の電極において15mm～30mmのギャップ長から絶縁破壊試験を行った。図7にダイヤモンドバイト仕上げの電極でギャップ長20mmの場合の繰り返し絶縁破壊特性を示す。同図より、初回絶縁破壊電圧は137kVであり、その後絶縁破壊を繰り返すと絶縁破壊電圧が上昇するコンディショニング効果が確認でき、300～400回程度で飽和した。図8に同電極で20mmの絶縁破壊試験後にギャップ長を15mmに縮めて繰り返し絶縁破壊試験を行った時の絶縁破壊特性を示す。同図において、初回の絶縁破壊電圧は158kVで、その後繰り返し絶縁破壊を行ってもコンディショニング効果は現れず絶縁破壊電圧の上昇は現れなかった。このような特性は、他の電極についても同様であった。これは15mm～30mmの長ギャップでのコンディショニングにより電極表面上の弱点が除去されたためと考えられる。このような手順でギャップ長を短くし、各ギャップ長での絶縁破壊電圧を測定した。

図9に各電極のギャップ長に対する絶縁破壊電圧を示す。図9の結果から、電極によって程度は異なるが、ギャップ長に対して1/2乗で上昇する特性が得られた。ギャップ長に対して1/2乗で上昇することから、いずれの電極においてもクランプ理論による絶縁破壊が発生していると考えられる。このギャップ長に対する絶縁破壊特性は、通常旋盤加工の電極、表面粗さが粗い電極、ダイヤモンドバイト加工仕上げ電極のいずれの電極においてもほとんど違いは生じなかった。化学研磨を施した電極は他の電極と比較して絶縁破壊電圧が上昇した。これは、化学研磨による電極表面の平滑化に依るものと考えられる。

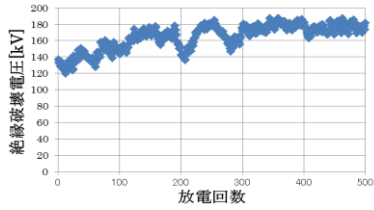


図7 ダイヤモンドバイト加工電極の繰り返し絶縁破壊特性(ギャップ長 20mm)

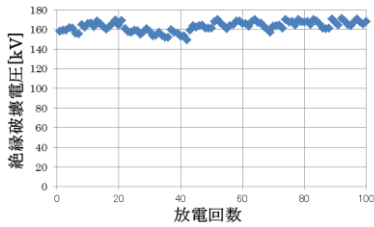
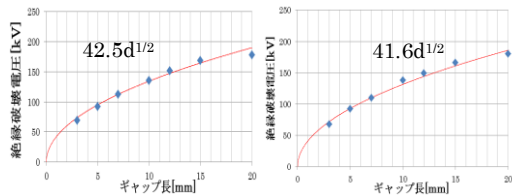
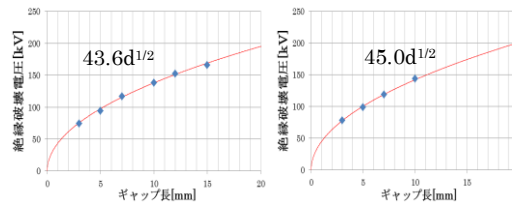


図8 ダイヤモンドバイト加工電極の繰り返し絶縁破壊特性(ギャップ長 15mm)



(a)通常旋盤加工電極

(b)ダイヤモンドバイト加工電極



(c)表面粗さの粗い旋盤加工電極

(d)化学研磨電極

図9 各電極の絶縁破壊特性

図10にこれらの電極と同時期、同条件で且つ搬送法と同じ小型電極のXPS表面分析結果を示す。

同図は、ダイヤモンドバイト仕上げ電極のXPSスペクトルである。電極表面は、銅のピーク以外に酸化層に起因する酸素のピークと、炭化水素系の汚損物質に起因する炭素のピークが確認できる。汚損度合を定量的に表すために銅のピーク(Cu_{2p3/2})に対する炭素のピーク(C_{1s})と酸素のピーク(O_{1s})のスペクトルピーク比を算出し、比較した。図11に各電極のスペクトルピーク比を示す。過去の研究では、清浄な電極ではスペクトルピーク比はC_{1s}/Cu_{2p3/2}で1~3以下、O_{1s}/Cu_{2p3/2}でも1~3以下となっており、本電極の汚損度合が高いことがわかる。これは電極が大型であるため電極の輸送と保管がポリエチレン製の袋に入れ真空封止した簡易的なものとした

ためと考えられる。

図12に電極の光学顕微鏡写真を示す。電極の加工の仕方により切削加工の切削痕の様子や表面の粗さの状態が異なることがわかる。表1に電極の平均表面粗さRaを示す。表面粗さの粗い電極は電極周囲のRaが15μmと高く、この電極に化学研磨を施すことで表面粗さが周囲で0.54μmに激減していることがわかる。化学研磨電極の耐電圧が高くなった原因はこの表面粗さが低かったことに依ると考えられる。

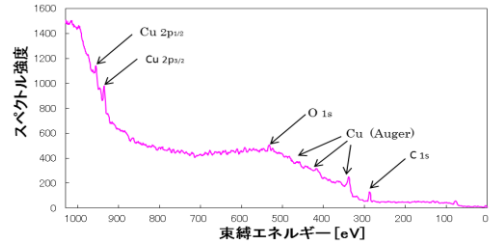


図10 ダイヤモンドバイト加工電極 XPS 表面分析

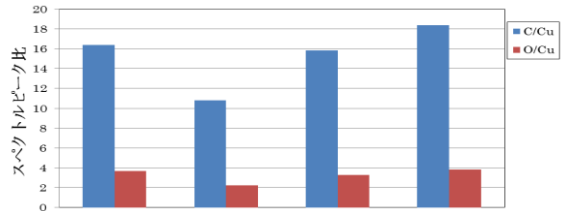
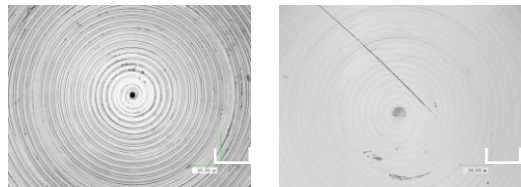
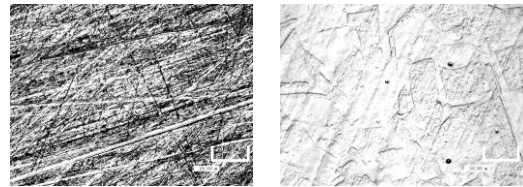


図11 各電極のCu_{2p3/2}に対するC_{1s}、O_{1s}のスペクトルピーク比



(a)通常旋盤加工電極

(b)ダイヤモンドバイト加工電極



(c)表面粗さの粗い旋盤加工電極

(d)化学研磨電極

図12 各電極の表面

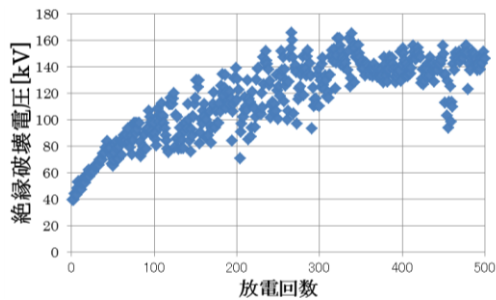
表1 各電極の表面粗さ

	中心部	中心から周囲5mmの点
通常旋盤加工電極	1.11 μm	4.55 μm
ダイヤモンドバイト加工電極	0.82 μm	0.64 μm
Raの粗い旋盤加工電極	4.10 μm	15.43 μm
化学研磨電極	0.59 μm	0.54 μm

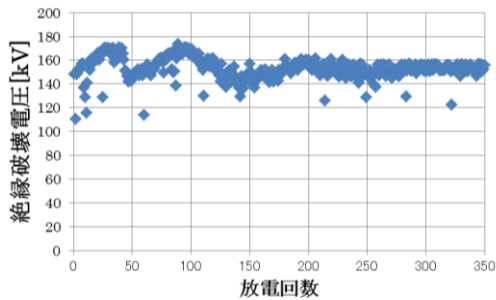
(2) 孔開き電極による不平等電界下での電極の絶縁耐力

図 13(a)にφ69 の孔開き電極においてギャップ長 20 mm の繰り返し絶縁破壊特性を示す。初回絶縁破壊電圧は 39 kV であり、その後の繰り返し絶縁破壊により絶縁破壊電圧が上昇するコンディショニング効果が確認できる。絶縁破壊電圧は 400 回程度で飽和した。図 13(b)にφ69 の平板電極の繰り返し絶縁破壊特性を示す。平板電極でギャップ長 20 mm の初回絶縁破壊電圧 52 kV であり、孔開き電極と比較すると 13 kV の違いが発生しており、コンディショニング時も絶縁破壊電圧に大きなバラツキを持って上昇していくことがわかる。

各ギャップ長に対する絶縁破壊電圧の結果を図 14 に示す。同図には比較のため同加工条件であるφ69 の表面粗さが粗い平板電極の絶縁破壊特性も追記した。また、孔開き電極と、表面粗さが粗い平板電極の繰り返し絶縁破壊試験後の電極写真を図 15 に示す。図 14 の結果から、孔開き電極においてもギャップ長に対して 1/2 乗で上昇する特性が得られた。しかし、平板電極と比べ、孔あき電極は絶縁破壊電圧が 21 %～33 %低くなった。これは、図 15 において、平板電極では、放電痕が電極面に一様に分布しているが、孔開き電極においては、孔の付近に放電痕が集中していることから、孔により電極表面上に局所高電界を有する不平等電界分布のためと考えられる。



(a) 孔開き電極(ギャップ長 20mm)



(b) 平板電極(ギャップ長 12mm)

図 13 繰り返し絶縁破壊試験

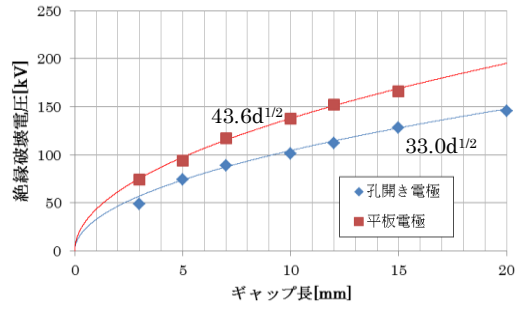
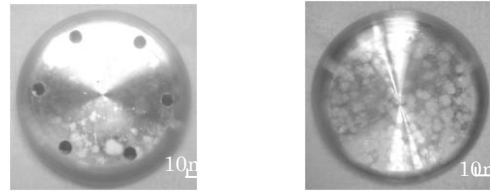


図 14 孔開き電極の絶縁破壊特性



(a) 孔開き電極

(b) 平板電極

図 15 実験後の電極(陽極)

(3) 面積の異なる電極の絶縁耐力

加工条件が同じでφ129、φ69、φ38 の電極面積の異なる 3 種類の電極において 10 mm～30 mm のギャップ長で絶縁破壊試験を行った。図 7 と同様にコンディショニング効果が確認でき、絶縁破壊を繰り返すと徐々に破壊電圧が上昇し、200～400 回程度で飽和した。その後、ギャップ長を短くし、各ギャップ長での絶縁破壊電圧を測定した結果を図 16 に示す。またギャップ長 5 mm 時の絶縁破壊電圧の結果と電極の面積の関係を図 17 にまとめた。

図 16 の結果から、面積の異なる電極においてもギャップ長に対して 1/2 乗で上昇する特性が得られた。また図 17 から、絶縁破壊電圧は電極面積の-0.29 乗となる特性となった。過去の文献では、無酸素銅電極において、絶縁破壊電圧は電極面積の-0.23 乗になることが報告されている。この違いは本実験の電極の表面粗さの違い、さらには電極の汚損が多いためと考えられる。

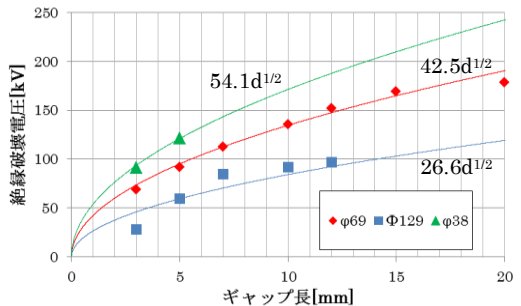


図 16 表面積の異なる各電極の絶縁破壊特性

(2)研究分担者
無し

(3)連携研究者
無し

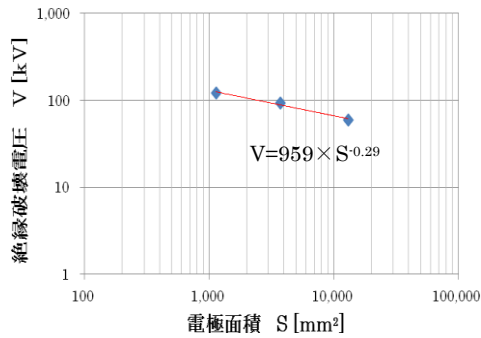


図 17 電極面積－絶縁破壊電圧特性

以上より、本研究の成果を以下に纏める。

- ① 電極の面積、加工条件、表面処理の有無、孔の有無に関わらず、真空中の繰り返し絶縁破壊試験においてコンディショニング効果が確認でき、絶縁破壊を繰り返すと徐々に破壊電圧が上昇し 200～500 回程度で飽和した。その後、ギャップ長を短くし、各ギャップ長での繰り返し絶縁破壊試験では、コンディショニング効果が現れなかった。また、絶縁破壊電圧は、ギャップ長に対して 1/2 乗で上昇する特性であった。
- ② 表面汚損の状態が比較的悪い電極の真空中長ギャップ、大面積の絶縁破壊特性は、電極の加工条件や表面粗さが異なっても、顕著な違いは生じなかった
- ③ 真空中の大面積・長ギャップにおいても、化学研磨により電極の絶縁耐力は上昇することが明らかになった。
- ④ 不平等電界分布となる孔開き電極の真空中長ギャップ絶縁破壊特性は、平板電極と比べて、絶縁破壊電圧が約 21%～33%低下し、また、コンディショニング過程の破壊電圧もバラツキの大きなものとなった。
- ⑤ 本実験で得られる通常旋盤加工の無酸素銅電極の絶縁破壊電圧に対する面積効果の特性として、 $V=959 \times S^{-0.29}$ を得ることができた。

以上により本論文では、真空中における長ギャップ・大面積の絶縁破壊特性の基礎データを得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 1 件)

1. 城匡哉, 山納康, 小林信一, 齊藤芳男:「市販の金属磨き液で研磨した無酸素銅電極と Cu-Cr 電極の真空中絶縁破壊特性」, 電気学会放電研究会, ED-12-013, 2012, pp.77-82 (埼玉大学).

6. 研究組織

(1)研究代表者

山納 康 (YAMANO YASUSHI)