

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06293

研究課題名(和文) 電極表面の汚損分布イメージング表面分析による真空絶縁破壊メカニズムの解明

研究課題名(英文) Vacuum breakdown concerning influence of contamination distribution of the electrode surface

研究代表者

山納 康 (Yamano, Yasushi)

埼玉大学・情報メディア基盤センター・准教授

研究者番号：30323380

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：真空中での繰り返し絶縁破壊によるコンディショニング過程において、電極表面の汚損分布は、対向する電極の中心部だけでなく周辺部についても汚損が減少していることが明らかとなった。また、はじめに中心部の汚損が減少し、その後周辺部の汚損が減少する傾向が見られ、中心部、周辺部共にほとんど消滅する一方、汚損量が多い場合には、中心部、周辺部ともに汚損量が少ない場合よりも汚損が残っており、周辺部の汚損は多くの量の汚損が残る結果となった。

以上より、電極周囲の汚損分布は真空中絶縁破壊特性に影響を与えていて、コンディショニング後の真空中絶縁破壊特性については電極表面の周辺部の汚損の影響が大きいことが見いだされた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

真空は高耐電圧特性を含む様々な特徴を有することから、分析機器や加速器などで利用されている。機器の電圧や電界の増強により真空中での絶縁破壊現象が障害となっている。したがって、真空中の絶縁破壊機構の解明および絶縁耐力の向上に関する研究は不可欠である。

機器の絶縁設計においては、電極表面の状態、特に清浄度合いの管理が重要であり、電極表面の清浄・汚損の度合いに対する真空ギャップの絶縁特性のデータが必須となり、本研究はこれらの基礎的なデータとなり得る。

研究成果の概要(英文)：Vacuum breakdown characteristics under uniform and non-uniform electric field condition were investigated. Sample electrodes have different surface conditions which are contaminated by a cutting oil. These electrode surfaces are analyzed by the XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy).

To investigate an influence of the contamination distribution on the electrode surface on the breakdown characteristics in vacuum, we conducted repetition breakdown tests in vacuum and X-ray photoelectron spectroscopy to analyze the chemical state of the electrode surface. From the experimental results, it is suggested that the contamination around the outside of the electrode surface deteriorates the breakdown voltage at the final stage of conditioning process. We obtained the influence of the surface contaminated condition on the vacuum breakdown characteristics for the uniform and non-uniform electrode gap.

研究分野：電力工学

キーワード：真空 絶縁破壊 汚損分布

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

真空は空間中の分子数が極端に少なく、荷電粒子の取り扱いが容易である特徴を有することから、加速器などで利用されている。荷電粒子の加速のために真空中で高電界が印加されるが、加速電界の増強により真空中での絶縁破壊現象が障害となることがある。したがって、真空中の絶縁破壊機構の解明および絶縁耐力の向上に関する研究は不可欠である。その他に真空絶縁方式は、加速器以外にも電力用真空遮断器、医療用 X 線源、核融合用中性粒子入射装置、宇宙機器などの電力・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も、やはり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、最近の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。今後の更なる性能向上においては、機器の設計に用いるための真空ギャップの絶縁特性のデータが必須となる。

これらの基礎となる学術的な動向は、1990 年代に電極の表面粗さと汚損状態が真空ギャップの放電や絶縁破壊に影響することが指摘されている。電極の汚損状態は、電極の切削時の加工油や保管時の空气中に存在する炭化水素系の有機物の付着、また保管時に形成される不安定な酸化膜などが主要な要素であり、これらが真空ギャップの耐電圧の低下をもたらしていることが明らかとなっている。これら汚損物質は、真空の絶縁破壊時には、電極からのガス放出や酸化膜を介した電子放出を引き起こすと考えられている。

しかし、これらの実験データの表面分析は絶縁破壊試験前に測定したものであり、その測定箇所は電極ギャップの最短距離となる電界最大部の 1 点における汚損状態を示していることが多い。しかし、真空中の絶縁破壊は必ずしも最大電界部だけで絶縁破壊が発生するだけでなく、繰り返し絶縁破壊と共に広い範囲の電極表面で放電が発生する。このように繰り返し絶縁破壊によるコンディショニング効果によって電極表面の広い範囲のクリーニング効果が見られ、特に放電が多発する絶縁破壊箇所は極めて清浄な表面状態となる。この実験データにおける矛盾点としては、繰り返し試験後の電極は極めて清浄であるが、その耐電圧性能は試験前の汚損状態に依存している点である。これは、電極表面の最大電界部にあたる繰り返し絶縁破壊箇所は清浄なのだが、その周囲は未だ清浄になっていないため、この絶縁破壊電界は周囲の汚損状態の影響を受けていることが推察される。即ち、この実験データを論理的に説明するには、電極表面の汚損分布状況を測定する必要がある。

2. 研究の目的

本研究で目指す目的は、これまでの“点”における表面分析を拡張し、真空中における耐電圧性能を決める要因の一つである電極の汚損分布を測定することである。即ち、電極周囲の汚損状態を把握することで、電極表面の電界強度分布と汚損状態分布を把握し、耐電圧性能との関係を明らかにする。

また、機器によっては、電界不平等性の極めて高い真空ギャップが構成されることが多々あり得る。このような電極系の真空ギャップ間の絶縁破壊ももちろん問題であるが、暗電流や微小な放電もアプリケーションによっては問題となり得る。真空ギャップ間を流れる暗電流や微小放電は、これに加えて電極の表面状態に強く影響を受けることが知られている。電極の表面状態を改善する方法であるスパークコンディショニングによる暗電流の低減効果を評価することも目的としている。

3. 研究の方法

真空環境下での絶縁破壊試験と表面分析を一貫して行い、供試試料を大気に曝すことなく移動させ、大気曝露による汚損物質の再吸着を避け、真空中で電極表面の汚損分布を把握しながら、その電極の耐電圧性能を測定した。

真空ギャップに印加する高電圧はインパルス電圧とした。各コンデンサには 25kVDC まで充電可能となっており、それらのコンデンサが 4 段で公称電圧は 100 kV である。波頭長は 70 μ s、波尾長は 450 μ s 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 10 k Ω である。

真空ギャップの真空中絶縁破壊特性を調査するための実験装置は、絶縁筒を介して高電圧電極を絶縁した真空チャンパー内で試験を行った。真空チャンパー内はイオンスパッタポンプ、チタンゲッタポンプにより排気した。また、この装置は上・下部に取り付けられている Z 軸可動装置により、真空チャンパー内で電極を上下に移動可能である。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。

本実験では、直径 25mm、曲率半径 R30 の無酸素銅球電極を試料電極として用いた。試料電極に使われている無酸素銅は JIS 規格に定められている C1020 であり、また、この電極の表面粗さは 0.2 μ m となっている。R30 無酸素銅球電極の写真を図 1 に示す。

供試電極の前処理として無酸素銅球電極の表面に強アルカリ洗浄剤(DCN90)を用いて 15 分間の超音波洗浄による汚損の洗浄を行う。その後、水溶性切削油を塗布後に 30 分間の加熱乾燥をして汚損の付着を行うことによって汚損の制御を行い、汚損度合いを変化させた。汚損の付着に

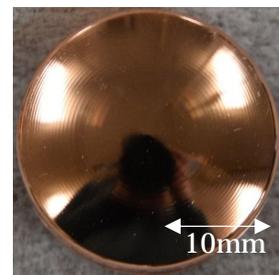


図 1 R30 無酸素銅球電極

用いた油は精製水で希釈し、その濃度は 0.1%と 10%とした。15 分間のアセトン洗浄後にこれらの試料を用いて真空ギャップを形成し、繰り返し絶縁破壊試験を行った。また、汚損状態を調べるために行った XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy)の取得箇所については、電極表面の中心部(0 mm)、中心部から 2.5 mm、中心部から 5.0 mm の 3 点とした。

また、電界不平等性の高い電極系としては、陽極が 25mm 無酸素平板銅電極、陰極が高さ 4mm、幅 1mm、外径 10mm のリング状突起が付いた 25mm 無酸素銅平板電極を用いた。ギャップ長を 0.5mm に設定し、インパルス電圧を用いた繰り返し絶縁破壊試験を行い、絶縁破壊試験後やその途中に 30kV の直流電圧を印加して暗電流を測定した。

4. 研究成果

図 2 に電極中心部における Cu に対する C のピーク強度を示す。同図には比較として洗浄なしと洗浄ありのデータも併記している。図 2 より、強アルカリ洗浄剤により電極がある程度清浄化され、その後の油の塗布により電極表面が汚損されることが分かる。

図 3 に切削油で汚損を付着させた 2 種類の試料(油の濃度 0.1%と 10%)の真空中絶縁破壊試験結果を示す。どちらの電極においても絶縁破壊を繰り返す毎に絶縁破壊電界が向上するコンディショニング効果が確認できる。そして、汚損量の多い場合には、真空中絶縁破壊特性が悪化していることが分かる。特に繰り返し絶縁破壊で耐電圧が上昇していく速度であるコンディショニングスピードと最終的な耐電圧特性であるコンディショニング飽和後の絶縁破壊電界に差が見られる。これは、電極表面の汚損状態が異なるためと考えられる。図 3 より、汚損量の多い試料(油 10%)では、最終的な耐電圧特性であるコンディショニング飽和後の絶縁破壊電界に差が見られる。これは、電極表面の汚損状態が異なるためと考えられる。

図 4(a) ~ (c) に濃度 10%の油で汚損を付着させた試料の電極表面の中心部とその周辺部の XPS 表面分析結果を示す。同図より、いずれの試料においても、絶縁破壊試験前では 531eV 付近の O_{1s} のピーク、531eV 付近の C_{1s} のピークが存在し、酸素や炭素に起因する汚損が電極表面に存在していることが読み取れる。また、絶縁破壊試験によって放電回数が増えていくにつれて O_{1s} と C_{1s} のピークが小さくなっていき、逆に絶縁破壊試験前から存在していた 953eV 付近の $Cu_{2p_{5/2}}$ のピークや 933eV 付近の $Cu_{2p_{3/2}}$ のピークをはじめとした Cu のピークが大きくなっていることから、電極表面の汚損が絶縁破壊試験によって消滅していき、試料電極の主成分である銅が現れていることがわかる。これらの結果は電極表面の中心部、周辺部ともに同じである。さらに、2 つの試料の絶縁破壊試験前の XPS 表面分析結果である図 2 の C_{1s} のピークは油 10%の方が油 0.1%より大きくなっており、油 10%の方が炭素に起因する汚損が多く存在していた。一方、 O_{1s} のピークは油 10%と油 0.1%で大きな違いは生じていなかった。これらのことから、今回行った強アルカリ洗浄剤による汚損の洗浄と水溶性切削油の塗布、加熱乾燥による汚損の付着によって、C に起因する汚損については汚損度合いを制御できており、絶縁破壊特性の違いはこれ

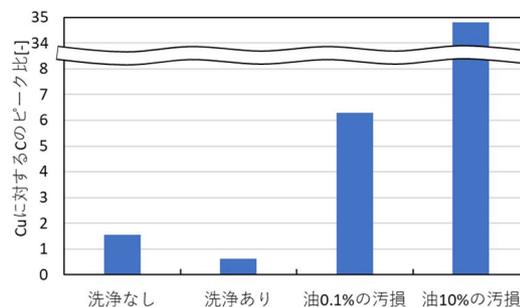


図 2 電極中心部における C のピーク強度

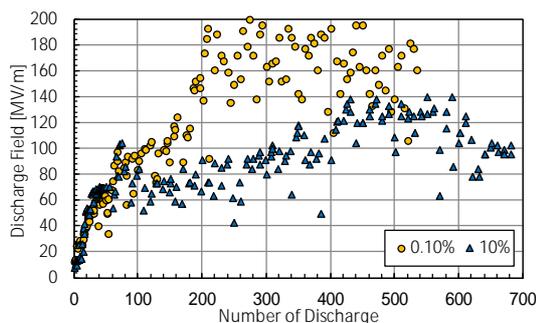
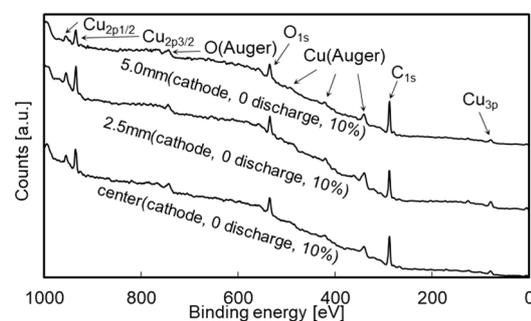
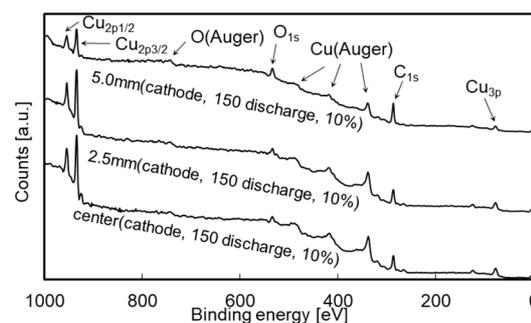


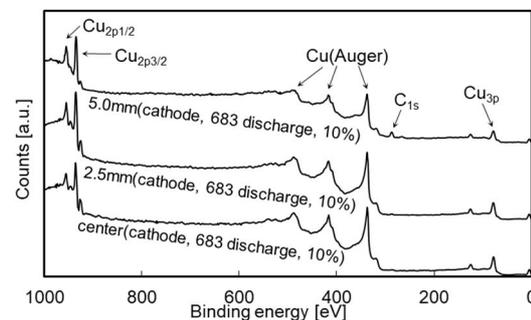
図 3 絶縁破壊試験結果



(a) 放電試験前



(b) 150 回放電後



(c) 683 回放電後

図 4 試料電極の XPS 表面分析結果 (油 10%, 陰極)

らの影響が現れた結果であると考えられる。

図5に電極表面中心部とその周辺部の汚損分布の変化を示す。同図は試料の陽極の炭素に起因する汚損度合いを示している。図5より、絶縁破壊試験前の電極表面全体に汚損が存在していたものが、試験後には中心部だけでなく周辺部についても汚損が減少していることが読み取れる。電極表面の汚損量が少ない場合には中心部、周辺部共にほとんど消滅する一方、汚損量が多い場合には、中心部、周辺部ともに汚損量が少ない場合よりも汚損が残存しており、特に周辺部の汚損は多くの量の汚損が残る結果となり、これが絶縁破壊特性の悪化を引き起こしたと考えられる。

電界不平等性の高い電極系においてスパークコンディショニング処理を施した場合も図3と同様に放電電界が上昇した。各放電回数における暗電流の測定結果より、放電回数が増えるにつれて、暗電流の値が小さくなり、また、暗電流のばらつきも小さくなり、より安定した暗電流となった。これは、スパークコンディショニングにより電極の表面状態、特に電極表面の清浄に変化するためと考えられる。

以上の結果を表1にまとめる。同表の真空中絶縁破壊試験の結果より、汚損分布が絶縁破壊特性に影響を与えており、特にコンディショニング飽和後の平均絶縁破壊電圧については電極表面の周辺部の汚損の影響が大きい可能性が高いことが見いだされた。

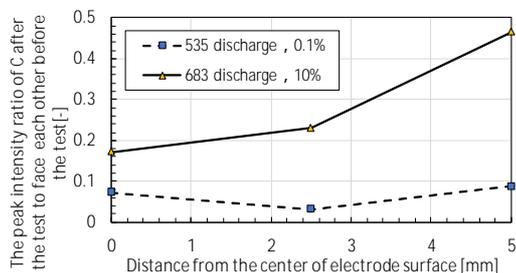


図5 繰り返し絶縁破壊試験後の汚損分布の変化

表1 試料電極の真空中絶縁破壊特性の主要な値

	油の濃度 0.1%	油の濃度 10%
初回絶縁破壊電界[MV/m]	12.2	8.6
コンディショニング飽和後の平均絶縁破壊電界[MV/m]	161.9	114.5
コンディショニング飽和までに要した放電回数	334	426

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中野 幹久, 山納 康
2. 発表標題 電極表面中心からの電極表面の汚損分布と真空中絶縁破壊コンディショニング特性の関係
3. 学会等名 令和元年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----