

真空中の放電現象

小林 信一*

Electrical Breakdown in Vacuum

Shinichi KOBAYASHI*

Abstract

Electrical breakdown in vacuum is a complicated phenomenon, since there are no gas particles to become carriers of breakdown currents. The breakdown characteristics are, therefore, fully influenced by surface conditions of electrodes and insulators. This article presents fundamental mechanisms of electrical breakdown in vacuum. It is pointed out that characterization of electrode surface condition is principally important and thus in situ surface analysis is necessary to reveal the electrical breakdown mechanism of a vacuum gap. An experimental system is introduced to carry out this in situ surface analysis and breakdown experiments. Some examples of surface precautions improving breakdown strength of a vacuum gap, such as in situ sputter cleaning, diamond turning to mirror finish, in situ heat treatment are given.

1. はじめに

真空中の絶縁破壊は、電極間の空間におけるガス分子の密度が低く、その平均自由行程 λ が電極間距離 d に比較して長いため、電極間において α 作用（電子が気体分子と衝突してイオン化することで電子が増殖する作用）¹⁾による荷電粒子の増殖が期待できないので、ガス中の放電現象とは際だった特性の違いを有している。すなわち、イオン化して電流のキャリアとなる粒子が極間にもともと殆ど存在しないので、それらの粒子が電極表面から供給される必要がある点が、ガス中の絶縁破壊現象との最大の違いである。そのため、真空中の絶縁破壊現象は、電極表面の状態に支配される。しかし、実用電極の表面状態を規定する(Characterize)ことは極めて困難であり、そのためさまざまな絶縁破壊の理論が提唱される結果となり、また真空ギャップの絶縁破壊電圧が不安定、あるいは予測しにくい等、実用上の高信頼化を妨げる原因ともなっている。ギャップ長、ガスの種類および圧力が決まれば、かなり高い精度で絶縁破壊電圧が予測できるガス中の放電とは全く事情が異なっている。

それでも、これまでの長年にわたる研究、および実用経験により、ある程度の法則性が見出されており、それらを基に設計が行われてきた。

近年、高エネルギー粒子加速器、宇宙機器、核融合炉用イオンビーム入射装置等、真空絶縁ならびに荷電粒子が関連した装置では、その使用条件が厳しくなり、真空ギャップにはより高度の絶縁特性および信頼性が要求されるようになってきている。また、地球温暖化問題に関する京都会議において、従来広く使用されてきた SF_6 が地球温暖化ガスに指定され、その排出が規制されるようになり、その代替となる絶縁・消弧媒体の開発が望まれている。従来の真空ギャップに関する設計の考え方では、これらの要求に応えることは困難であり、電極表面状態を精密に制御しながら、高度の絶縁耐力が得られる処理法を見出すことが必要になっている。

真空技術、表面分析技術および半導体製造技術の急速な進歩により、かなりの程度、表面状態のCharacterizeが可能になってきた。筆者らは、これらの手法の一部を取り入れて、電極表面状態を分析しながら、真空ギャップの絶縁破壊特性の測定を行い、表面状態と絶縁破壊特性の関係を明らかにするための研究を行ってきた。また、真空中の絶縁特性を利用するためには、導体の支持に使用される誘電体の沿面放電を抑制することも重要である。その理由は、一般には、同一ギャップ長の絶縁破壊電圧に比較して、沿面放電電圧の方が低いからである。

* 埼玉大学大学院理工学研究科 Saitama University School of Science and Engineering
(E-mail: s.kobayashi@ees.saitama-u.ac.jp)

本稿では、真空中の絶縁破壊現象研究の歴史と、絶縁破壊に関する素過程について説明した後、主にこれまで筆者らが行ってきた研究について、真空ギャップの絶縁破壊特性、および絶縁破壊特性向上のための表面処理技術について述べる。また、現象の説明、解釈に必要なところでは、関連論文を紹介する。巻末には、関連教科書、文献をまとめて記載した²⁻⁸⁾。真空中の絶縁破壊に関する国際会議には、International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuumがあり、1964年より隔年で24回開催されており(2006年には松江で開催)、この分野が継続して、国際的に重要な分野であることがわかる。電気学会からは1996年5月に電気学会技術報告第586号⁹⁾が初めて発行され、その後調査活動が継続され、2005年1月には同第1001号¹⁰⁾が発行された。

2. 研究の歴史

19世紀の終わりから、いわゆる真空放電(より正確には低気圧中の放電)により生ずる発光のスペクトル分析をもとに、物理的な概念が転換される画期的な発見が数多く行われた。その多くの実験においては、真空が有する良好な絶縁特性が利用されていた。このように、物理学の研究では、真空を絶縁媒体として利用することはかなり以前から極めて普通のことであったが、工学的に絶縁媒体として利用されるようになるのは、幾分時代が下り、1913年のクーリッジによる高電圧・高真空X線管の実用化がその最初であると考えられている¹¹⁾。その後、真空管が全盛を迎える1950～1960年代に研究が隆盛を極め、この頃に、現在定説とされているさまざまな真空中の絶縁破壊開始理論が発表された。前記の国際会議が発足したのもこの頃である。これ以来、各種機器の使用条件の極端化に伴い、要求される絶縁性能に対応する研究が続いている。

3. 真空ギャップの絶縁破壊現象

3.1 ギャップ間で発生する素過程

前述のように、真空中の絶縁破壊現象は、電極表面からの粒子放出特性、すなわち電極表面状態に支配される。高電界が印加されたときに、電極表面から放出される粒子としては、まず電界放出電子および表面に付着している汚染物が考えられる。そして、電子が放出されると、電子照射を受けるところでは、表面吸着ガスの脱離、電極材料の蒸発、電極材料に吸蔵されているガスの脱離、電子放出点での陰極材料の蒸発等、多種多様な粒子発生現象が生ずる。このようにして放出された粒子のいずれもが絶縁破壊開始の原因となり

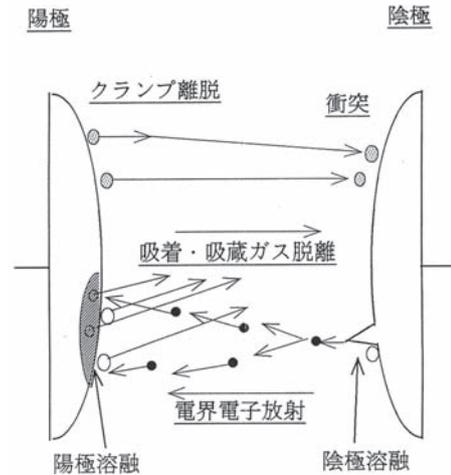


図1 電界が印加された真空ギャップ電極間で生ずる素過程¹²⁾

得るため、極論すれば、粒子発生機構の数に等しい絶縁破壊理論が存在し得ることになる。そして、どの粒子放出過程が主要となるかは電極表面の状態に依存し、この表面状態を明らかにすることが困難であることが、真空ギャップの絶縁破壊現象解析と絶縁の高信頼化を難しくしている原因である。

図1に、高電圧が印加された真空ギャップで生ずる現象(素過程)がまとめて示されている¹²⁾。高電圧を印加した場合に、まず考えられる粒子放出過程は電界電子放出である。これによると、真空ギャップ電極間はこの電子放出により陰極電子放出点で溶融・蒸発して絶縁破壊に至る(陰極開始説)か、あるいは電子照射を受ける陽極表面が溶融・蒸発して絶縁破壊に至る(陽極開始説)。このどちらが優勢になるかは、電極材料、表面状態等さまざまな要因で決まり、一義的には決定できない。その理論的な解析を試みたものとして、文献13が挙げられる。

また、電極表面に緩く付着しているクラump (Clump)も、電界印加により表面を離脱し、対向電極に衝突して蒸発し粒子発生が生ずる。これが原因となって、絶縁破壊に至る場合もあり、この理論はクラump説と呼ばれる¹⁴⁾。

このように、絶縁破壊の発生には多くの要因が挙げられる。

3.2 真空ギャップの絶縁破壊特性

このようなさまざまな過程が原因となって絶縁破壊が発生するが、絶縁破壊電圧 V_b とギャップ長 d との間には、図2に示されるような関係が観測されるのが普通である。すなわち、短ギャップ長では絶縁破壊電圧はほぼギャップ長に比例し、長ギャップになるとギャップ長の約1/2乗に比例する傾向にある。この後

者の特性が、真空ギャップを高電圧絶縁に利用する際の大きな欠点となっている。

ギャップ長に比例する部分は電界電子放出が関与した絶縁破壊であり、1/2 乗に比例する部分は、クランプが関与した絶縁破壊であると考えられている¹⁵⁾。

3.3 真空中絶縁耐力向上に対する基本的な考え方

真空ギャップの絶縁破壊は、電子放出、ガス放出、クランプ放出がその原因となっている。従って、絶縁耐力を向上させるということは、これらの粒子放出を抑制することになる。

まず、電界電子放出の抑制には、電極表面で電気力線が集中して電界増倍効果が生ずるところを作らないようにすることである。すなわち、電極表面を平坦にすることである。しかし、電極表面を平坦に仕上げるのは困難な作業であり、平坦に仕上げる手法によっては、逆に電子放出点を生じさせる結果をもたらすこともある。

また、ガス放出を低減させるには、ガス含有量の少ない素材を使用することが考えられる。しかし、絶縁破壊に影響を及ぼすのは電極の極表面層であり、電極表面の加工法、保管法・期間等によりその表面層の状

態は大きく変化し、それに伴ってガスの放出特性は大きく変化する。

さらに、クランプの存在を低減するには、例えばクリーンルームで作業する等が考えられるが、完全に除去することは不可能である。

このように、それぞれの素過程を取り上げて対策を考えたとしても、それで十分ということにはならない。以下には、これまで筆者の研究室で行われてきた真空中絶縁破壊耐力向上に向けた取り組みを、文献16 から23 を中心に述べる。

4. 真空中絶縁耐力向上に向けた取り組み

4.1 絶縁破壊試験装置と XPS 表面分析装置 (in situ 装置)²³⁾

冒頭でも述べたように、真空中の絶縁破壊現象は、電極表面の状態に100%依存している。従って、各種の表面処理、表面分析、高電圧印加、絶縁破壊試験は、一貫して真空中(できれば超高真空)で行える必要がある。図3は、このような考え方の下に開発された実験装置であり、熱処理、イオンビームスパッタによる電極表面処理、XPSによる電極表面分析、高電圧印加および絶縁破壊試験を、電極を大気にさらすことなく行うことができる。

排気系は、いずれもスパッタイオンポンプならびにチタンゲッターポンプを用いている。これらのポンプにより各真空容器は連続排気されており、圧力は $10^{-7} - 10^{-8}$ Paに保たれている。試料電極の導入には、導入容器のみを大気に解放する(エアロック)。このようなエアロックシステムを有する超真空装置が日常的に使用できることが可能になったのは、表面分析装置や半導体製造装置の進歩によるところが大きい。

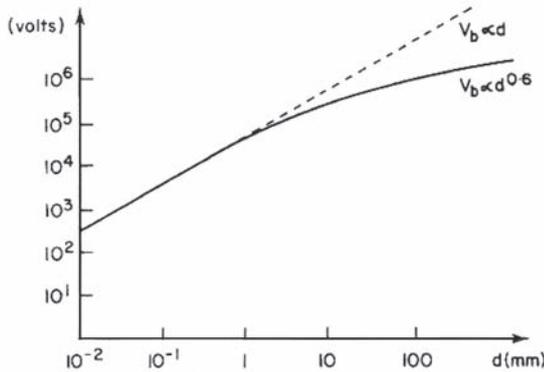


図2 真空ギャップの絶縁破壊電圧—ギャップ長特性¹⁵⁾

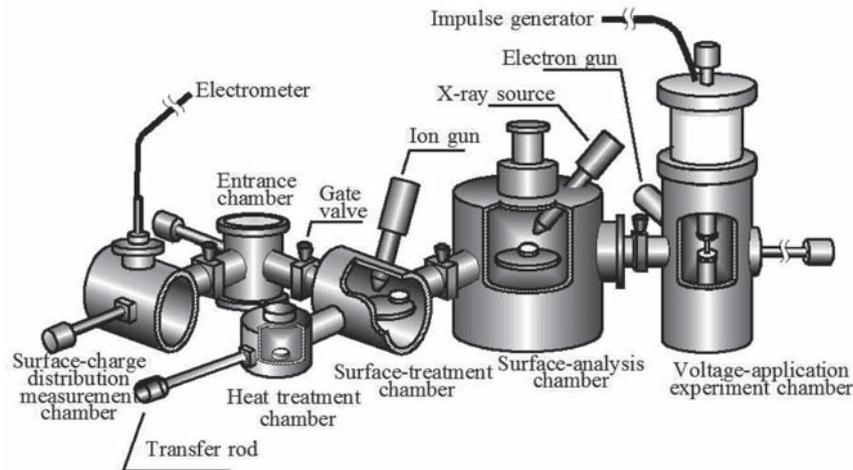


図3 in situ 実験装置

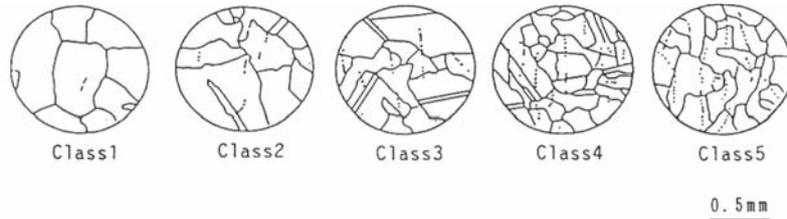


図4 ASTM-F-68による無酸素銅結晶の比較図¹⁶⁾

4.2 電極材料

無酸素銅を電極素材として使用したが、一口に無酸素銅と称してもさまざまな種類がある。無酸素銅の純度については、電子管用無酸素銅のJIS-H3100の規格があるが、規定されているガス成分は酸素のみである。真空機器で問題となる水素などのガス成分についての管理が必要であるが、分析方法などによる相違が大きく、現状では必ずしも信頼性が高いとはいえない。

アメリカのASTM規格における電子管用無酸素銅の規格F-68では、結晶組織中にみられる空孔などの欠陥の程度により、無酸素銅のグレードをClass 1～Class 5に分類している。図4は、ASTM-F-68の組織判定に用いられる結晶組織の比較図である¹⁶⁾。同図にみられる黒点は、液相から放出されたガスが脱出できないまま、固相中に残留した結果生じたものである。従って、この黒点が少ない組織ほど吸蔵ガス量も少ないものと見なすことができる。

このようなガス含有量に違いのある無酸素銅から作成された電極の絶縁破壊特性を調べた結果を図5に示す。なお、この実験の結果は、in situ 表面清浄化処理が施された無酸素銅電極について得られたものである。この図から、Class 1, Class 5ともコンディショニング効果があることが認められるが、その絶縁破壊電界の向上には違いがみられる。第1回目の絶縁破壊電界とコンディショニング後の絶縁破壊電界が、無酸素銅のグレードによりどのように違いが生ずるかを図6に示す。これより、第1回目の絶縁破壊電界には、無酸素銅のグレードによる違いはみられないが、コンディショニング後の絶縁破壊電界には、グレードによる違いが明瞭に現れ、ガス含有量が少ないと考えられるClass 1が最も高いコンディショニング効果を有していることが明らかにされた。

4.3 500回繰り返し絶縁破壊前後の電極表面状態

図7に500回繰り返し絶縁破壊試験前後の電極表面状態を示す。絶縁破壊試験前では、銅のピークが小さく、酸素および炭素のピークが明瞭に認められるが、絶縁破壊試験後の電極表面では、酸素および炭素のピークは消滅していることから、コンディショニング効果の原因

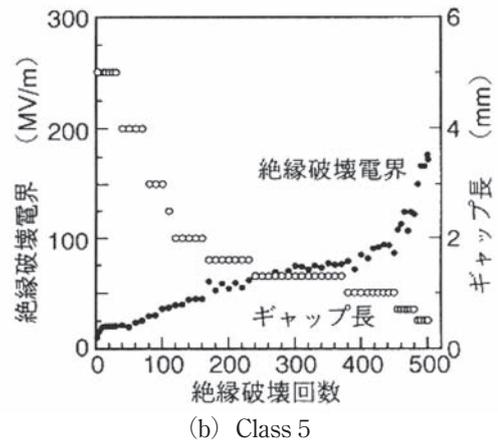
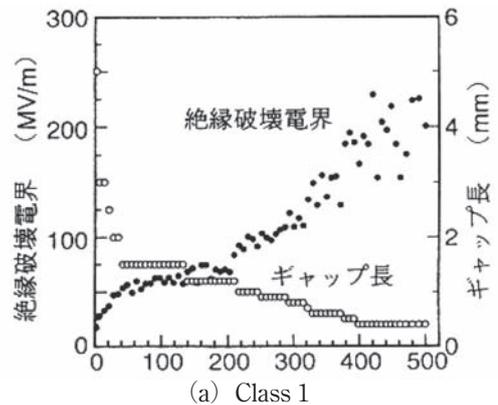


図5 Class 1およびClass 5電極の絶縁破壊特性¹⁷⁾

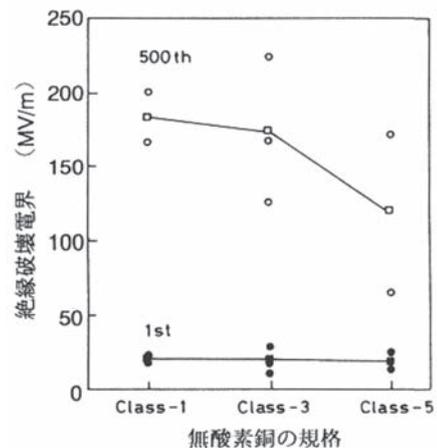


図6 無酸素銅の各グレードと第1回目および500回目の絶縁破壊電界¹⁷⁾

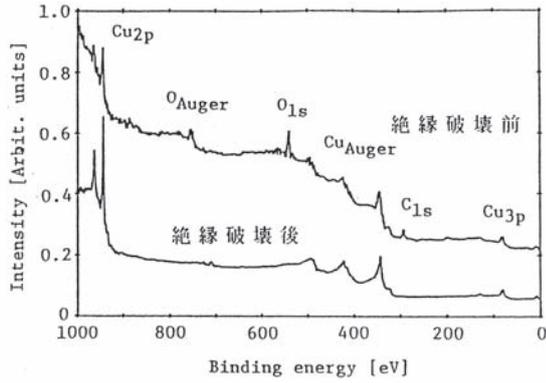


図7 500回繰り返し絶縁破壊試験前後の電極表面状態¹⁸⁾

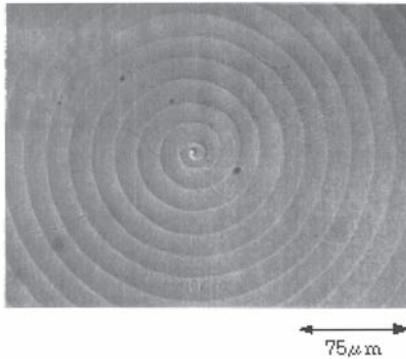


図8 ダイヤモンドバイト研削表面の位相差顕微鏡写真¹⁸⁾

として、電極表面清浄化が考えられた。そこで、in situ で電極表面清浄化処理を行えば、最初の電圧印加から高い絶縁破壊電界が得られると期待したが、図6に示したように、第1回目の絶縁破壊電界は必ずしも高い結果となっていない。しかし、その後に良好なコンディショニング効果を得るには、このin situ 電極表面処理が不可欠であった。このように、真空中に導入された電極の表面は、酸化物、有機物の汚染層で覆われているので、真空ギャップの絶縁破壊特性の議論を行う場合、その効果をどのように評価するかが問題である。

このようなin situ 電極表面処理の他に、電極表面をダイヤモンドバイトにより鏡面に研削した効果が調べられた¹⁸⁾。切削条件は、単結晶ダイヤモンドバイトを用い、回転数は1000 rpm、送り速度15 mm/min (15 μm/rev)、切り込み深さは5 μmである。

図8にその電極表面の位相差顕微鏡写真を示す。径方向の送りピッチが15 μmであることが確認できる。また、表面粗さは0.06 μmであった。

この電極の絶縁破壊特性を図9に示す。この図では、熱処理の効果も併せて示されている。この場合も、イオンビームによるin situ 電極表面清浄化処理が施されている。

この結果から、電極表面を鏡面に研削しても、1回目の絶縁破壊電界は改善されていないことがわかる。

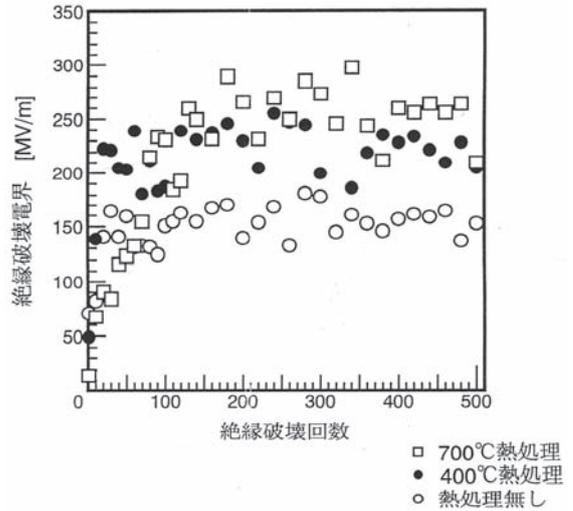


図9 ダイヤモンドバイト研削と熱処理の効果¹⁸⁾

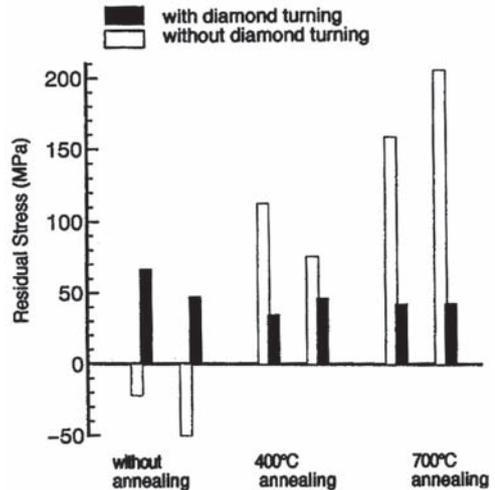


図10 ダイヤモンドバイト研削による残留応力の変化¹⁸⁾

しかし、コンディショニングに必要な絶縁破壊回数は減少している。このことから、鏡面研削は、高いコンディショニング効果を得るには必要な予備の処理であるが、必ずしも十分条件とはなっていないことがわかる。また、熱処理についても同じことがいえる。

ここで行ったダイヤモンドバイトによる研削により、加工面にどのような残留応力が与えられたか、X線回折法により測定した、図10がその結果である。

ダイヤモンド研削により残留応力が減少していることがわかる。これは、通常の機械加工により加えられた表面の歪みが、ダイヤモンドバイト研削により取り去られたことによるものと考えられる。このような残留応力が低減された表面が、良好なコンディショニング効果を得るのに適当であることが明らかにされた^{19), 20)}。

4.4 オゾン水処理による効果

高いコンディショニング効果を得るためには、in situ

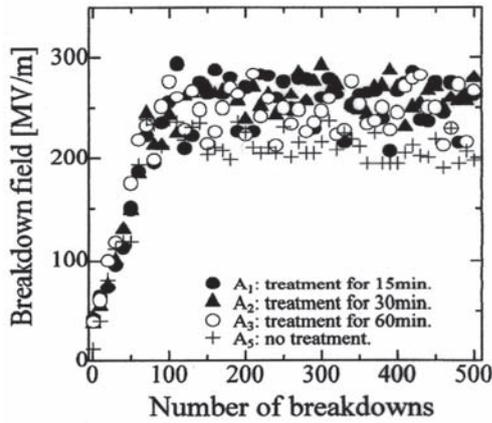


図 11 オゾン水処理の効果²²⁾

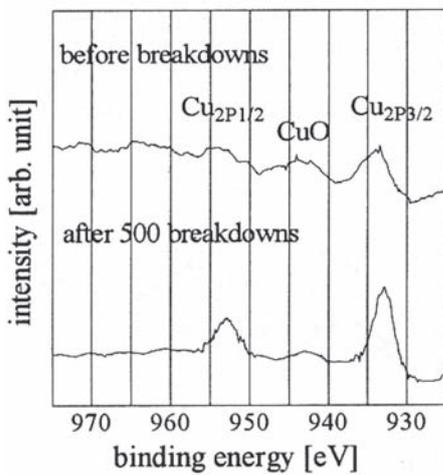


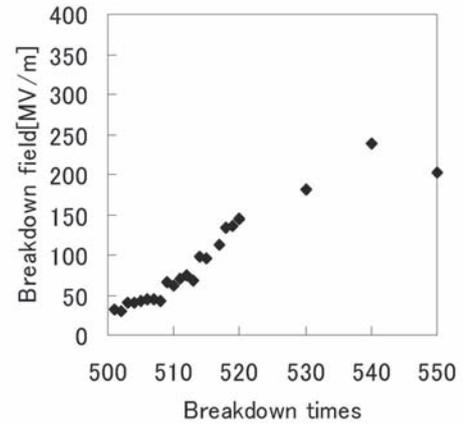
図 12 オゾン処理面の表面状態と 500 回絶縁破壊後の電極表面状態¹⁸⁾

電極表面処理が必要であることは先に述べたが、実用的な面から考えると、大気中の処理のみで、高いコンディショニング効果が得られることが望ましい。

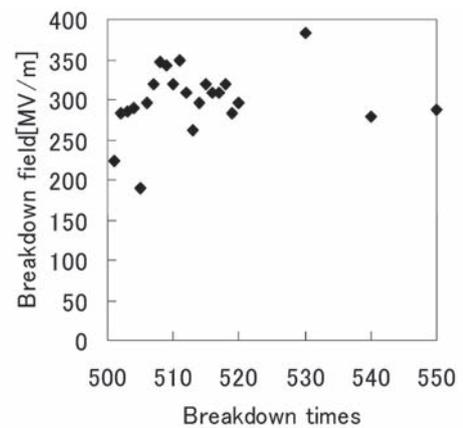
1998 年に、オゾン水処理は、有機物の汚染を効果的に除去でき、処理後、大気中に放置しても汚染物が再吸着しにくく、清浄な状態が維持できることが発表された²¹⁾。そのオゾン水処理の効果を図 11 に示す²²⁾。

使用した電極は、Class 1 の無酸素銅から用意された電極である。洗浄に用いたオゾン水の濃度は 2.8 ppm であり、そこに 15 分、30 分、60 分浸して洗浄を行った。

図 11 からわかるように、いずれの場合もコンディショニング効果が認められるが、処理なしの電極が最もコンディショニング効果が低く、30 分の処理が最もコンディショニング効果が高いことがわかる。また、コンディショニング後の絶縁破壊電界は、図 9 に示された 700°C 熱処理の電極で得られたコンディショニング後の絶縁破壊電界に匹敵することがわかる。この場合の電極表面状態の分析結果を図 12 に示す²²⁾。



(a) Gap I



(b) Gap II

図 13 コンディショニング後の電極に対する熱処理の効果²³⁾ (Gap I : 600°C, Gap II : 200°C)

この分析結果より、オゾン水処理は最表面に CuO を形成し、500 回の絶縁破壊後には、この CuO が完全に除去され、純粋な Cu 表面が現れることがわかる。一般には、表面に酸化皮膜が存在することは、絶縁破壊特性の上からは好ましいことではない。しかし、表面には CuO が形成されていることが明確に Characterize できるので、真空中での処理法を開発する方向を考えることができるようになると考えられる。

4.5 コンディショニング後の電極に対する熱処理の影響

これまで示してきたように、500 回繰り返し絶縁破壊により高い絶縁耐力を得ることができるが、その状態にある電極の特性を調べることは、コンディショニングを行わずに高い絶縁破壊特性を得るために必要とされる電極準備法を探す手がかりを得るヒントになるものと考えられる。表面状態については既に述べたので、ここでは、コンディショニング後の電極に対する真空中熱処理の効果について述べる。

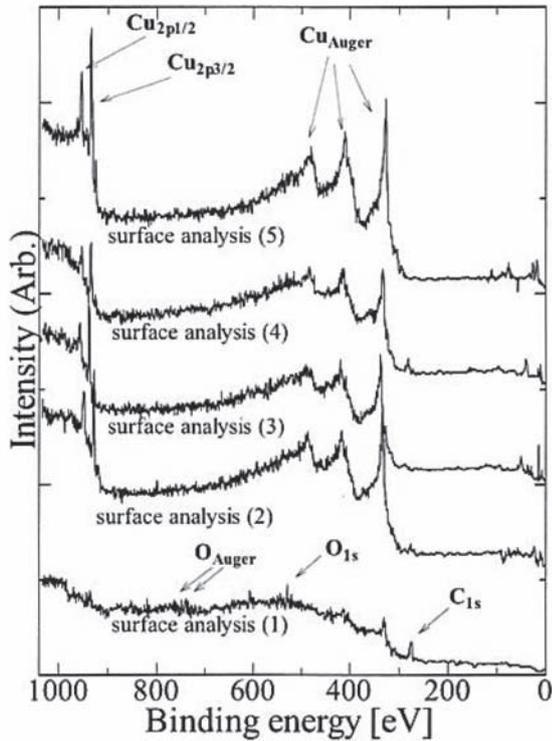
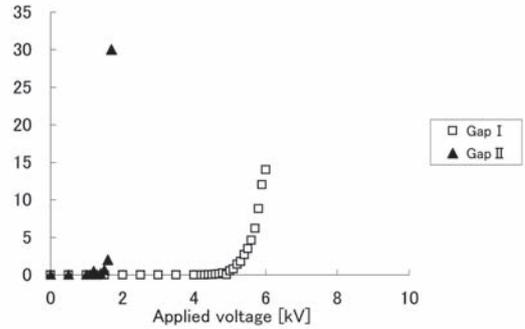


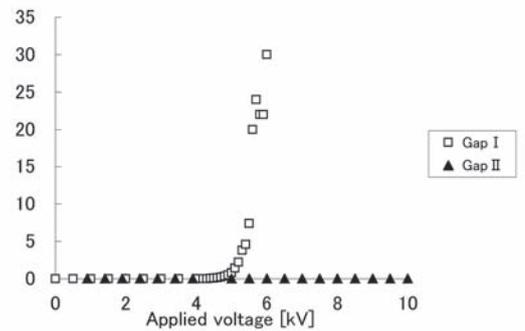
図 14 Gap I 陰極の表面分析結果²³⁾

図 13 にコンディショニング後の電極を真空中で熱処理した後、改めて絶縁破壊特性を調べた結果を示す。2組の試料電極 (Gap I, Gap II) を用意し、一組 (Gap I) の熱処理の温度は 600°C、もう一組 (Gap II) の熱処理温度を 200°C とした。銅の再結晶温度は、以前の実験から 310°C であることが分かっているため、再結晶温度よりも低い温度、および高い温度を選んだものである。500 回コンディショニング後の絶縁破壊電界は、Gap I が 222 MV/m、Gap II が 262 MV/m であった。

この図より、再結晶温度より低い温度での熱処理はコンディショニング後の絶縁破壊特性に影響を及ぼすことはないが、再結晶温度よりも高い温度での熱処理は、コンディショニング効果を消滅させることが分かる。このことから、電極の結晶構造が絶縁破壊特性に大きな影響を及ぼすことが想像されるが、一方で、図 14 に示される Gap I の表面分析結果から、高温での熱処理では C のピークが現れるので (スペクトル (4))、C の存在が絶縁破壊特性に影響を及ぼしていることも考えられる。この図 14 において、(1) のスペクトルは真空容器に導入直後の表面状態を示しており、この状態では電極表面は C や O の化合物で覆われていることがわかる。そして、(2) はその電極を真空中で約 400°C、約 3 時間加熱後の表面状態を示しており、C や O のピークが減少、消滅していることから、必ずしも



(1) Field electron emission characteristics before 500 times repetitive breakdowns



(2) Field electron emission characteristics after vacuum heat treatment to conditioned electrodes

図 15 電界電子放出特性の違い²³⁾

完全ではないが、ある程度清浄化されていることがわかる。スペクトル (3) はその加熱された電極を 500 回繰り返し絶縁破壊させた後の表面状態を示しており、C のピークがさらに減少し、より清浄化されていることが分かる。スペクトル (4) はこの 500 回絶縁破壊試験を行った電極を真空中で約 600°C、約 3 時間加熱後の表面状態を示しており、C のピークが再び現れている。スペクトル (5) はこの電極を再び 500 回絶縁破壊試験を行った後の表面状態を示しており、表面は清浄化されていることが分かる。

このようなコンディショニング後の絶縁破壊耐力と熱処理との関係を調べるために、電界電子放出特性の測定が行われた。

500 回絶縁破壊前とコンディショニング後に熱処理を施した電極の電界電子放出特性の試験結果を図 15 に示す。

この結果から、コンディショニング処理前には、どちらのギャップも電界電子放出が見られるが、コンディショニング後に熱処理を施した場合、Gap I (600°C 加熱) では電子放出が見られるのに対し、Gap II (200°C 加熱) では、電子放出が見られないことが分かる。ギャップ長はいずれも 0.5 mm である。このことから、繰り返し絶縁破壊により電界電子放出特性は影響を受け、さ

らに熱処理によっても大きな影響を受けることが分かる。熱処理の効果に注目すると、再結晶温度以下の熱処理では、電界電子放出が観測されず、このことが高い絶縁破壊耐力を得る原因となっていると考えられる。一方で、再結晶温度以上での熱処理は電界電子放出を生じさせるようになり、これがコンディショニング処理により得られた高い絶縁破壊耐力を低下させる原因になっていることが考えられる。これらの結果は、コンディショニング後の絶縁耐力に対して、電極表面の結晶構造が影響を及ぼしている可能性があることを示唆しているものと考えられる。

5. ま と め

真空中の絶縁破壊現象について、絶縁破壊に導く素過程を説明し、ギャップの絶縁破壊について、現象の解明と絶縁耐力向上のために行われた各種の処理の効果について述べた。さらに、使用している実験装置について、その概略を説明した。

この機会に、真空の絶縁技術に興味を持っていただければ幸いである。

謝辞

本稿で述べた結果は、高エネルギー加速器研究機構の齊藤芳男教授との長年の共同研究によるところが非常に大きい。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 例えば、中野義映編，“大学課程 高電圧工学 第2版” p16, オーム社, 1991
- 2) R.V. Latham ed. : “High Voltage Vacuum Insulation BASIC CONCEPTS AND TECHNOLOGICAL PRACTICE”, Academic Press, London, 1995
- 3) R.V. Latham : “HIGH VOLTAGE VACUUM INSULATION The Physical Basis”, Academic Press, London, 1981
- 4) G.A. Mesyats and D.I. Proskurovsky : “Pulsed Electrical Discharge in Vacuum”, Springer-Verlag, Berlin, 1989
- 5) J.M. Lafferty ed. : “VACUUM ARCS : Theory and Application”, John Wiley & Sons, New York, 1980
- 6) H. Craig Miller : “Electrical Discharges in Vacuum 1877-1979”, IEEE Trans. EI, Vol.25, pp.765-860, 1990
- 7) H. Craig Miller : “Electrical Discharges in Vacuum 1980-1990”, IEEE Trans. EI, Vol.26, pp.949-1043, 1991
- 8) G.A. Farrall : “Electrical Breakdown in Vacuum”, Trans. EI, Vol.20, pp.815-841, 1985
- 9) 電気学会 真空中での放電の利用とその抑制に関する技術調査専門委員会編：“電気学会技術報告 第586号 真空中での放電の利用とその抑制”，電気学会, 1996
- 10) 電気学会 高エネルギー密度化に関わる真空中の放電制御技術調査専門委員会編：“電気学会技術報告 第1001号 高エネルギー密度化に関わる真空中の放電制御技術”，電気学会, 2005
- 11) 城阪俊吉：“エレクトロニクスを中心とした年代別科学技術史 第4版”，p.140, 日刊工業新聞社, 1998
- 12) 橋本靖行：“高純度無酸素銅電極の超高真空中における絶縁破壊特性に関する研究”，平成6年度埼玉大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士論文, 1995
- 13) P.A. Chatterton : “A theoretical study of field emission initiated vacuum breakdown”, Proc. Phys. Soc. Vol.88, pp.231-245, 1966
- 14) L. Cranberg : “The Initiation of Electronic Breakdown in Vacuum”, J. Appl. Phys., Vol.23, pp.518-522, 1952
- 15) 2のp.47.
- 16) S. Kobayashi, Y. Saito, Y. Nagai and Y. Yamamoto : “Vacuum Breakdown Strength of Vacuum-degassed Oxygen-free Copper Electrodes”, IEEE Trans. EI, Vol.28, pp.500-506, 1993
- 17) 小林信一, 齊藤芳男, 永井康睦, 山本佳紀：“超高真空中における無酸素銅電極の絶縁破壊特性”，電学論A, Vol.114-A, pp.91-99, 1994
- 18) S. Kobayashi : “Recent Experiments on Vacuum Breakdown of Oxygen-free Copper Electrodes”, IEEE Trans. DEI, Vol.4, pp.841-847, 1997
- 19) 岩井明信, 大平恵一, 小林信一, 齊藤芳男：“真空中繰り返し絶縁破壊による無酸素銅電極の表面状態および絶縁破壊前駆電流特性の変化”，電学論A, Vol.119-A, pp.197-202, 1999
- 20) K. Ohira, A. Iwai, S. Kobayashi and Y. Saito : “Parameters Influencing Breakdown Characteristics of Vacuum Gaps during Spark Conditioning”, IEEE Trans. DEI, Vol.6, pp.455-459, 1999
- 21) 浅野清光：“508 Mhz 超伝導空洞の電界放出”，平成10年度電気学会全国大会シンポジウム予稿 講演論文集 [1], S.4-1-S.4.4, 1998
- 22) S. Kobayashi, K. Sekikawa, K. Ohira, K. Asano and Y. Saito : “Effect of Ozonized Water Treatment on Electrical Breakdown of Oxygen-free Copper Electrodes of a Vacuum Gap”, Proc. 11th Int. Symp. on High Voltage Engineering, Vol.3, pp.3;337.P4-3:340. P4, 1999
- 23) H. Ozawa, Y. Yamano, S. Kobayashi and Y. Saito : “Influence of vacuum heat treatment on the breakdown characteristic and the field electron emission characteristic of oxygen-free copper electrode after spark conditioning”, Proc. 22nd Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Vol.2, pp.825-828, 2006