

真空不平等電界下における電極ギャップに対する低ダメージコンディショニング法 LOW-DAMAGE CONDITIONING METHODS FOR VACUUM ELECTRODE GAPS UNDER NON-UNIFORM ELECTRIC FIELDS

加藤拓万^{#,1)}, 仲泊明徒¹⁾, 山納康¹⁾
Takuma Kato^{#,1)}, Yasushi Yamano¹⁾, Akito Nakadomari¹⁾
¹⁾ Saitama University

Abstract

In high-voltage equipments such as electron guns and ion sources in accelerators, a vacuum is used to accelerate charged particles. When high voltage or high electric field are applied to the vacuum gap from the initial stage of voltage application, vacuum breakdown events occur due to field electron emission, which may cause damage or stop of operating for the equipment. In case of delicate or complicated vacuum device, a single breakdown may cause fatal damage, so an appropriate conditioning method is required to improve the withstand voltage of the vacuum gap without causing a breakdown event. Therefore, in this study, in order to improve the withstand voltage without discharge, a conditioning method using pulsed high voltage application (wavefront length 60 μs / wave tail length 700 μs) was applied as few times as possible without breakdown events, and the voltage was gradually increased by applying three or 30 times each. In this way, a low-damage conditioning method that avoids surface damage of the electrodes due to breakdown and efficiently improves the withstand voltage was investigated.

1. はじめに

加速器の電子銃やイオン源などの真空高電圧機器において、荷電粒子の加速のために真空が用いられる。しかし真空ギャップに電圧印加の初期段階から高い電圧や電界を印加した場合に、異物や電界電子放出に起因する真空絶縁破壊現象が発生することがあり、機器の破損や停止を引き起こす恐れがある。繊細な真空機器によっては、1回の絶縁破壊が致命的な損傷を引き起こす場合があるため、絶縁破壊を発生させずに真空ギャップの耐電圧を向上させることが求められる。

一般的に耐電圧を向上させる手法としてコンディショニング法が用いられる。コンディショニング法にはスパークコンディショニングや電流コンディショニング等いくつかの手法があり、数百回以上の絶縁破壊や長時間の電圧印加が必要であるという問題点がある[1]。そこで本研究では無放電で耐電圧を向上させるために数百マイクロ秒の高電圧パルス可能な限り絶縁破壊させないようにして、3回ずつまたは30回ずつ印加させ、徐々に電圧を上げる方法を用いた。これにより、絶縁破壊による電極の金属蒸着や損傷を避け、かつ効率よく耐電圧を向上させる低ダメージコンディショニング法について調査した。

2. 実験方法

2.1 実験装置

本研究で用いた in-situ 実験装置を Fig. 1 に示す。試料導入真空容器、表面処理真空容器、熱処理真空容器、表面分析真空容器、絶縁破壊試験真空容器の6つの真空容器から構成されている。試料導入真空容器以外の真空容器は、常に 10^{-7} Pa から 10^{-8} Pa 台の超高真空に保たれている。

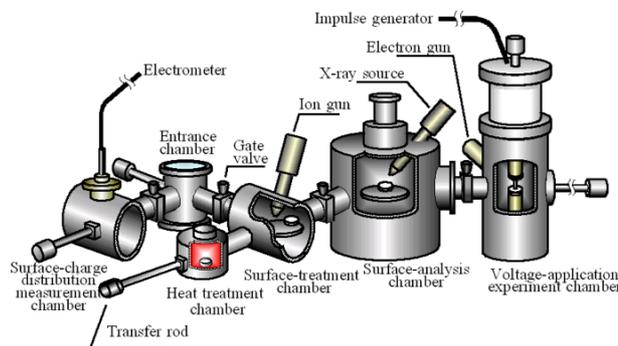


Figure 1: In-situ experimental setup.

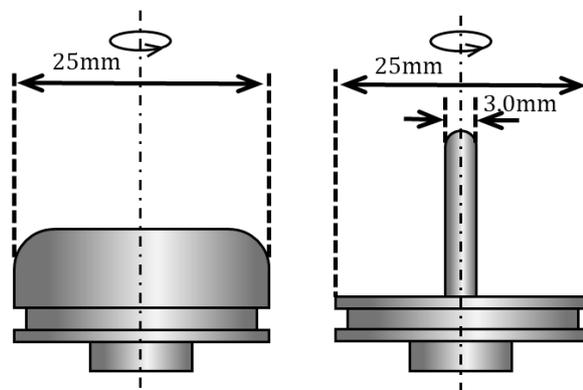


Figure 2: Sample electrode.

2.2 実験試料

Figure 2 に実験で用いた試料を示す。陽極は SUS 製の平板電極を、陰極は SUS 製の先端が丸い針電極を SUS 製のホルダーに固定したものを使用した。ギャップ長を 2.5 mm に設定し、試験を行った。

[#] t.kato.285@ms.saitama-u.ac.jp

2.3 実験方法

試料を真空中で高電圧を印加できる絶縁試験容器に導入し、初回印加電圧を 20 kV として、負極性インパルス電圧を 2 kV ステップの昇降法で印加した。同じ電圧値を 3 回連続で印加できたら昇圧し、絶縁破壊が起こったら降圧とし、印加電圧が 80 kV に達した場合、または 50 回同じ電圧値で放電した時点で実験を終了とした。比較実験として、電圧印加回数を 30 回に増やし、同様に実験を行った。絶縁性能の評価として電圧印加前、20 kV、40 kV、80 kV 時に微小電流測定を行った。微小電流が 10 nA 流れた時点、または直流電圧がコンディショニング電圧に達した時点で実験を終了とした。

3. 実験結果

3.1 低ダメージコンディショニング履歴

Figure 3 に電圧印加回数を 3 回とした時の低ダメージコンディショニングの過程を示す。インパルス電圧 80 kV 印加するまでに生じた絶縁破壊回数は 1 回であり、電極の損傷を極力防ぎつつ、耐電圧を向上させることができた。

また、Fig. 4 に電圧印加回数を 30 回とした時の低ダメージコンディショニングの過程を示す。インパルス電圧 80 kV 印加するまでに生じた絶縁破壊回数は 0 回であり、絶縁破壊に伴う電極の損傷を抑制できた。

3.2 微小電流測定比較

微小電流測定の結果を Fig. 5 に示す。電圧印加 3 回ではインパルス電圧 20 kV を印加したのみでは微小電流の低減が見られなかったのに対し、電圧印加 30 回ではインパルス電圧 20 kV を印加したのみでも微小電流の低減が見られ、同じ電圧値であってもパルス電圧の印加回数が多いほどコンディショニング効果が現れることが確認できた。電圧印加 30 回において、インパルス電圧 80 kV 後の微小電流測定結果の悪化は、インパルス電圧 40 kV 後の微小電流測定時に起こった絶縁破壊によるデコンディショニングが原因と考えられる。

3.3 F-N プロット

Figure 6 に微小電流測定結果をもとに電圧電流波形から横軸を $1/E$ 、縦軸を $\ln(I/E^2)$ としてプロットした FN プロットを示す。Figure 6 から、コンディショニングが進展するにつれ、高電界中において低電流が流れるようになっていくことが確認できる。F-Nプロットから算出できる電界増倍係数は、コンディショニング前後において、電圧印加 3 回においては 414(試験前)から 215(80 kV 印加後)、電圧印加 30 回においては 127(試験前)から 68(40 kV 印加後)と減少していること事を確認できた。

4. 考察

真空中の絶縁破壊は電極表面の影響を大きく受けることが知られており[2]、Fig. 3 と Fig. 4 より電圧印加のみで耐電圧の向上が、Fig. 5 より微小電流の低減が起こっていることから、電圧印加のみで電極の表面状態に変化が起こっていると考えられる。このことは、Fig. 6 から算出できる電界増倍係数がコンディショニングの進展に合わせ減少していることから確認できる。一般的に用いられ

るスパークコンディショニングや電流コンディショニングにおける耐電圧向上のメカニズムは、絶縁破壊による電極上の微小突起の溶融や脱離ガス中のイオンによるスパッタリングによる微小突起の除去であることが知られている[1, 3]。今回のパルス高電圧を印加するだけのコンディショニング法では、印加電圧がパルス化されているために、直流や交流のような時間的に連続的な電圧波形ではなく、短時間に高電圧を印加できる。そのため、瞬間的に直流や交流よりも高い電圧を絶縁破壊させることなく印加できる。短時間の高電圧印加の間で電界電子放出によるイオンの生成が起こり、イオンによるスパッタリングが電極表面で行われ、耐電圧が向上したと考えられる。

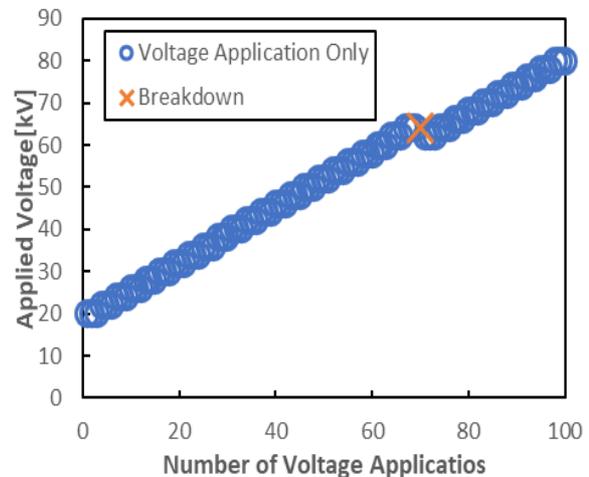


Figure 3: Conditioning history of vacuum gap in case of 3 times pulsed voltage application.

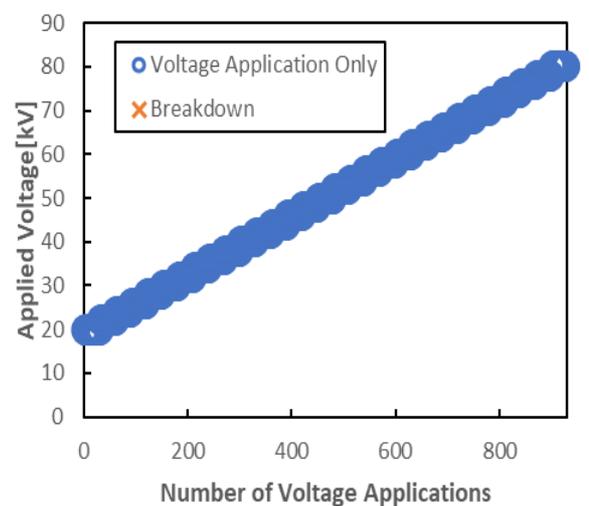


Figure 4: Conditioning history of vacuum gap in case of 30 times pulsed voltage application.

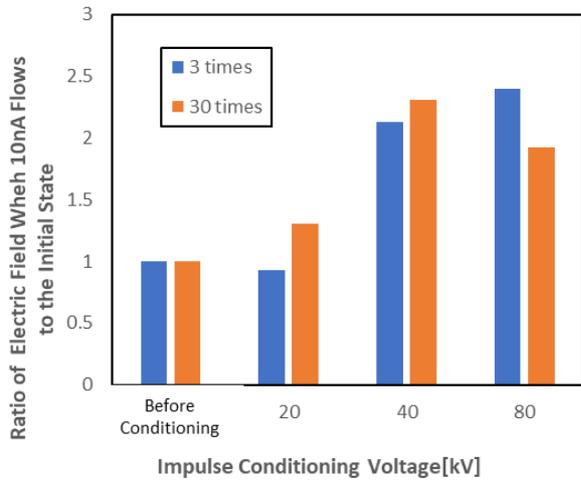
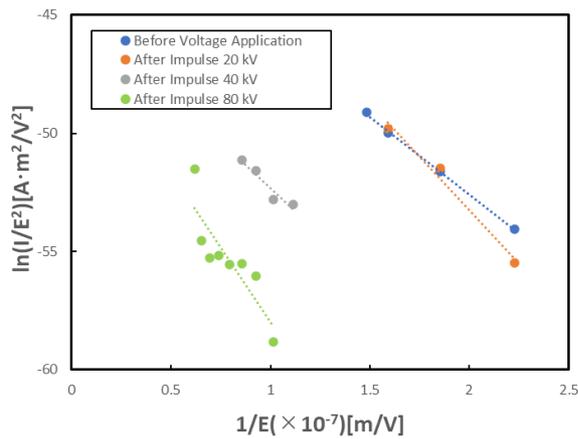
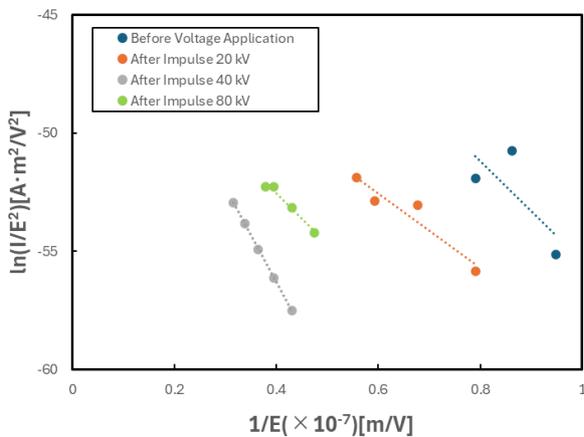


Figure 5: Microcurrent measurement results.



(a) 3 times pulsed voltage application



(b) 30 times pulsed voltage application

Figure 6: F-N plots.

5. 結論

本研究では、数百マイクロ時間の高電圧を可能な限り絶縁破壊させずに印加させる低ダメージコンディショニング法について、絶縁耐電圧や微小電流の観点から調査した。その結果、電圧印加のみで絶縁破壊を起こさなくとも絶縁耐電圧を向上させ、微小電流を低減することを確認できた。電圧印加の回数を変化させることでコンディショニング効果の現れ方にも変化があり、同じ電圧でも印加回数を多く印加するとコンディショニング効果が早く、そして顕著に現れることが確認できた。

参考文献

- [1] 電気学会放電ハンドブック出版委員会編:「放電ハンドブック 上巻」電気学会, pp. 302-310 (1998).
- [2] Y. Yamano, K. Akashi, S. Kobayashi and Y. Saito, “Vacuum breakdown characteristics for stainless steel electrode and influence of contamination degree of the electrode surface on the breakdown characteristics”, 2011 1st International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology, Xi'an, China, pp. 90-93 (2011).
- [3] M. Borghei, R. Langtry, R. McMullen, B. Riordan, D. Velazquez and G. Latchford, “Impact of Direct Current Conditioning on Cathode Dark Current in High Vacuum” Proc. of 30th ISDEIV, pp. 74-77 (2023).