

グラファイト付着した汚損電極の真空中耐電圧に対するドライアイス洗浄効果

EFFECT OF DRY ICE CLEANING ON VACUUM BREAKDOWN VOLTAGE FOR GRAPHITE ADHERED ELECTRODE

渡邊拓人^{#, A)}, 仲泊明徒^{A)}, 山納康^{A), B)}, 照井真司^{C)}, 石橋拓弥^{C)}, 山本将博^{C)}

Takuto Watanabe^{#, A)}, Akito Nakadomari^{A)}, Yasushi Yamano^{A), B)},

Shinji Terui^{C)}, Takuya Ishibashi^{C)}, Masahiro Yamamoto^{C)}

^{A)} Saitama University

^{B)} University of Tsukuba

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

We investigated the effect of dry ice cleaning on vacuum breakdown voltage by conducting repeated breakdown tests on four sets of sample electrodes: electrode coated with graphite, electrode processed by dry ice cleaning for graphite coated one, electrode with only dry ice cleaning, and electrodes without either coating or cleaning. The electrodes processed by dry ice cleaning for graphite coated one showed the same level of breakdown electric field as the electrodes with one either coating or cleaning, after spark conditioning process. In other words, dry ice cleaning is an appropriate method for the improvement of the vacuum breakdown voltage of the graphite adhered electrode. Therefore, dry ice cleaning is considered to be an effective method of cleaning contaminated electrodes.

1. はじめに

近年、高エネルギー・大電流を用いる加速器用真空容器や、核融合炉用イオンビーム入射装置などの真空絶縁を必要とする装置では、これまで以上に過酷な運転条件下での使用が求められている。特に、高エネルギーでの素粒子実験においては、コストを抑えつつ高い加速効率を実現するため、数百キロワット級以上の大電力マイクロ波を超高真空状態の加速空洞に投入し、短距離での粒子加速を達成することが必要とされる。しかし、大電力投入に伴い、加速空洞内部では真空絶縁破壊 (Vacuum Breakdown) が発生し、粒子加速が不可能となる深刻な問題が生じる。さらに、一度放電が発生すると、その頻度は徐々に増加し、最終的には装置の交換を余儀なくされる場合もある。このように、真空中での放電抑制は加速器の安定運転を左右する重要な課題であり、放電が起こりにくい材料選定や表面処理技術に関する研究が、これまで国内外で精力的に進められてきた。

近年の研究では、真空中での放電の際にチャンパー内部に炭素汚染層が形成されることが報告されており、この炭素層が表面の電界保持性能を著しく低下させる要因となる可能性がある[1]と推測されている。また、LCLS II 空洞を対象とした研究では、炭化水素系汚染をプラズマ処理により効果的に除去することで、電界電子放出の抑制や絶縁能力の向上が確認されている[2]。これらの知見は、高電界が印加されるチャンパー内部では、炭素汚染への対応が不可欠であることを示唆している。製造時の表面処理や材料選定による放電対策も行われているが、加速器運転中の放電現象をなくすことはできない。加速器運転中に放電が頻発するようになった際には、装置の交換や、装置を大気開放しての洗浄など、運転の長期中断を伴う大掛かりな対処が必要となる。

Brinkman 氏らの研究[3, 4]では RF-Gun にドライアイス洗浄を適用することで、有害な暗電流の発生を低減できるか調査している。実験結果からドライアイス洗浄によって暗電流の発生が従来の 10 分の 1 ほどに抑制できることが示されている。また南之園氏の研究[5]では、電極の保管期間を 4 パターン、保管方法を 3 パターンに分けて保管環境の変化が真空中における絶縁破壊特性に与える影響について調査している。保管条件が悪い場合に電極表面には炭素付着が増加しており、それに伴って耐電圧が低下していることが示されている。この様に汚損された電極表面に対しては、汚損物質を取り除く必要があるが、可能な限り簡易的な方法が望まれる。そこで本研究では汚損を模擬した電極にドライアイス洗浄を適用することで真空中の耐電圧にどのような影響が生じるかを、繰り返し絶縁破壊試験によって調査することを目的としている。また一定の絶縁破壊回数時に微小電流の測定も行った。

2. 実験装置

2.1 実験装置

本研究では、真空中において電界電子放出電流特性の測定及び繰り返し絶縁破壊試験を行うことができる装置を使用した。Figure 1 に In-situ 実験装置の構造を示す。実験の際に大気開放するのは導入用真空容器のみであり、絶縁破壊試験を行う真空容器はスパッタイオンポンプおよびチタンサブリーメーションポンプにより常に 10^{-7} Pa から 10^{-8} Pa 台の超高真空に保たれている。

2.2 試料電極

本研究では無酸素銅電極を使用した。Figure 2 に電極の形状を示す。この電極に対して、グラファイトコーティング (膜厚 200 nm 程度) のみを行ったもの、ドライアイス洗浄 (圧力 0.4 MPa、ペレット直径 0.3 mm 以下) のみ

[#] watanabe.t.188@ms.saitama-u.ac.jp

を行ったもの、グラファイトコーティングを施した上からドライアイス洗浄を行ったもの、どちらも行わなかったもの、これら計 4 組の電極を用意して、それぞれについて実験を行った。Figure 3 にはグラファイトコーティング後とドライアイス洗浄後の電極表面の様子を示す。電極を大気に触れさせると、電極表面に汚染物付着や酸化が進むため、試験を行うまでの期間、研究室においてはデシケーター内部を窒素で満たした状態で保管した。

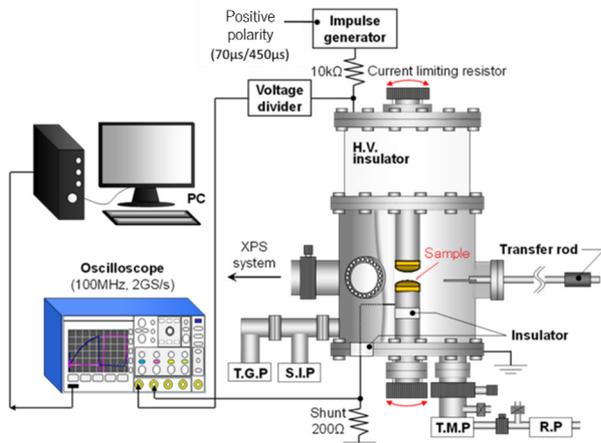


Figure 1: Vacuum vessel for breakdown test.

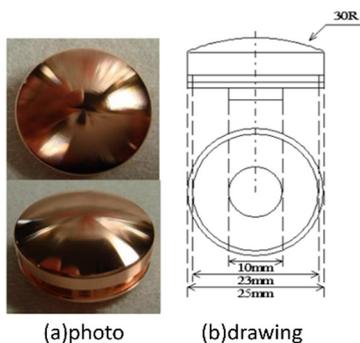


Figure 2: Shape of electrode.



(a) Graphite coated electrode (b) After dry ice cleaning

Figure 3: Photo of sample electrode.

3. 実験方法

3.1 繰り返し絶縁破壊試験

繰り返し絶縁破壊試験では、初期ギャップ長を 5 mm に設定し、インパルス電圧を波高値 60~80 kV の範囲で印加した。80 kV まで電圧を上げても絶縁破壊が起きなくなった時は、ギャップ長を 80%縮めて再びインパルス電圧の印加を行った。評価については絶縁破壊電界を求めることによって行った。

3.2 微小電流測定

微小電流測定では、直流高電圧を 2 kV から印加し、2 分間に 2 kV ずつ上昇させて最大 20 kV まで印加した。ギャップ長を 0.5 mm に設定し、得られた電流電圧波形から微小電流を算出して比較検討を行った。

4. 実験結果及び検討・考察

4.1 繰り返し絶縁破壊試験

繰り返し絶縁破壊試験の結果を Fig. 4 に示す。グラファイトコーティングのみの電極は耐電圧が低いままであり、コンディショニング効果は見られなかった。それ以外の 3 種類の電極ではコンディショニング効果が見られ、どれも飽和後平均絶縁破壊電界は 250 MV/m 程度となった。中でもドライアイス洗浄を施した 2 種の電極の方が高い値を示しており、良い結果であると言える。またコンディショニング速度は、コーティング・洗浄ともに施さない電極、ドライアイス洗浄のみの電極、グラファイトコーティングした上でドライアイス洗浄を施した電極の順で速く、真空中の電極ギャップ間耐電圧が電極の表面状態に起因することから、ドライアイス洗浄を施しても電極表面には付着物が残存していることが示唆される。しかし、飽和後の耐電圧は高く、グラファイトによる汚損後の電極の耐電圧も同等まで改善したため、ドライアイス洗浄は効果的な洗浄法であると考えられる。

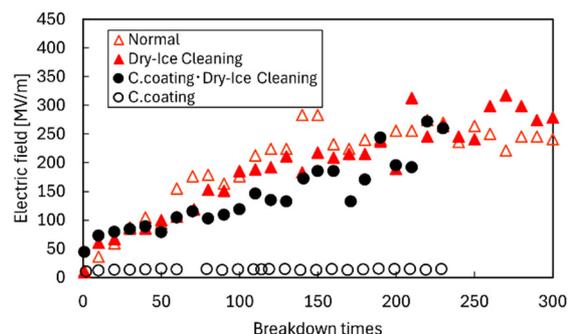


Figure 4: Repeated breakdown tests. (C.coating refers to graphite adhered electrode.)

4.2 微小電流測定

各電極について、絶縁破壊 200 回後の微小電流測定を行った結果を Fig. 5 に示す。グラファイトコーティングのみの電極では非常に電流が流れていることが分かる。ド

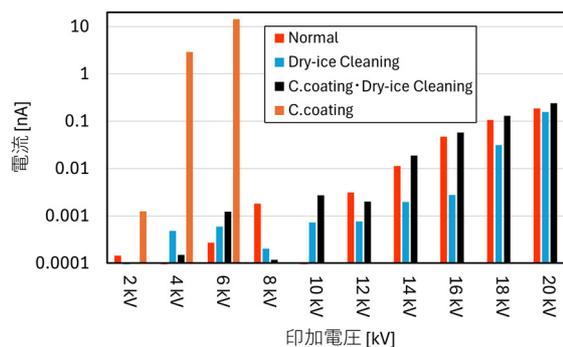


Figure 5: Micro current measurement.

ドライアイス洗浄を適用したことによって、微小電流の発生はコーティング・洗浄ともに施さない電極と同等まで低減させていることが確認でき、さらにドライアイス洗浄のみ行った電極については、コーティング・洗浄ともに施さない電極よりも微小電流の低減効果が高い結果となった。ドライアイス洗浄の適用による微小電流低減効果が現れたと考えられる。

5. まとめ

グラファイトコーティング・ドライアイス洗浄を施した場合とそうでない場合について絶縁破壊電圧と微小電流を測定した。その結果、グラファイト付着した電極もドライアイス洗浄を適用することで、汚損なしの電極と同等の耐電圧まで改善することができた。さらに微小電流についても低減効果が確認できた。以上よりドライアイス洗浄は効果的な洗浄方法であると考えられる。しかし、コンデショニング速度など、耐電圧には未だ改善の余地があると考えられるため、さらなる向上策を練る必要がある。

謝辞

KEK-PK で銅電極表面上へのグラファイトコーティン

グにおいてご協力を賜りました松岡亜衣氏、仁谷浩明氏、豊島章雄氏に深く感謝いたします。

またドライアイス洗浄の実施においてご協力を賜りました株式会社協同インターナショナルの今泉信治氏、志賀直樹氏に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] C. Serafim *et al.*, “Plasma treated metals after H⁻ irradiation and its effect on vacuum breakdown behavior”, arXiv preprint arXiv:2503.17360, 2025.
- [2] B. Giaccone *et al.*, “Field emission mitigation studies in LCLS II cavities via in situ plasma processing”, *Physical review accelerators and beams* 24.2, 2021.
- [3] A. Brinkman, D. Reschke, J. Ziegler, “Various Applications of Dry-Ice Cleaning in the Field of Accelerator Components at DESY”, *Proc. of LINAC2008*, Victoria, BC, Canada, 2008.
- [4] A. Brinkman, J. Ziegler, “Dry-Ice Cleaning of RF-Structures at DESY”, *Proc. of LINAC2016*, East Lansing, MI, USA, 2016, pp.52-55.
- [5] K. Minaminosono, Y. Yamano, S. Kobayashi, “Vacuum Breakdown Characteristics of Oxygen-Free Copper Electrodes with Different Keeping Methods and Terms”, *Proc. of XXIIIrd ISDEIV*, pp.227-230, 2008.