

イオンポンプおよび冷陰極真空計用高電圧導入端子の高湿度下での促進試験 ACCELERATED TESTING OF HIGH VOLTAGE FEEDTHROUGHS FOR ION PUMPS AND COLD-CATHODE GAUGES UNDER HIGH HUMIDITY CONDITION

末次祐介^{#, A)}, 柴田恭^{A, B)}, 石橋拓弥^{A, B)}, 白井満^{A)}, 照井真司^{A)}, Yao Mu Lee^{A)}
Yusuke Suetsugu^{#, A)}, Kyo Shibata^{A, B)}, Takuya Ishibashi^{A, B)}, Mitsuru Shirai^{A)}, Shinji Terui^{A)}, Yao Mu Lee^{A)}

^{A)} KEK

^{B)} SOKENDAI

Abstract

In the SuperKEKB accelerator, sputter ion pumps (SIPs) and cold cathode gauges (CCGs) are used as main vacuum pumps and vacuum gauges, respectively. These components are extensively used in large-scale vacuum systems due to their high reliability. Typically, ion pumps receive 5-7 kV to the Penning cells inside the vessel, while CCGs receive 1-3 kV to an inverted magnetron-type cell, through high-voltage feedthroughs. Under suboptimal conditions, such as high humidity (low dew point) commonly found in environments like underground tunnels, these high-voltage feedthroughs are prone to abnormal discharge due to creeping discharge and corrosion at the insulator brazing sections, potentially leading to insulation breakdown or structural damage. To address these issues, we have conducted accelerated testing in a laboratory setting, wherein commercially available and commonly used high-voltage feedthroughs (connectors) in SIPs and CCGs are subjected to prolonged high-voltage application in high-humidity environments, aiming to investigate their high-voltage characteristics and durability under such conditions.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)の SuperKEKB 加速器では、真空排気ポンプとしてスパッタイオンポンプ(Sputter Ion Pump, SIP)、真空計として冷陰極真空計(Cold Cathode Gauge, CCG)が使用されている[1, 2]。SIPは、動作中振動が無く、信頼性の高い超高真空用真空ポンプとして、粒子加速器など大型真空システムに限らず広く用いられている[3, 4]。通常、高電圧導入端子を通してポンプ容器内部のペニングセルに 5~7 kV の高電圧を印加し動作させている。また、CCG は、比較的安価で、簡単な構造を持つため故障し難い真空計で、これも様々な真空システムで使用されている。CCG の逆マグネトロン型ペニングセルには、通常 1~3 kV の高電圧が印可される。

これら SIP や CCG の高電圧導入端子部では、装置が設置されている場所(例えば地下トンネル内)が高湿度(低露点)等通常より悪い環境の場合、碍子の沿面放電による異常放電や碍子ろう付け部の腐食が起きやすく、場合によっては絶縁破壊や端子の損傷に至る可能性がある[5-7]。SuperKEKB でも例外ではなく、トンネル内温度や冷却水温度が変化した時などに、導入端子部の過熱や焼損、リークがたびたび発生している。そこで、SIP や CCG で現状よく使用されている高電圧導入端子や、市販の高電圧導入端子(コネクタ)について、高湿度下で長時間高電圧を印可し続ける促進試験を行い、それらの高電圧特性や耐性を調べている。ここでは、2023 年 11 月から 2024 年 7 月までの試験結果を報告する。

2. 試験用高電圧導入端子

試験に用いた高電圧導入端子の種類(本報告での識

[#] yusuke.suetsugu@kek.jp

別記号)とその概要、印加電圧等を Table 1 に示す。大気側接続ケーブルは RG-58A/U(SHV-10k 型)、RG-59/U(SHV 型)、あるいは RG-59B/U(その他)である。ケーブルの絶縁体はポリエチレンである。

Figure 1 に各端子の外観等を、また、Fig. 2 には各端子をケーブルと接続した際の断面模式図を示す。また、図中には中心導体から外導体までの沿面距離(点線の距離)も記入している。図のスケールは図中に矢印で示しているが、径方向(図では縦方向)は 2 倍している。構造的には、A 型、A_CD 型、A_C 型、B 型および B_H 型の碍子タイプは、中心導体と外導体との絶縁を碍子沿面と空間(大気)で維持している。一方、C 型、SHV 型、SHV-10kV 型、MHV 型では、2~3 層にかみ合った薄いポリエチレン円筒やセラミックス円筒、およびそれらの沿面で狭い空間ながら絶縁を保っている。

Figure 3 は、各電圧端子の中心導体に 5000 V 印加した時の電圧の等高線を描いている。これらの図でも、径方向(図では縦方向)のスケールは 2 倍している。

3. 試験装置

試験装置の外観を Fig. 4 に示す。真空容器は内径 100 mm、長さ約 1.5 m のアルミ合金製円筒で、側面の ICF70 フランジのポート 7 個に 7 種類の高電圧導入端子を同時に取付けることができる。高電圧導入端子によっては ICF70-ICF34 変換フランジを介した。真空容器は、ターボ分子ポンプ(大阪真空, TG380EM, 0.3 m³s⁻¹)とスクロールポンプ(ANEST IWATA, Scroll Meister, 0.25 m³min⁻¹)で排気した。ターボポンプ上部の真空計(MKS Series 979B)で圧力を測定した。ベーキングは行っていないが数日間排気すると圧力は 10⁻⁷ Pa まで下がる。

導入端子を取り付けた真空容器部分には、幅 60 cm、高さ 80 cm、長さ 110 cm の枠(ケージ)を被せ、その全体をビニールシートで覆い外気と隔離した。ビニールシート

Table 1: Types of HV Feedthroughs used for our test and their applied voltages.

識別記号	印加電圧	端子の概要
A 型	5 kV	市販のイオンポンプで使用されている碍子タイプ導入端子。碍子部は内径約 30 mm の金属製外筒でカバーされている(ねじ込み)。外筒の内側面にはセラミックス円筒が挿入されている。
A_CD 型	5 kV	上記 A 型の外筒の外側に内径約 40 mm のアクリル製円筒をかぶせ、隙間に乾燥剤を入れて熱収縮チューブとシールテープで密封している。密封は湿度 40% の雰囲気中で行った。
A_C 型	5 kV	上記 A_CD 型と同じ構造だが、アクリル製円筒内に乾燥剤が無い。
B 型	5 kV	市販の碍子タイプの導入端子(10kV 用)の外側を内径 54 mm のアルミ製円筒でカバーしている。端に蓋をねじ止めし、その中心にケーブルを固定している。
B_H 型	5kV	上記 B 型のアルミ製円筒側面に通気のため $\phi 10$ mm の穴を 16 個空けている。
C 型	5 kV	市販のイオンポンプ等で使用されるコネクタタイプ導入端子。
SHV 型	3, 5 kV	SHV コネクタタイプ導入端子。
SHV-10kV 型	5 kV	SHV-10kV 型コネクタタイプ導入端子。
MHV 型	3 kV	MHV コネクタタイプ導入端子。

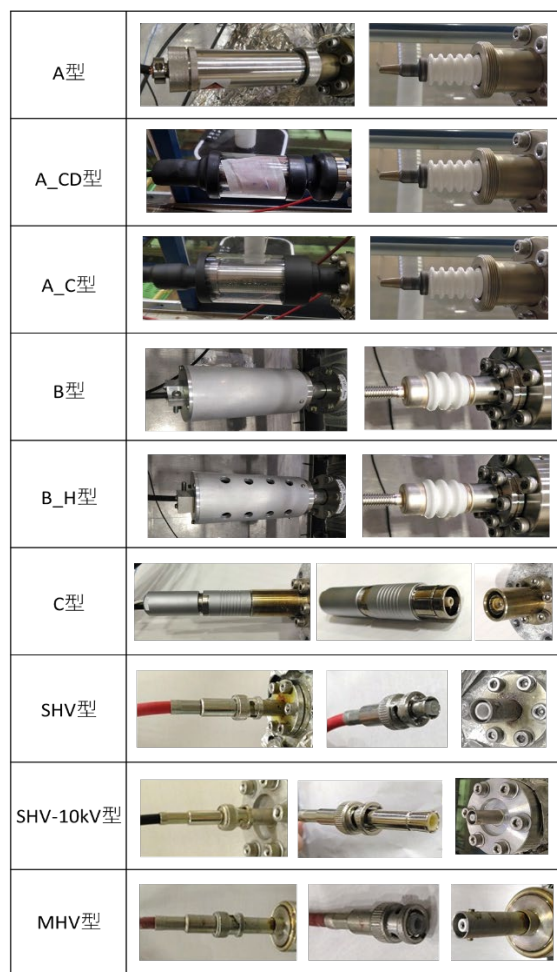


Figure 1: Symbols and outlooks of HV-feedthroughs for our tests.

はマジックテープで固定した。床はステンレス板である。
 ケージ内部の湿度は、業務用加湿器(レッドスパイス、RS-E1527)を使って、常時 80%以上に維持された。ケージ内温度は、実験室の温度の影響を受け 15~25 度であった。さらに、真空チェンバー側に結露しやすいように、

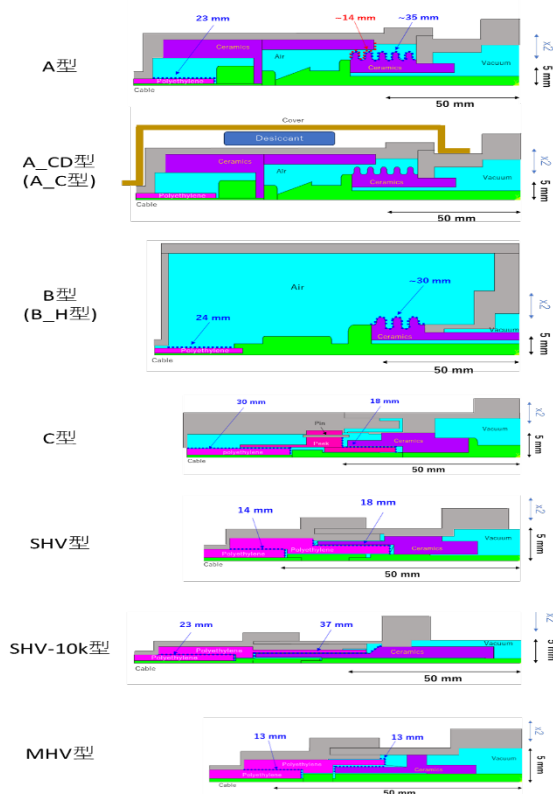


Figure 2: Cross sections of HV-feedthroughs for test, where the scale of radial direction (vertical direction) was doubled. The dotted lines and figures indicate surface distance between central (green) and outer (gray) conductors. Purple and pink materials represent ceramics ($\epsilon_r = 9.0$) and polyaniline ($\epsilon_r = 4.0$), respectively. Radial scale is doubled.

小型チラー(BAOSHISHAN, 水槽クーラー AL-160)を用いて、真空チェンバーの温度を雰囲気より約 3 度低く保った。真空チェンバーは保温のためアルミ фольドで覆っている。また、ケージの中にシロッコファン($\phi 100$ mm)を置き、内部の大気を循環させた。

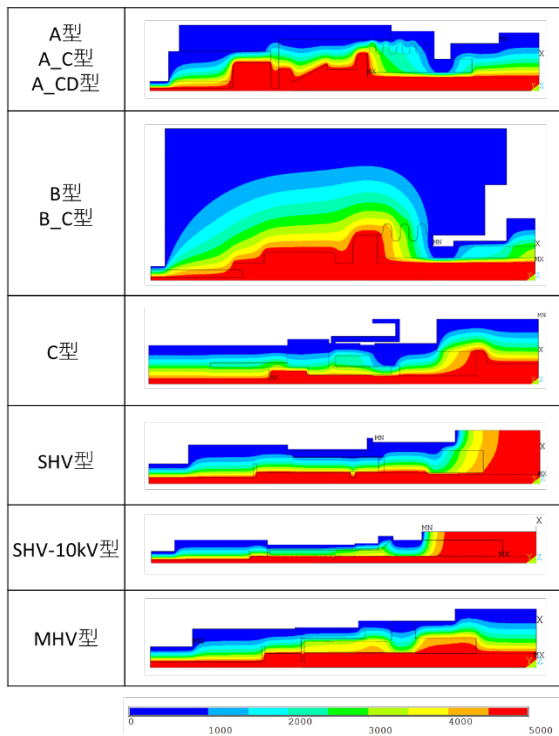


Figure 3: Electric potentials between central and outer conductors, where a voltage of 5 kV was applied to the central conductors for each feedthrough. Radial scale is doubled.

各高電圧導入端子には、イオンポンプ電源(Agilent Technology, 4U HV Ion Pump Controller)から電圧(+3 kVまたは+5 kV)を印可した。電源の放電電流(あるいは相当圧力)、真空チェンバー内圧力、ケージ内外の温度、湿度をリモート(Ethernet + Raspberry Pi)およびローカル(Graphtec midi logger GL820)で常時監視、記録した。

4. 結果

促進試験は2023年11月17日から開始した。初期の

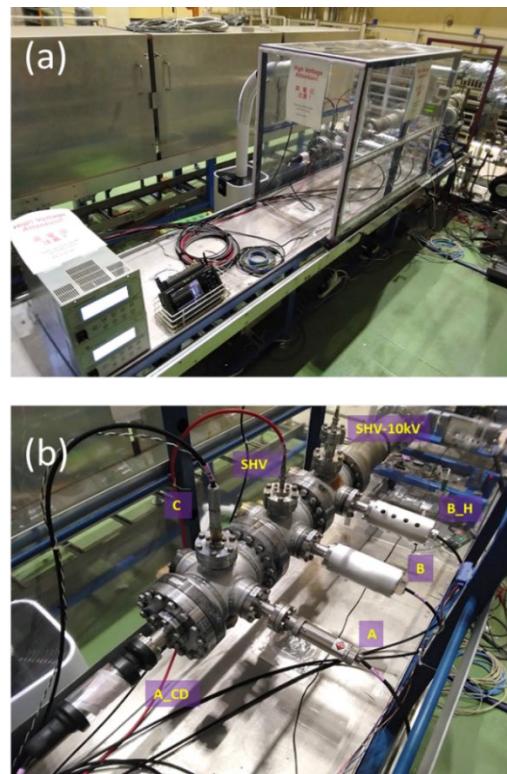


Figure 4: Test stand for accelerated test, where (a) whole view and (b) feedthroughs attached to test chamber.

段階でケージ内大気を循環するファンの導入、真空容器を冷やす水冷チラーの導入等を行った。絶縁破壊に至り規定の電圧が印可できなくなったものは、取り外したり、別の導入端子に交換したりした。Figure 5に、測定結果の一例として、2024年1月15日から1ヵ月間の各端子の放電電流(換算圧力[Pa]、放電電流[A]とほぼ同じ値になる)、ケージ内外の温度、湿度、真空チェンバー圧力の履歴を示している。この図ではC型の導入端子の放電電流が2月12日に 1×10^{-4} Pa以上に達し、印可可能電圧が400 V程度に下がり、絶縁破壊している。

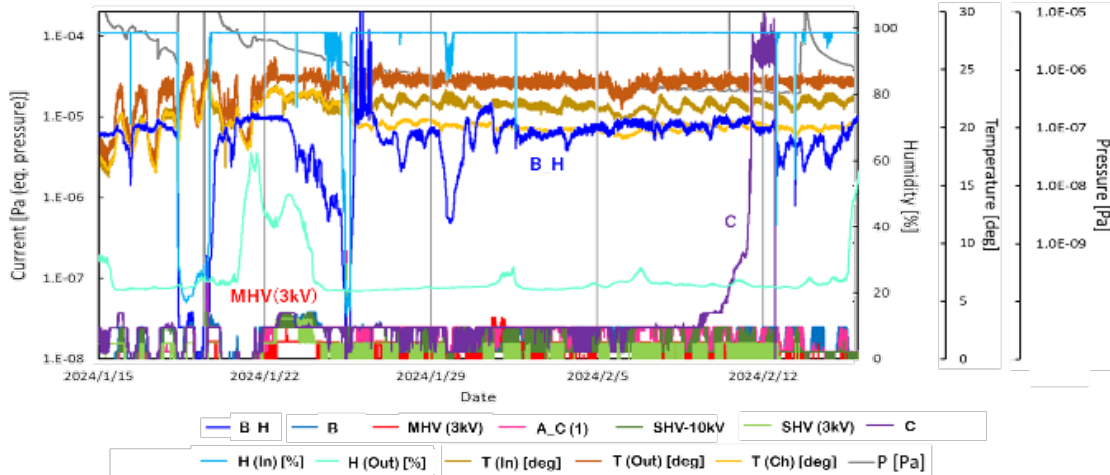


Figure 5: Histories of discharge currents (A_C, B_H, B, SHV, SHV-10kV, C), temperatures and humidities of inside air, outside air, vacuum chamber (In, Out, Cha), and pressure of test chamber from 15 February to 15 March, 2024.

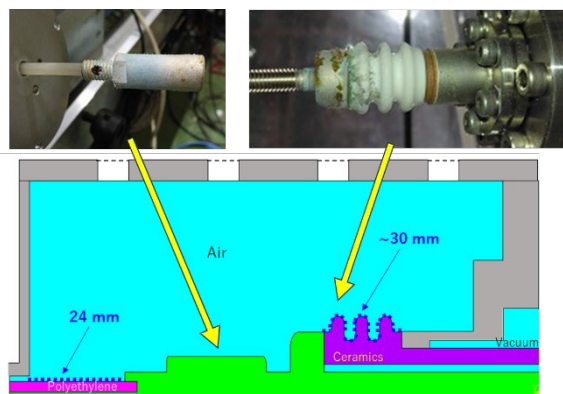


Figure 9: Color changes and corrosion on ceramic insulator and on cable connection piece of B_H-type.

の距離が十分大きく (Fig. 2)、十分な絶縁距離が保たれるためと考えられる。内部の碍子表面はきれいなままである。一方、B_H型では外筒の複数の穴から高湿度の大気が容易に侵入するため、碍子表面の沿面放電が起きやすく、大きな放電電流 (10^{-5} Pa 台) が長期間 (233 日間) 継続的に流れている (Table 2)。実際、碍子表面には端子先端側に変色が見られている (Fig. 9)。ただ、フランジ側 (根本側) はまでは変色しておらず、絶縁破壊には至っていない。これもアルミ外筒と碍子との距離が大きいためと考えられる。外部の湿度が高い場合には通気孔は逆効果のようである。

4.2 3 kV 印加した端子

SHV型は、3 kV 印加でも放電電流がゆっくり上昇していたが、195 日目で絶縁破壊した。絶縁破壊場所は、5 kV 印可時と同様、ケーブル側コネクタ内部 (中心導体ピン接続部) であった。ただし、Fig. 6 に見られるほど激しい損傷ではなかった。一方、MHV型の方は、いまのところ放電電流は小さい。MHV型は仕様上耐電圧が低いので 3 kV でのみ試験を行っている。両者で大気側のケーブルの沿面距離には大きな差がなく、この放電電流の差の原因はよくわからない。1 個目の MHV 型試験が 102 日経った時点で、ケーブル接続部のシース金具に少し隙間を開け、湿気が入りやすくなったが、その後も大きな変化はなかった (59 日間)。その後さらに隙間を大きくしたところ、14 日目から若干放電電流が増加している。大気側ケーブルの接続状況に依存するようである。

5. まとめ

SIP や CCG などに用いられている高電圧導入端子や市販の高電圧導入端子について、高湿度環境下での促進試験を行っている。高湿度下では、空間の絶縁破壊よりも沿面での絶縁破壊が遥かに生じやすく、大気側の沿面距離が短い導入端子で早い時期に絶縁破壊が見られた。A 型の導入端子は、外導体が碍子に近く、碍子に沿った沿面距離は長い、結露した場合には碍子沿面の途中で外導体 (外筒) との絶縁破壊が起きやすいようだ。A 型は SuperKEKB のトンネル内で使用しているが、

この損傷の様子は実際に現場で絶縁破壊時に確認されたものと同じであった。既存の外導体の外側に密閉できるカバーを取り付けることで、高湿度環境下でも長期間安定に使用できている (A_C 型、A_CD 型)。試験では最終的に絶縁破壊したが、実際には本試験ほど厳しい環境ではないので実際上は問題ないと期待できる。市販の碍子を用いた B 型では問題なかったが、通気性を持たせた B_H 型では沿面放電による高い放電電流が持続的に流れている。ただ、A 型に比べると外筒が大きいため空間の隙間が大きく、また電界も弱くなるため、大きな絶縁破壊にはいたらないようだ。長期的には B 型の方が A 型より安定しており、A 型の代用として使えそうである。SHV 型は 5 kV 印加するとケーブルとの接続部分で比較的短時間で絶縁破壊した。3 kV では放電電流は流れるが 5 kV 印可時に比べると長時間絶縁破壊には至らなかった。SHV-10kV、MHV(3kV) は今のところ大きな問題はない。MHV 型は SuperKEKB トンネル内では CCG 用に 3 kV を印可して使用しており、ほとんど問題は生じていないが、時折放電電流がトンネル内湿度や温度に呼応して増えることが確認されていて、ケーブル側のコネクタ交換で復活することが多い。試験でもその兆候が見えている。今回の結果を元に、費用や数量などを総合的に考え、適切な高電圧導入端子を選択、採用していく予定である。

参考文献

- [1] Y. Suetsugu, K. Kanazawa, K. Shibata, T. Ishibashi, H. Hisamatsu, M. Shirai, S. Terui, "Design and construction of the SuperKEKB vacuum system", *Journal of Vacuum Science & Technology A* **30**, 031602 (2012). doi: 10.1116/1.3696683
- [2] K. Shibata, Y. Suetsugu, T. Ishibashi, M. Shirai, S. Terui, K. Kanazawa, H. Hisamatsu, "Vacuum system of positron damping ring for SuperKEKB", *Journal of Vacuum Science & Technology A* **35**, 03E106 (2017). doi: 10.1116/1.4979009
- [3] "加速器ハンドブック", 日本加速器学会、丸善出版 (2018).
- [4] "真空科学ハンドブック", 日本真空学会、コロナ社 (2018).
- [5] K. Shibata, "Vacuum", Presented in 27th KEKB Accelerator Review Committee, 26 March, 2024. https://superkekb.kek.jp/event/135/contributions/734/attachments/736/2362/vacuum_KEKBreview20230326.pdf
- [6] 上窪田紀彦, 楊敏, 都丸隆行, 木村誠宏, 中垣浩司, 内山隆, "KAGRA 真空監視系への KEK 加速器技術の導入 II", *Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023)*, Funabashi, Japan, Aug. - Sep., 2023, pp. 708-711. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2023/proceedings/PDF/THP1/THP13.pdf
- [7] N. Kimura, T. Uchiyama, S. Miyoki, Y. Tanimoto, Y. Saito, "Impact of the 2024 Noto Peninsula Earthquake on the Vacuum Equipment of KAGRA, the Large Cryogenic Gravitational Wave Telescope", Presented in OLAV-VI, FNAL, USA, Apr 2024. <https://indico.fnal.gov/event/23500/sessions/7245/#20240417>