

高度真空中に於ける高電圧放電

井 街 仁

I 緒 言

II 残留ガスが真空破壊電圧に及ぼす影響

III 電極が真空破壊電圧に及ぼす影響

IV 真空破壊前の放電電流に就いて

V 補助放電により出来たイオン及び電子が破壊に及ぼす影響に就いて

VI 複 橋

I. 緒 言

高真空中に於ける絶縁の研究の一部として真空中に對置した電極間にかけ得る電圧の極限値の測定はしばしば試みられて來た。電極間の電圧が低い時は電極間に電流は殆んど認められないが、電圧を次第に高くして行くと或る電圧の値で突然電極間隙の絶縁は破れて放電を起す。この現象を“Breakdown”“真空破壊”と云ひ、この破壊の起る最低電圧を“破壊電圧”と云ふこととする。真空中に於けるこの破壊現象は特に X 線管、高電圧真空管に於て重大なる問題である。

低壓氣中の高壓放電に於て放電開始電圧即ち破壊電圧と氣相の壓力 p 及び電極間の距離 d との關係を表はす Townsend の「破壊電圧 p, d 曲線」によれば破壊電圧の極小値以下に於て更に p が小さくなると破壊電圧は急に高くなり、 p が非常に小さくなつた場合には破壊は最早や起らない様に見える。之は單に低壓に於てガス分子が少くなると衝突による電離が起りにくくなると云ふ事を意味してゐるだけである。即ち Townsend の法則を高真空の方へ延長して考へると真空度が高くなればなるだけいくらかでも破壊電圧は高くなることになる。しかし實際には高真空中では真空度に無關係に比較的低い電場で破壊は起るのである。

この高真空中に於ける破壊の問題は真空技術が進歩してゐなかつた爲に最初は研究の方法がなかつたのであるが、1910 年以後に於て水銀のジェットポンプが生れ 10^{-5} mm Hg より高度の真空が得られる様になつて急に研究される様になつた。そして多少理論づけられる様になつたのは Millikan 以後の事である。其後幾多の研究結果が發表されてゐるが結果が再現不能なことも破壊電圧が非常に大きな値になる爲めに種々なる臆説を産み未だ定設がない。

依て本論文は此の問題を物理化學的見地より實驗し其の機構の考察を行いたるものなり。

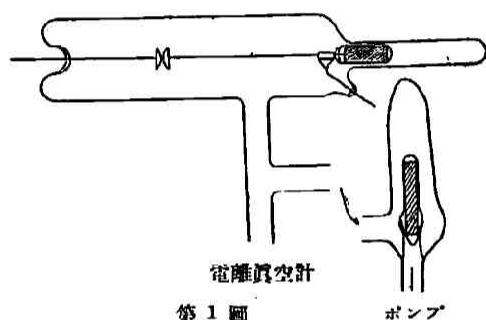
II. 残留ガスが真空破壊電圧に及ぼす影響

真空度が比較的低い時には破壊電圧は氣相の壓に關係することは既に多くの實驗者によつて確められてゐる。しかし 2, 3 の研究者は真空度が高くなると破壊電圧は概して氣相の壓力

には無関係であると云ふ結論を得てゐる。吾々の實驗に於ても真空破壊に際しては相當多量のガスが電極より發生されるがガス壓が 1×10^{-3} mm Hg 程度までは其の爲に破壊電壓が低められない事を確め得たのである。

實驗裝置 2枚の電解銅にて作りたる梘狀の圓板を對立させた放電管及び電離真空計を圖示せる如く鉄片を封入せるガラス摺合せ瓣を通して真空裝置につなぐ。真空ポンプには最終段にヒツクマン油分溜ポンプを用ふ。

裝置全體を爐中に入れて爐の溫度 300°C 内外にて1時間熱しガラス壁に吸着せるガス、水蒸氣及び油等の汚れを去る。更に液體空氣のトラップを用ひてポンプよりの油蒸氣が反應管



第1表

實驗番號	破壊電壓	初壓 mm Hg	終壓 mm Hg
1	42 Kv.	2×10^{-6}	2×10^{-3}
2	42 "	5×10^{-5}	1×10^{-3}
3	49 "	5×10^{-5}	9×10^{-4}
4	65 "	1.5×10^{-5}	8×10^{-4}

内に擴散して來るのを防ぎ、裝置の電離真空計にて 2×10^{-6} mm Hg 以下の真空度を得ることが出来る様にした。この放電管の兩極にケノトンにて整流せる直流電壓を加へ破壊を起し其の破壊電壓を測定したのであるが測定結果は次表に示す如きものを得た。ガス壓の項中“初壓”はガラス摺合せ瓣を閉ぢておき負荷電壓を高め最初に破壊を起したる直前の真空度である。更に破壊を起さす爲には電壓を破壊毎に高めねばならぬのであるが徐々に高めて行くと不規則に起り其の度に電極よりは相當のガスが發生し真空度は徐々に悪くなる。しかし真空度が悪くなつても破壊が最初の電壓より低い電壓で起ると云ふ事はない、更に真空度が悪くなつて“終壓”の項にあげた値にまで下ると破壊は連續して起る様になるのである。之より見ると真空破壊は真空度の可成りに廣い範圍内に於てガス壓には無関係である事が分る。かへつて此の結果だけからすると真空度が悪くなつて破壊電壓が高くなつたかの如くにさへ見えるのである。

此處で若しガラス摺合せ瓣を閉ぢずに真空度を充分に高く保ちながら破壊を起さすと一度破壊が起ると破壊は其の電壓では餘程起りにくくなり破壊の起る毎に破壊電壓は次第に高くなり遂には非常に高い電壓になるまで破壊が起らなくなる。此の現象は電極の“fatigue effect”“疲勞”と云つてゐる人があるが、之は後節で述べる事にする。

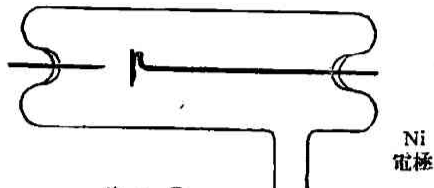
III. 電極が真空破壊電壓に及ぼす影響

前節に著者は真空中に於ては可成りに廣いガス壓の範圍に於て破壊電壓は氣相の壓の影響

を受けないことを知つた。又破壊電圧は Anderson¹⁾ の實驗によれば電場の強さのみならず兩極の電圧の大きさに關係する事も分つてゐるのである。

次に電極の型、材料及び状態が如何に破壊電圧を左右するかをしらべて見る。

先づ破壊電圧に對して陰極が問題か、又は陽極がより問題かと云ふ事である。今若し破壊電圧に對して電場が大なる影響があるものとすれば電極の一方を針狀にして置けば何れの極を陽極にしたときに破壊電圧に影響があるか、分る筈である。そこで著者は第2圖に示す様な Ni の針及び板による電極を有する放電管を作りて板電極を陽及び陰極として破壊電圧を測定したるに常に破壊電圧は針狀電極が陽なるときに低いことを確めたのである。



第2圖

若し電場電子流が破壊に大きな影響を與へるものならば之は明かに逆な現象である。そこで破壊電圧は電場電子流による影響は小さいと云ふ事が考へられるし、又陽極の方が真空破壊には陰極以上に影響が多い事も分るのである。然しての實驗から直ちに破壊電圧は陽極の性質だけによると即斷する事は出来ないで以下兩極の性質を検討してみた。

真空破壊の研究の初期に於ては破壊の誘因をなすものは電場電子流であると考へられてゐた爲に陰極材料及び陰極表面の状態が破壊電圧に大きな影響を與へるものと一般に信ぜられてゐたのである。

然るに多くの研究者が實驗に用ひた電極の方法から算出した破壊の起り始める時の電場の強さは $10^5 \sim 10^6$ Volt/cm 程度であり電場電子流の式から算出したものに比べると之では説明がつかない程小さすぎる。又電場電子流は電場をいくら高くしても非常に小さな値であつて破壊の時に流れる様な大電流にはなり得ないのである。しかし勿論電場電子流が破壊を起さす動機の一因をなしてゐる事は否めない。

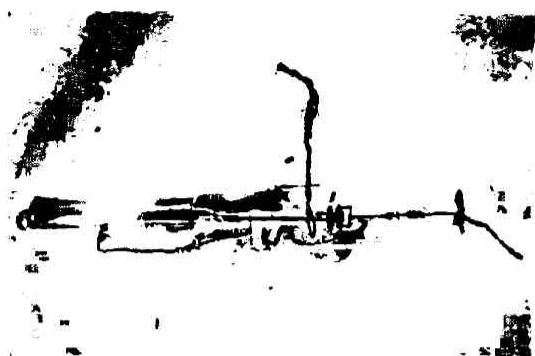
又 Bennet²⁾ によつて次の様な研究が電場電子流に關して報告されてゐる。即ち陰極に種々の金屬材料を用ひ其の研削度、純度、硬度及び仕事函數と電子放射の關係をしらべたのであるが結局何等の結論が得られなかつたのである。しかし陽極に之等の材料を用ひて同様電場電子流を測定したる所陽極材料により電場電子流の様子は明かに差異のある事を報告してゐるのである。

こゝで著者は電極表面が破壊電圧に及ぼす影響を調べる爲に次の如き實驗を行つたのである。即ち人爲的に電極表面の状態を色々に變化させて其の各々の場合の破壊電圧を測定した。

實 驗 装 置

1) H. W. Anderson; *E. E.*, 54, 1315 (1935).

2) W. H. Bennet; *Phys. Rev.*, 37, 582 (1931).



第 3 圖

電極表面を処理し易き様に第3圖の如き放電管を作製した。

電極は電解銅にて半球状のものを對立させたものである(直径 10 mm)。其他に W-フィラメント 0.03 mm 径なるもの5本をよりたるものに螺旋状に電解銅の細線を間隔約 1 mm に巻き之を輪にして上部より入れる。

一方の銅電極は移動し得る様に鐵片を封入したるガラス管を後部につけ、且つ外管中を滑る様にす。電極間隔は最小 1 mm 迄近よせる事が可能なり。材料は何れも使用前に理研 05 の研磨紙にて充分磨きて使用する。ガラス管は出来るだけ壁の影響を少くする爲に大きなものを用ひたいが電極を H. f. 爐にて焼く都合上 45 mm 管を使用する事にした。

測定に先立ち装置内を真空にし装置のガラス部分は焼いてガラス壁等に吸着せるガス、水等を追ひ出す。

又液體空氣にて殘留ガス及びポンプの油蒸氣を取り去り、氣壓は常に $2 \cdot 10^{-6}$ mm Hg 以下に於て實驗す。

實 驗 結 果

先づ電極は製作したるまゝにて處理をほどこさず、其表面は酸化物及び吸着ガス等のあるまゝにて兩極間隙 1 mm まで近よせ高電壓をかけると電壓 25 Kv あたりで真空破壊を起した。其時陽極表面には破壊のあとに青綠色の螢光を發する點が出来る。この輝點は極をかへるとやはり陽極の方に出来る。一度破壊の起つた後の電極を見ると陽極側の電極表面は汚れがとれて、恰も陽極表面についてゐたものは蒸發し去つた如き様子である。又陰極表面は反對に丁度陽極から蒸發したものが附着してゐるかの如くである。即ち本實驗に於ては破壊前は電極表面は紫黑色に酸化膜が出来てゐたのであるが破壊後は破壊にあづかつた部分の陽極表面は美しい金屬光澤をしてゐるのである。次に高周波爐を用ひて電極を 800°C に 10 分間暗赤熱すると電極表面は恐らくガス吸着層はなくなるのであるが酸化膜はとれず表面は暗赤紫色を呈してゐる。次に之を更に H_2 1 mm Hg 氣流中で H. f. にて 900°C に數分間焼くと酸化膜もなくなり又其他の蒸發し易き不純物も飛び、純粹な銅の表面が出来る。更にこの上に銅を蒸發してつけると電極表面は一層平滑なをそして純粹な銅表面が出来るのである。今其の各々の段階に於いて測定した破壊電壓を表にし第2表を得た。

今第2表について見るに、未處理電極について 25~43 Kv とあるのは最初電壓を 25 Kv まで上げたとき先づ破壊を起し最早や 25 Kv では破壊しなくなり、更に電極を除々に高めて行

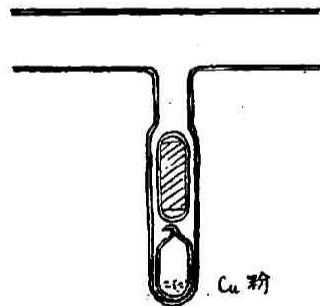
第 2 表 電極表面の處理と破壊電壓の關係 (I)

處理 實驗番號	眞 空 度	未 處 理	眞 空 中 で H ₂ 中 c H ₂ f 燒	眞 空 中 で H ₂ 中 c H ₂ f 燒	銅 蒸 發	
					急 蒸 發	除 蒸 發
1	1×10^{-5} mm Hg	25~43 Kv	27 Kv	42 Kv	19~30 Kv	>60 Kv
2	1.5×10^{-5} „	>43	22	42~52	20~35	>60

くと數回の破壊を起し 43 Kv では破壊を起さない様になつたのである。但し破壊電壓の測定にあたりては、電壓を加へてから 2 秒~5 秒ぐらゐ以内に破壊の起るときとした。第 1 節末に既に述べた様にこれが電極の眞空破壊に於ける“疲勞”と云はれるものであるがこの現象はしばしばあらはれて來るものである。次に 43 Kv まで破壊の起らなくなつた兩極を高周波コイルにて前記暗赤熱した後に於ては破壊電壓は一般に著しく低くなる。之は眞空中で焼いた爲に吸着ガスの層及び汚れはなくなるが、電極内部から擴散して來た不純物等が破壊を低めたと考へられる。

次に之を水素氣流 (1 mm Hg 壓) 中で高周波にて焼くと表面に擴散して來た不純物及び眞空中面中では飛ばなかつた様な吸着物が水素化合物の様な型になり電極表面を去り、酸化膜は還元せられて破壊電壓は更に高められる。其次の項に於ては水素焼きした電極上に銅を蒸發して電極上に銅の膜を覆つて破壊電壓を測定したのであるが、この際蒸發は豫め電極を近寄せた位置で W-フィラメントに電流を通じて熱し銅がとけかける位置で 10 分間赤熱した後に電極を後退せしめ W-Cu の蒸發電極が丁度兩電極板の中央に來る様にして蒸發を續けるのである。斯くすると W-電極に巻れた銅線中の不純物や W-線表面の不純物又は WO_3 が試験電極上に飛び來るのを防ぐ事が出来る。表中急蒸發の項は斯かる注意をせずにいきなり銅を蒸發した測定値であり、破壊電壓は非常に低い値をしめしてゐる之に對して更にこの上に徐々に銅を蒸發させた場合 (6 時間) には電極表面は一層滑かになり又不純物が覆はれ 60 Kv まで破壊は起らなくなる。

今度は電極表面に不導體又は導體の小凸起がある場合即ち電極面が充分平滑でない場合に破壊電壓はどうなるかと云ふ事を調べる爲に裝置に圖の如き側管をつけこれより銅粉を裝置内に入れた。電極表面に數ヶの銅微粒子が認められた。H₂ 焼きして 50 Kv まで破壊電壓の高くなつた状態の電極に於いてこの銅粉の入つた爲に破壊電壓は急に 10 Kv の低い値迄下り、この状態でもやはり電極の疲勞は認められ數回の破壊の後 20 Kv まで破壊電壓は高められた。そこで再びこの上に銅を蒸發してこの凸起を覆つてしまふと破壊電壓は 37 Kv が高くなつたのである。次には裝置内に一度空氣を入れ空氣中にて W-フィラメントに點火し WO_3 を作り



第 4 圖

眞空にして後 WO_3 を電極表面につけると破壊電圧は又 50 Kv より 20 Kv に下つた。次に酸化膜の影響であるが新しく作つた電極は製作の過程に相當酸化せられて居るのでこの時の破壊電圧を酸化膜の影響と考へてもよいのであるが、この時は酸化膜以外のものゝ影響もあると考へられる故に一度美しく銅を蒸發にてつけたものにつき 35 Kv まで破壊しない状態のものに空気を入れ 10 mm Hg 空氣中で H・f にて電極を焼き表に一樣に酸化膜を作りそこで装置を眞空にして破壊電圧を測定したるに 42 Kv まで破壊を起さなかつた。即ち一樣に酸化せられた銅の酸化被膜も破壊を起しにくいものである事が分る。銅粉を装置内に入れた實驗に於いては附着せる粒子の多い方を陽極とする方が破壊電圧は低い事が大きづばにはあるが觀察されたのである。即ち陽極表面の凸起の方が破壊電圧には影響が大きい。

この實驗に於いて吾々の知り得た事は

- 1) 破壊に於いては陽極より陰極に何か飛ぶ様に思はれる。
- 2) 電極表面に導體及び不導體の凸起のある場合、殊に陽極に凸起のある場合。
- 3) 電極材料中に含まれた不純物が蒸發し易き場合。
- 4) 電極表面が汚れ又はゴミ等の附着せる場合。

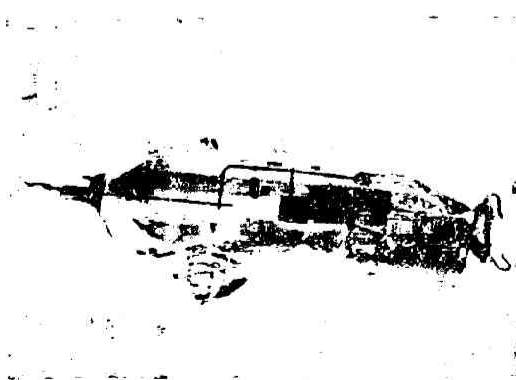
以上の場合には眞空破壊は低い電圧にて起り易いのである。そして之等の影響は何れも銅を蒸發して覆せる事により除く事が出来た。

IV. 眞空破壊前の放電電流に就いて

眞空破壊前に於て電場電子流は勿論考へられるのであるが以上述べたところより電場電子流が破壊には直接に關係のない事が分つた。しかし一層確める爲にブラウン管を使用して破壊前及び破壊の起つた時の電流を解析ししらべる事は破壊の機構を知る上に必要な事である。故に著者は次の實驗に於て破壊前電流の性質をしらべたのである。

實 驗 装 置

試験に用ひた装置は 5 圖に示した如きものを用ひた。



第 5 圖

放電管は陰極として Ni 線を用ひ尖端は不整面を出来るだけなくして美しい球面にす。グリッドは陰極を被ひ又グリッドの脚部は Ni 板にて遮蔽して陰極と陽極間に直接面するところをなくしたものを作る。陽極としては、管頭より導線を入れてガラス



表面の漏電を出来るだけ少くした。図解的には5圖の下に書きたる如きものなり。

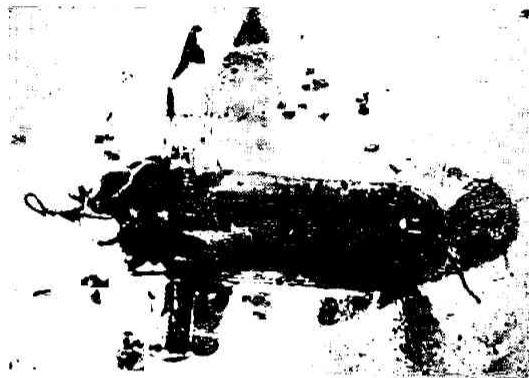
実験第一

以上の如き放電管を充分良く排氣して封じ切りて次の測定を行ひたり。

陰極をブラウン管の水平軸につなぎ垂直軸に時間軸を入れる。陽極は 25 Kv としグリッドを +300 V 及び -300 V にする。そして今ブラウン管により陰極に流れる電流を見るにグリッドが +300 V なる時は陰極には電子は流れず、-300 V なる時は電子の流れを見る。しかし陰極に飛び来る陽イオンの数は何れの場合にも殆んど其量に差は認められない。之は明かに陽極より陽イオンが引出されてカソードに飛んで来るものである事を證明してゐるのである。

実験第二

陽極及びグリッドは実験第1に用ひたるものと同じものを用ひ、陰極には W-フィラメントを使用し熱電子を放出させて同様実験を行ひ得る如く放電管を作りたり。装置は第6圖に示す。



第6圖

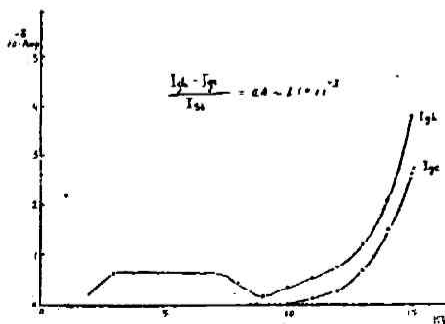
グリッドには -300 V を與へ陽極には 0 より破壊電壓迄の直流電壓を與へ得る如くす。今陰極の時グリッドに出入りする電流を

$$I_{gc}$$

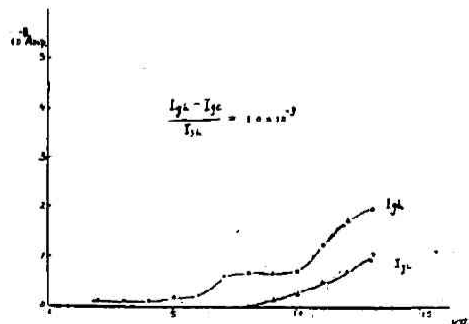
フィラメントに點火し I_{sh} ($I_{sh}=100 \mu A$) を流した時グリッドに出入りする電流を

$$I_{gh}$$

とし、フィラメントを點火し、即ち電場電子流が増したと思はれる様な状態と、點火せざる場合に於ける状態とに於けるグリッド電流を測定すれば第7圖、8圖の結果を得た。横軸に陽極



第7圖



第8圖

電圧をとり縦軸には I_{gh} 及び I_{gc} をとる.

又 $\frac{I_{gh}-I_{gc}}{I_{sh}}$ と云ふものを考へて見ると

$$I_{gc} = I_{gf} + k\gamma I_{gf} + k\gamma\beta I_{gf} + k^2\gamma^2\beta I_{gf} + k^2\gamma^2\beta^2 I_{gf} + \dots$$

$$I_{gh} = I_{gc} + I_{sh} (\gamma k + \gamma\beta k + \gamma^2\beta k^2 + \gamma^2\beta^2 k^2 + \dots)$$

但し β はイオン衝撃による電子の収量

γ は電子衝撃によるイオンの収量

k はグリッドワイヤーのグリッド全體に對する
側面より見たる面積比

故に

$$\frac{I_{gh}-I_{gc}}{I_{sh}} = k\gamma(1+\beta)(k\alpha\beta + k^2\alpha^2\beta^2 + \dots)$$

$$= \frac{k\gamma(1+\beta)}{1-k\alpha\beta}$$

$$= \frac{\gamma(1+\beta)}{\frac{1}{k} - \gamma\beta}$$

之は極めて大雑把に

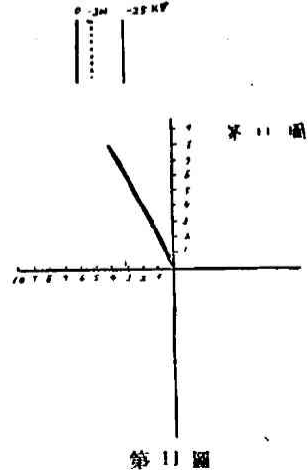
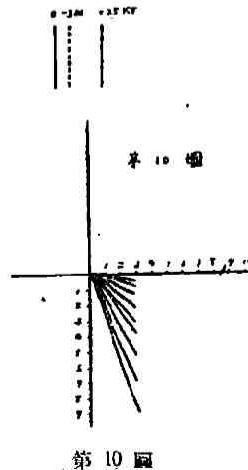
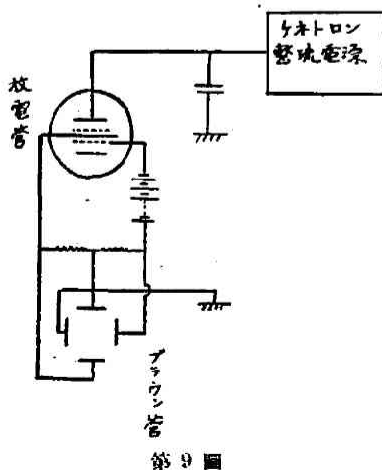
$$\approx \gamma$$

と考へられる.

故に $\gamma = 0.4 \sim 1.1 \times 10^{-4}$ 即ち破壊の起る近くに於ては $\gamma = 0.4 \sim 1.1 \times 10^{-4}$ の大きな事が分るのである.

實驗 第三

再び第5圖に示した放電管につきブラウン管オシログラフを用ひて放電電流を観察す. 水平軸にグリッドを結び垂直軸には陰極を結ぶ. 即ち第9圖の如く配線して放電の様子を観察



する實驗は圓筒電極を +25 Kv 及び -25 Kv にした場合に就いて行つた。

グリッド電壓は何れの時も -300 V とし陰極を 0 電位とす。オツシログラフに現れた模様を白紙上に寫し取ると第 10 圖, 第 11 圖に表す結果を得た。

第 10 圖に就いて圓筒を +25 Kv にした場合オツシログラフに現れたグリッド及び陰極に出入りする電流を I_g, I_c とすれば最初に流れる電流としてはグリッドからの電場電子流に始まると考へられる。故に

$$\frac{I_g}{I_c} = \frac{e + \gamma k + \gamma \beta k + \gamma^2 \beta^2 k^2 + \gamma^2 \beta^2 k'^2 + \dots}{\gamma k' + \gamma^2 \beta k k' + \dots}$$

k, k' は各々グリッド線とグリッドの目との側面より見たる面積比なり。

$$\begin{aligned} &= \frac{(1 + \gamma k)(1 + \gamma \beta k + \gamma^2 \beta^2 k^2 + \dots)}{\gamma k'(1 + \gamma \beta k + \gamma^2 \beta^2 k^2 + \dots)} \\ &= \frac{1}{\gamma k'} + \frac{k}{k'} \end{aligned} \quad (1)$$

$\frac{k}{k'}$ はグリッドを實測して $\frac{k}{k'} = \frac{1}{4.37}$ である。又 $k + k' = 1$ 。そこで第 11 圖により寫し取りたる $\frac{I_g}{I_c}$ の値は $\frac{1}{3}$ より大なる總ての値をとるのである。故に之を 1) に入れると

$$\gamma = 12$$

より小なる總ての値を取る事が分る。次に第 11 圖に於て圓筒を -25 Kv にするときは表面の有効電場の強さが小さい爲に圓筒より電場電子流は流れないでグリッドから陽イオンが最初に圓筒に向つて流れると考へるべきである。即ち i なる +イオン電流が先づグリッドより圓筒に流れそしてイオン衝撃による 2 次電子の放出を見、この 2 次電子はグリッド、及び中心の陽極に衝突する。順次斯くして大電流となり遂に破壊に導かれるのである。

$$\begin{aligned} \text{故に} \quad \frac{I_g}{I_c} &= \frac{i + i\beta k + i\beta^2 \gamma k + i\beta^2 \gamma^2 k^2 + i\beta^2 \gamma^2 k'^2 + \dots}{i\beta k' + i\beta^2 \gamma k k' + \dots} \\ &= \frac{1}{k'\beta} + \frac{k}{k'} \end{aligned}$$

この式に第 11 圖より求めたる $\frac{I_g}{I_c}$ の値 $\frac{1}{2}$ を代入すると

$$\beta = 5$$

となるのである。之より見ると破壊を起す邊りの高電圧で破壊の前後の状態では β の値は變化してゐないで γ の値だけが非常に著しく變化する事が分る。即ち γ の値は破壊の起らない時は第二の實驗にて得られた様に $0.4 \sim 1.1 \times 10^{-1}$ と云ふ極めて小さな値より取り得ないのであるが破壊時には 12 と云ふ大きな値まで取る事があるのである。そして之は陽極が如何に大きく破壊に影響してゐるかを物語つてゐるのである。

今若し $\beta\gamma \geq 1$ となる様な γ の値になつたならば當然電子及びイオンの電流はいくらでも

大きな値まで達し得る事は明かである。

V. 補助放電により出来たイオン及び電子が破壊に及ぼす影響

真空破壊の起る最も早い状態では電子が主因をなしてゐるのか又はイオンが主因をなしてゐるのかと云ふ事は比較的早くより研究の目的とされてゐたのであるが実験が困難な爲に未だ適確な実験的證明が得られてゐない。研究の初期に於ては主に電場電子流が破壊を起すのであると考へられて居り又電場電子流自身が真空破壊であるかの如くにさへ思はれてゐた事もある。しかし真空破壊時に於ける電流密度が非常に大きいと云ふ事を考へるならば電場電子流自身は勿論破壊には必要なものかも知れないが決して電場電子流だけで充分な條件ではないと思はざるを得ないのである。こゝで著者は本節に於いては次の2組の実験を試みたのである。即ち電場電子流及びイオンの各々が破壊電圧に及ぼす影響である。

実験装置

装置としては第一の実験は第12圖に示した放電管を用いた他は今までの実験と異つた部分なし。放電管に就いては電極は電解銅の直径1cmの圓板二枚を圖の如く1mmの間隔にて對立させ、一方の電極の中央にWのフィラメントを極板と同一平面上に張つて作つたのである。高真空にしながら装置全體を十分に焼き放電管のガラス壁電極の處理及び高真空を得る爲に液體空氣を



第12圖

用ふるなどは前實驗と同様充分注意し、放電管を高真空にしポンプにて引き乍ら装置全體を300°Cに30分間熱し、ガラス壁の吸着ガスを追ひ出す。次に高周波電氣爐にて銅電極を暗赤熱し電極表面の油及び吸着ガスを出来るだけ除きたる状態にて實驗を行ひたり。真空度は 2×10^{-6} 耗水銀柱以下にて實驗す。

實驗第一

ケノトロンにて整流したる高壓電源から高抵抗 10 meg Ω を通して陽極側に陽の高壓を結ぶ。陰極側にはフィラメントに對して -300 V に電池を通して結ぶ。フィラメントの一端は接地す。斯くしてフィラメントを點火する時は熱電子は勿論陰極には至らずして陽極に集められる。この様にして次に先づフィラメントを點火せざる時、次にフィラメントを點火し、陽極電流は陽極電壓 1000 V の時、1 μ A, 10 μ A の2通りの時との3つの場合につき各々の真空破壊電壓を測定したり。(第三表)

第 3 表

	冷 フ イ ラ メ ン ト		I_p (1000 V) $1 \mu A$	I_p (1000 V) $10 \mu A$
破 壊 電 圧	第 1 回	30 Kv	31 Kv	29 Kv
	第 2 回	29	29	30

こゝに見る如く、電場電子流が流れてゐる様な高電圧に於て更に熱電子流を陽極に集中するも其の爲に破壊電圧は何等影響をうけて居らないのである。即ち電場電子流は決して真空破壊自身でもないし、又電子流だけが流れても直ちに破壊が起されるものでもない事を確めたのである。

實 験 第 二

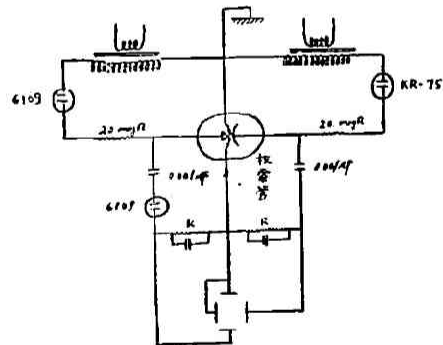
常實驗は陽イオンが真空破壊に及ぼす影響をしらべたのである。

實驗裝置はやはり放電管だけを第 13 圖に示したるものに代へ、他は前に同じなり。

放電管 電極は電解銅の板及び線を用ひて作る。電極は圖示せる如く碗狀のものを二枚對立させ碗の直径は 10 mm とす。一方の電極の中心に直径 1 mm の穴をあけ其の中央に同じ電解銅よりなる銅線の尖端をとがらしたるものを電極板に接觸せざる様にして支へる。電極は先づ 0.5 の研磨紙にて充分平滑に磨き軟き布にて拭ひて表面のゴミや油を拭ひ去る。銅以外の材料は總て Ni を用ひたり。出来上りたる電極の間隔は 1 mm にす。又電極の穴に入り



第 13 圖



第 14 圖

たる銅線の尖端は電極の前面より前に出ざる様注意す。電源及びブラウン管オツシログラフとの配線回路は出来るだけ短くし又配線相互間に誘動電流の起らざる様注意す。第 14 圖に之を圖示す。

こゝで測定に先立ち装置の排氣及び電極の處理は實驗第 1 と同様充分注意し 2×10^{-6} mm Hg 程度の高真空を得たるのちポンプを働かし乍ら行ひたり。兩碗狀電極を主電極 a, b, とし穴のある方の電極を b とす。又 b 電極と銅線のなす一對の電極を補助電極とし、線電極を c 電極と呼ぶ事にす。

今第 14 圖の如く配線し補助電極間に放電を起さしめ放電によりて生じたるイオンが主電極間隙に入りたる爲に及ぼす破壊電壓の變化を測定するのが當實驗の目的である。主電極間の破壊の有無をブラウン管にて觀察せり。

第一に補助電極間に 10 Kv の電位差を與へ、b 電極を (－) 側として放電を起さす。そして放電を繼續させながら主電極間に a 電極を (－) 側にして高電壓電源につなぐ。主電極間の電位差を徐々に高め最初に眞空破壊の起る電壓を V_i とす。

次に補助電極間の極性を逆にし b 電極を (+) 側につなぎ放電を起さしむ。又主電極間の極性も前回と逆に a 極を (+) 側にし前回同様主電極間の電位差を高め最初の破壊電壓を V_o とす。

第三番目には補助電極間には放電を起さしめず主電極間にのみ電位差を與へて測定したる破壊電壓を測定し之を V とす。之等 3 つの場合の關係を表示すれば第四表の如くである。

第 4 表

	V_i	V_o	V
實 驗 値	5 Kv	35 Kv	35 Kv

但し V の實驗値は a, b, 何れの電極を (+) 側にするも同様 35 Kv の値を測定したり。

上表に見るが如く V_i の値は著しく V の値より低いのに對し V_o は V と同じ値を測定してゐるのであり、之は明かに補助電極間に生じたイオンが主電極間の電場の爲に引つづられて電極にイオン衝擊をなした事が眞空破壊をこの様に低めた事の主因をなすのである。又 V_o に於てブラウン管上には補助電極間の放電により生じた電子が主電極間の電場に引かれてなす電子の流れは見られるのであるが、しかも尙破壊を起す電壓は放電を中止したる場合と何等其の大きさに變化を認める事が出来なかつたのである。

以上二種類の實驗に於て極めて簡単に(實驗の性質上幾分定性的な測定値より得られないのであるが)眞空破壊の根本の原因が陽イオン衝擊にあると云ふ事を實驗的に確めたのである。

VI. 機 構

第 IV 節の實驗に於て述べたる如く眞空破壊には必ず陽イオンが與つてゐる。又逆に第 V 節の實驗に於ては陽イオンが若し電極間隙に入つて來る様な條件では眞空破壊が著るしく促進せられるのである。そして其場合電子流による影響は殆んど認められない事よりすれば眞空破壊は陽極より來る陽イオンに起因すると斷じていい様に思はれるのである。次に其陽イオンは何であるかと云ふと吸着ガス、電極表面に生じたる色々の化合物又は電極金屬自身のイオン或は又電極物質中にある蒸發性物質のイオン等が考へられるがその何れもが破壊には同

様原因をなすのである。そしてそのイオンが何物であるかにしたがつて破壊電圧が變化するのであると考へる事が出来る。これによれば破壊電圧が一度の破壊を起す毎に高くなると云ふ“疲勞”の現象も極めて自然に解決される。又陰極材料に無關係である破壊電圧が陽極材料で非常に影響される事も明かに理由づけられるのである。

次に今このイオンが如何なる條件を満足させるときに破壊を起すかと云ふと第IV節に述べたる如く電子衝突によるイオン收量を γ としイオン衝突による2次電子收量を β とすれば

$$\gamma\beta \gg 1$$

なる條件を満足させる時に破壊を起す事は明かであり、第IV節の實驗値を例に用ひるならば、 β , γ のとりし數値としては $\beta \approx 5$ なる値に對して γ は 12 より小なるあらゆる値をとり得るのである。即ち破壊を起さざる以前に於ては $0.4 \sim 1.1 \times 10^{-4}$ の極めて小さい値である γ が何らかの機會に $1/5$ 以上の値を得た場合に $\gamma\beta \gg 1$ となり直ちにこゝに破壊が起るのである。

筆者は東京芝浦電氣株式会社電子工業研究所々長濱田成徳氏並びに西堀榮三郎博士、太田芳雄學士に對し終始御懇篤なる御指導と御鞭撻下されし事を篤く感謝し併せて本稿發表に先立ち御閲覽を給はりたる堀場先生に深甚の謝意を表すものなり。

東京芝浦電氣株式会社
電子工業研究所

(昭和19年3月1日受理)

THE HIGH VOLTAGE SPARK IN HIGH VACUUM.

By J. IMATI.

(Abstract)

In connection with a study of the insulation in high vacuum, the critical value of the voltage sustained between the electrodes placed in the high vacuum has often been measured, yet the mechanism of the phenomenon has not been made clear. The present investigation has been made upon the following points:—(1) the influence of the residual gas, (2) the influence of the type and material of the electrode used, (3) the discharged electric current before the vacuum breakdown, and (4) the influence of the ions and electrons formed by the supplementary discharges. The results are summarized as follows:

(1) The vacuum breakdown voltage is not influenced by the residual gas under the pressure range from 10^{-3} to 10^{-6} mm Hg.

(2) In vacuum breakdown, the anode is more affected by its type and material than is the cathode: (a) at the breakdown the charged bodies fly from the anode to the cathode; (b) when there exist projections of conductors or nonconductors on the surface of the electrode, especially of the anode, the breakdown is caused by a very low voltage; (c) by a proper treatment of the electrodes the breakdown voltage can be made higher.

(3) In such a high electric field as the breakdown takes place, β (the yield of the secondary electron caused by ion impact) is scarcely changed, while γ (the yield of ions caused by electron impact) shows a remarkable change. In the latter case, the value of γ , which is $0.4 \sim 1.1 \times 10^{-1}$ before the breakdown, becomes 12 in the breakdown. This shows how great an influence the anode exerts upon the breakdown.

(4) When electrons strike from outside into the space between the electrodes placed under such a high voltage as the breakdown takes place, i.e. when the flow of the field current of electrons is considered to be much increased, the breakdown voltage is not lowered. If, however, ions strike into the space from outside, the breakdown takes place with a very low voltage. From the above mentioned experiments the following conclusion is reached:

The influence of the field current of electrons does not take such an important part in vacuum breakdown as considered heretofore. The greatest cause of the vacuum breakdown is to be attributed to the positive ions expelled from the anode. These positive ions are formed from the adsorbed gas, the compounds on the surface, the easily evaporating impurities and the anode metal itself. The more easily the ions are expelled the lower is the breakdown voltage.

Electronics Research Laboratory,

Tokyo Shibaura Denki K. K. Kawasaki.

(March 1, 1944)