Investigation on the Intensity Attenuation Speed of the Single-Charged Ionized Vapor and Neutral Vapor at Current Chopping in Vacuum Arc

Teruo Yamamoto Student Member (Tokyo Denki University, 04gme28@ed.cck.dendai.ac.jp)

Cuie Ding Student Member (Tokyo Denki University)

Mijit Tursun Student Member (Tokyo Denki University)

Satoru Yanabu Member (Tokyo Denki University)

Keywords: low current vacuum arc, chopping current, spectrum intensity, ionized vapor, neutral vapor, electrode material

1. Introduction

In order to clarify the instability phenomena of a low current in the vacuum, the optical characteristics of a low current vacuum arc was investigated by using Cu, CuW, CuCr, CuBi, and AgWC electrodes.

At the time of current chopping, the spectrum intensity of neutral vapor wavelength (U_{cn}), single-charged ionized vapor wavelength (U_{ci}) and its attenuation speed (dU_{cn}/dt), as well chopping current (I_c) were measured in the current zero waveform, as show in Fig. 1.

2. Experimental results and discussion

Table 1 shows the results of electrode materials in the parameter shown in Fig. 1.

The attenuation speed of spectrum intensity of the neutral vapor (dU_{cn}/dt) when the current chopping is the fastest in the Cu electrode material as shown in Table 1. That is, the amount of metal vapor generated from the electrode is the smallest, and the diffusion speed is fastest. It is thought that metal vapor necessary to maintain a steady arc discharge is insufficient, and the chopping current grew

Table 1. Spectrum intensity and attenuation speed of intensity

Material	I_c [A]	U_{cn} [a.u.]	dU_{cn}/dt [a.u./ μs]	U_{ci} [a.u.]
Ag in AgWC	1.7	0.9	1.1	0.1
W in AgWC		0.7	0.7	0.1
Cu in CuBi	4.0	2.1	1.6	0.2
Cu in CuCr	4.6	2.2	2.3	0.4
Cr in CuCr		6.8	11.4	0.7
Cu in CuW	4.9	5.9	6.7	0.4
W in CuW		3.2	2.9	0.1
Cu in Cu	10.7	36.9	55.0	0.8

Spectrum intensity: U_{cn} (Neutral), U_{ci} (Ion)

Attenuation speed: dU_{cn}/dt (Neutral)

Fig. 1. Current zero waveform of Cu neutral vapor at CuW electrode

before the current decreases from this, and it becomes natural zero.

Like a CuW electrode, when the current approaches a zero from the particularly high boiling point and low vapor pressure for the same temperature of W, the evaporation of W is very small and can ignore it. As for this, spectrum intensity attenuation speed of Cu influences chopping current, and it is thought that, furthermore, it is similar in an AgWC electrode.

From this, the attenuation speed of spectrum intensity (dU_{cn}/dt) increase in order of AgWC, CuBi, CuCr, CuW and Cu. Moreover, I_c increases in same order of AgWC, CuBi, CuCr, and Cu, too.

We measured spectrum intensity (U_{cn} and U_{ci}). In an electrode the same as both, it seems that it is difficult that we connect it with a chopping current every materials so that values are different greatly.

真空アークの電流裁断における1価イオンおよび中性蒸気の光強度減衰速度の研究

学生員 山本 晃生* 学生員 丁 翠娥*
学生員 Mijit Tursun* 正員 柳父 悟*

Investigation on the Intensity Attenuation Speed of the Single-Charged Ionized Vapor and Neutral Vapor at Current Chopping in Vacuum Arc

Teruo Yamamoto*, Student Member, Cuie Ding*, Student Member,
Mijit Tursun*, Student Member, Satoru Yanabu*, Member

In order to clarify the instability phenomena of a low current in the vacuum, the optical characteristics of a low current vacuum arc was investigated by using Cu, CuW, CuCr, CuBi, and AgWC electrodes. We measured the spectrum-line intensity distribution against wavelength during arc discharge for each electrode. It was found that for Cu, CuW, CuCr, CuBi and AgWC electrodes, the total amount of the spectrum intensity from 350 nm to 950 nm wavelength (SI) increases in the order of Cu, CuCr, CuBi, AgWC, and except for CuW the chopping current decrease in the same order.

For each component of every electrode material, the spectrum intensity and its attenuation speed of the neutral vapor at current chopping (U_{cn} , dU_{cn}/dt) were investigated.

It was found that the attenuation speed at current chopping decreases in the order of Cu, CuW, CuCr, CuBi and AgWC, the chopping current decreases in the same order.

We will inspect the current chopping phenomena by observing the intensity change of the neutral vapor, and discuss relationship of electrode material and the chopping current from a new viewpoint of evaporation ability and the plasma decay speed.

キーワード：小電流真空アーク，裁断電流，スペクトル強度，イオン蒸気，中性蒸気，電極材料

Keywords: low current vacuum arc, chopping current, spectrum intensity, ionized vapor, neutral vapor, electrode material

1. まえがき

真空中のアーク放電は，電極から放出されるイオン化された金属蒸気や電子によって維持されていることから，アーク放電の安定性は，電極材料が蒸気を生成する能力や熱電子を放出する能力と関係が深いものと考えられている。

小電流真空アーク中において，電流がゼロに近づくとアーク電流および電圧が不安定となり振動を起し，自然電流零点前に電流が途絶える裁断現象が生じる。

この電流裁断現象は様々な接点材料により，従来の研究によって調査されている^{(1)~(4)}。

本件は，この小電流真空アーク放電中に発生する不安定現象発生時の不安定開始電流 (I_b)，裁断電流 (I_c)，アーク電圧 (V_{arc})，振動電圧最大値 (V_{osmax}) および再起電圧

最大値 (V_{remax}) について，開閉装置に一般的に使用されている Cu, CuCr, CuW および AgWC の4種類の電極を用いて，各種パラメータの測定を行った。そして，この結果の電流および電圧の傾向は著者らの従来の研究⁽⁵⁾と同様な結果が得られた。ここで，この波形解析から得られた裁断電流値の傾向が電流および電圧の特性だけではなく，光学的特性と同様であるのかが重要となってくる。

そこで，同電極に CuBi を追加した5種類の電極を用いて，裁断電流 (I_c) およびスペクトル分析の光学的測定から，波長として 350 nm~950 nm のスペクトル強度の総量 (SI)，アーク放電時での中性蒸気および1価のイオン発光強度の最大値および変化速度の大きさ (U_{mn} , dU_{mn}/dt , U_{mi} , dU_{mi}/dt) の測定を行った。

そして，さらに裁断電流値に直接関係する電流裁断時の中性蒸気の光強度および減衰速度の大きさ (U_{cn} , dU_{cn}/dt) や紫外領域を主体とする1価のイオン蒸気の発光強度 (U_{ci}) 測定を行った。この結果から光の減衰が蒸気の拡散と考えたため，拡散されることにより，放電が維持できなくなり，

* 東京電機大学
〒101-8457 東京都千代田区神田錦町 2-2
Tokyo Denki University
2-2, Nisikicho-Kanda, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8457

裁断されると考えられる。この結果は直接的な電流遮断現象の基礎特性として重要な役割を担っていると考えられる。

2. 不安定現象の波形解析

〈2・1〉 実験回路 不安定現象の波形解析を行う実験回路を図1に示す。回路において、静電容量 0.0654 F のコンデンサに電圧を充電させ、コンタクトのスイッチを投入し、インダクタンス 0.157 mH のリアクトルにより、約 50 Hz の遮断電流を通电させる。通電中に電極を開極することにより発生したアークの電流、電圧をデジタルオシロスコープにより検出し、その後コンピュータにより解析を行った。遮断電流波高値 600 A、アーク放電時間を 5.2 ms 一定で放電させ実験を行った。充電電圧は 60 V とした。

〈2・2〉 実験装置 供試器である真空チャンバーにおいて、電極を上下に対向させ、空気圧により可動電極を垂直に動かし開閉させる。ギャップの長さを 8 mm 一定とし、平均開極速度は約 0.5 m/s とした。電極材料は Cu, CuCr (Cu : 50%), CuW (Cu : 26%) および AgWC (Ag : 33%) の 4 種類で、電極直径はそれぞれ 20 mm である平板電極を用いて実験を行った。なお、真空チャンバーはロータリーポンプおよび油拡散ポンプにより、おおよそ 10^{-4} Pa まで持続的に排気し、実験に供している。

〈2・3〉 測定結果 観測結果の一例波形を図2に示す。図において、不安定となりアーク電圧の 15% 程度以上の振幅の電圧振動が始まった時点 (a) の電流を不安定開始電流 I_b 、裁断電流を I_c 、アーク電圧を V_{arc} 、振動電圧最大値を V_{osmax} 、再起電圧最大値を V_{remax} によってそれぞれ示す。実験は並列のコンデンサの容量を変化させたときの各種パラメータの測定を行った。

〈2・3・1〉 並列コンデンサの影響 コンデンサを接続し、容量を 0 から 5 μ F まで変化させた。その時の各種パラメータの変化を表1に示す。結果から明らかなように、 I_b および V_{arc} は容量を変化させても一定の値を示した。 I_c は容量の増加とともに増加し、 V_{osmax} および V_{remax} は減少した。そして、 I_b , I_c , V_{arc} , V_{remax} は AgWC, CuW, CuCr および Cu の順に値が増加し、 V_{osmax} は CuW, AgWC, CuCr および Cu の順に増加傾向を示した。

Co: Capacitance (0.0654 F), Lo: Inductance (0.157 mH)
C1: Capacitance (0~5 μ F), CRO: Oscilloscope

図1 実験回路

Fig. 1. Experimental circuit.

図2 電流零点近傍波形

Fig. 2. Waveform near current zero.

表1 並列コンデンサの影響

Table 1. Effect of parallel capacitance ($C1 = 0 \rightarrow 5 \mu$ F).

Material	I_b [A]	I_c [A]	V_{arc} [V]	V_{osmax} [V]	V_{remax} [V]
Cu	21.0	6.6→11.0	20.3	707.4→212.6	1829.2→49.5
CuCr	10.3	2.2→5.5	13.8	343.4→119.6	752.7→28.0
CuW	9.6	1.9→3.2	11.7	196.8→18.0	400.5→25.7
AgWC	7.4	0.9→1.8	10.7	180.9→60.0	198.1→16.9

3. 真空アークの光学的測定

〈3・1〉 実験回路 光強度測定に使用した実験回路を図3に示す。回路において、商用電源より交流 100 V/50 Hz の電圧を印加させ、限流リアクトルを調節することにより、遮断電流波高値 110 A、アーク放電時間 7.5 ms で放電させた。

〈3・2〉 実験装置 供試器の条件は電極を除いて、前章と同様であり、電極材料は Cu, CuCr (Cu : 50%), CuW (Cu : 26%), CuBi (Cu : 99%) および AgWC (Ag : 33%) の 5 種類で、電極直径はそれぞれ 20 mm の平板電極を使用した。

〈3・3〉 光観測装置 アークの発光強度は、図4に示すように、放電によって放出された光は真空チャンバーの窓を通過し、集光レンズにより集光させたのち、スペクトル測定器 (MPM-C7460/HAMAMATSU (350 nm~950 nm のスペクトル強度測定)) およびモノクロメータ (MO6978MN/溝尻光学工業所 (中性光測定), G-250/Nikon (イオン光測定)) によって測定を行った。また、紫外光測定を行うため石英窓および石英レンズを使用し、光がレンズにより遮光されないようにした。光電子増倍管を使うことによりモノクロメータからの光信号を電気量に変換し、デジタルオシロスコープによって電流、電圧と共に同時に取り込み、その後コンピュータにより解析を行った。モノクロメータの入射部分および出射部分のスリットを調節することにより、測定波長の分解能を設定した。また、放電光を増幅させるため、光電子増倍管に増幅回路を接続し、使用した。ここ

AC: Power supply (100V, 50Hz) Tr: Transformer (1:1)
MC: Monochromator CRO: Oscilloscope

図3 光強度測定回路

Fig. 3. Experimental circuit.

図4 分光システム

Fig. 4. The system of spectroscopic analyzer.

で、中性光測定の増幅回路のレスポンスタイムは200 ns程度であり、そして電流遮断時での光の減衰時間が1 μ s程度であるため、測定可能感度であると考えられる。他方、イオン光測定の増幅回路のレスポンスタイムは2.5 μ s前後であるために、電流遮断時における光強度の減衰速度の大きさを測定することは困難であった。そのため、本件では電流遮断時での光強度のみ測定を行った。しかし、アーク放電の変化時間はmsオーダーであるため、中性およびイオンのどちらの場合においても、測定可能感度であると考えられる。

〈3・4〉 測定方法 中性蒸気の発光測定には干渉フィルタを用いて特定の荷電粒子のみからの光を通過させて測定を行った。ここで、測定波長は他の材料の強い波長と無関係であり、比較的強い波長を選定した。中性蒸気の波長の選定には、波長領域として、350 nm から600 nmの範囲をスペクトル測定器により測定し、決定した。1例として、CuCr電極の結果を図5に示す。また、イオン蒸気の波長は、文献(6)の結果を参考に選定した。これらの結果から中性蒸気および1価のイオン蒸気波長はそれぞれ表2に示すものを使用した。なお、Biのイオン蒸気波長においては、比較的強い波長は確認できなかったために、実験を行うことは困難であった。

光電子増倍管の出力に高圧直流電源より中性蒸気なら-500 V、イオン蒸気なら-600 Vの電圧を印加させ実験を行った。

図5 スペクトル強度分布 (CuCr)

Fig. 5. Spectrum intensity distribution of CuCr Electrode.

表2 中性蒸気と1価イオン蒸気の波長

Table 2. Wavelength of neutral vapor and single-charged ionized vapor.

Material	Neutral vapor [nm]	Ionized vapor [nm]
Ag	546.5	243.7
Bi	472.3	—
Cr	427.5	284.4
Cu	510.6	224.6
W	400.8	258.9

〈3・5〉 光強度と遮断電流の関係 一般的に、アーク放電の光強度は電子温度と蒸気密度に関係している。電極材料の種類によって、電子温度は放電中にあまり変化せず、スペクトル強度はイオン量や蒸気密度に比例すると考えられている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

本件において、分光器を使用し、各種電極材料の代表的な中性蒸気およびイオン蒸気の発光について、アーク放電時および電流零点時の光強度とその減衰速度の大きさの調査を行った。図6にアーク放電中に測定できるCuW電極におけるCuのイオン波長(224.6 nm)の一般的な波形を示す。図に示すように、光強度の最大値および光強度の変化速度の大きさをU_{mi}, dU_{mi}/dtと示す。そして、図7に電流零点近傍でのCuW電極におけるCuの中性波長(510.6 nm)の一般的に測定できる波形を示す。図に示すように、電流遮断時の光強度と光の減衰速度の大きさをU_{cn}, dU_{cn}/dtと示す。また遮断電流をI_cによって示す。電極材料における、電流遮断時の結果を表3に示す。

この表において、Materialの『Ag in AgWC』とはAgWC電極におけるAg波長の結果を示す。そして、光強度につ

図 6 アーク放電波形 (Cu in CuW)

Fig. 6. Waveform of arc discharge of Cu single-charged ionized vapor at CuW electrode.

図 7 電流零点波形 (Cu in CuW)

Fig. 7. Current zero waveform of Cu neutral vapor at CuW electrode.

表 3 光強度と減衰速度の大きさ

Table 3. Spectrum intensity and attenuation speed of intensity.

Material	Ic [A]	Ucn [a.u.]	dUcn/dt [a.u./μs]	Uci [a.u.]
Ag in AgWC	1.7	0.9	1.1	0.1
W in AgWC	0.7	0.7	0.7	0.1
Cu in CuBi	4.0	2.1	1.6	0.2
Cu in CuCr	4.6	2.2	2.3	0.4
Cr in CuCr	6.8	11.4	0.7	
Cu in CuW	4.9	5.9	6.7	0.4
W in CuW	3.2	2.9	0.1	
Cu in Cu	10.7	36.9	55.0	0.8

Spectrum intensity: Ucn (Neutral), Uci (Ion)
Attenuation speed: dUcn/dt (Neutral)

いては相対値を表す単位 [a.u.] で表している。しかしながら、数値は、図 4 の分光システムの光学系や光電子増倍管の感度などが中性蒸気の場合およびイオン蒸気の場合において、それぞれ同一の条件で観測されたものであり、また、基準値を同一にしたものである。よって、同様に図 6, 図 7, 図 8 ならびに表 4 および表 6 は中性の場合およびイオンの

(a) Cu in CuW (Neutral vapor)

(b) Cu in CuW (Ionized vapor)

図 8 アーク放電時における変化速度の大きさ

Fig. 8. Intensity recline speed at arc discharge.

表 4 Cu 合金の光強度の比較

Table 4. Comparison of intensity of Cu alloy.

Material	Ic [A]	Umn [a.u.]	dUmn/dt [a.u./ms]	1/τn [1/ms]	Umi [a.u.]	dUmi/dt [a.u./ms]	1/τi [1/ms]
Cu	10.7	101.8	69	0.68	7.8	11	1.55
CuW	4.9	90.4	52	0.58	1.1	2	1.93
CuCr	4.6	42.7	16	0.38	4.6	12	2.64
CuBi	4.0	40.5	7	0.18	6.5	17	2.77

Intensity: Umn (Neutral), Umi (Ion)
Attenuation speed: dUmn/dt (Neutral), dUmi/dt
 $1/\tau_n = 1/U_{mn} \times dU_{mn}/dt$
 $1/\tau_i = 1/U_{mi} \times dU_{mi}/dt$

場合において、相互に大小関係を比較することができる。光強度の変化速度の大きさに関しても同様である。また、CuBi 電極において Bi の含有量がわずかであるために、Bi 金属の中性蒸気およびイオン蒸気の光強度の測定は困難とされた。

〈3・5・1〉 Cu 合金の光強度の比較 Cu 金属を含む Cu, CuCr, CuW および CuBi の 4 種類の電極について、Cu (中

表 5 添加金属の物理定数

Table 5. Physical contact of additional metal.

Material	Boiling point [K]	K [W/m × K]
Cu	2,845	394.0
W	5,828	167.0
Cr	2,945	91.3
Bi	1,837	8.0

K: Thermal conductivity at 297°

性蒸気波長 510.6 nm, イオン蒸気波長 224.6 nm) の光強度について調査した。アーク放電中の CuW 電極における Cu の中性蒸気およびイオン蒸気のスペクトル強度の実測波形を図 8 に示す。図からも明らかなように、変化速度の大きさ dU_{mn}/dt および dU_{mi}/dt は中性の場合とイオンの場合とでは 50 と 1 のように大きな差を確認することができる。各種電極における中性蒸気およびイオン蒸気の光強度の最大値 (U_{mn} , U_{mi}), 光強度の変化速度の大きさ (dU_{mn}/dt , dU_{mi}/dt) および裁断電流 (I_c) の結果を表 4 に示す。表から明らかなように、光強度の最大値は中性蒸気の場合 Cu, CuW, CuCr および CuBi の順に減少を示し、裁断電流もまた光強度の変化速度の大きさと同じ順に減少を示した。しかし、イオン蒸気は中性蒸気とは異なった傾向を示し、 $1/\tau_i$ は Cu, CuW, CuCr および CuBi の順に増加した。

この中性蒸気の現象については、次のように考えられる。表 4 に示すように、Cu 電極において、 U_{mn} は一番大きいことから、放電期間中で一時的に Cu の蒸気量が増大される。しかし、 dU_{mn}/dt もまた大きかったため、光強度の時定数 (τ_n) は小さくなり、短時間でアークを維持するための蒸気量が不足することにより、結果的に電流裁断が早く生じた。

Cu 金属に他の金属を添加することにより、生成された合金は、その複合した金属が表 5 に示すように⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、低沸点の金属 (Bi) であるなら、蒸気発生能力が増大する。また高沸点および低熱伝導率の金属 (Cr, W) なら熱が伝わりにくく、熱が局所的に集中し、蒸発しやすい Cu 部分が蒸発したと考えられる。このことから Cu 電極に比べ、どの合金電極も蒸気量が多いために、裁断電流値が小さくなったと考えられる。

〈3・5・2〉 SI の光強度, dU_{cn}/dt および I_c の関係 真空アーク放電中に生成されたプラズマの線スペクトル強度についてスペクトル測定器を用いて実験を行った。この装置において、350 nm~950 nm 波長の発光スペクトル強度の時間積分値を同時に観測し、各種電極について、同じ条件に対する波長の発光スペクトル強度の総量を調査した。その結果を図 9 および数値化した結果を表 6 に示す。この表に

図 9 真空アーク中のスペクトル強度分布

Fig. 9. Spectrum intensity distribution of a vacuum arc.

表 6 裁断電流と光強度の関係

Table 6. Relationship of intensity and chopping current.

Material	I_c (A)	SI (a.u.)	dU_{cn}/dt (a.u./ μs)
AgWC	1.7	909,407	0.1
CuBi	4.0	851,332	1.6
CuW	4.6	4,326,265	2.3
CuCr	4.9	749,903	6.7
Cu	10.7	674,994	55.0

において、各種電極の dU_{cn}/dt の結果は表 3 の結果と同様である。なお、結果が 2 種類の場合 (AgWC, CuCr, CuW) は次のように考えた。例えば、CuW 電極は W の特に高い沸点および同じ温度に対する低い蒸気圧から、電流が零に近づいて、W の蒸発は非常に小さくなり、無視することができる。これは Cu の光強度減衰速度が裁断に影響し、さらに AgWC 電極においても同様と考えられる。

表 6 に示すように、Cu 電極材料において、電流裁断時の中性蒸気の減衰速度の大きさ (dU_{cn}/dt) は最も早いことから、プラズマを維持している金属蒸気が早くに拡散されるため、裁断され電流値が大きくなったと考えられる。中性の減衰速度の大きさが、この傾向を決めていることについては、今後の課題とする。

CuW を除いて、SI は AgWC, CuBi, CuCr および Cu の順に減少し、 dU_{cn}/dt は同じ順で増加する。 I_c もまた AgWC, CuBi, CuCr, および Cu の同じ順に増加する。

CuW の SI が非常に大きいことについては、今後の実験により検討を行いたいと思う。

光強度 U_{cn} および U_{ci} の測定を行った。両者とも同じ電極では、材料ごとに値が大きく異なるため、裁断電流と関連づけることは困難と思われる。

4. ま と め

電極ごとの不安定開始電流値, 裁断電流値, アーク電圧, 振動電圧最大値および再起電圧最大値の測定を行った。また光強度測定において, 中性蒸気およびイオン蒸気の光強度の測定を行い, 裁断電流値との関係を調査した。本報告を要約すると次の通りである。

(1) 並列コンデンサの容量を変化させたとき I_b および V_{arc} は一定の値を示した。そして, I_c のみ増加し, V_{remax} および V_{osmax} は減少した。

(2) I_b , I_c , V_{arc} , V_{remax} の大きさは AgWC, CuW, CuCr および Cu の順に増加し, V_{osmax} は CuW, AgWC, CuCr, Cu の順に増加した。

(3) アーク放電の光強度の時定数 τ は中性蒸気の場合, Cu, CuW, CuCr および CuBi の順に増加し, イオン蒸気は同じ順に減少した。

(4) 裁断電流 I_c は電流裁断時での中性蒸気のスペクトル強度減衰速度の大きさ dU_{cn}/dt と真空アーク放電中に放出されたスペクトル強度の総量 SI によって強く影響されている。

(5) 裁断電流値は単一スペクトル強度 U_{cn} , U_{ci} では決まらず, 光強度の減衰速度の大きさ dU_{cn}/dt が, 裁断電流に対して大きな影響を持っている。 dU_{cn}/dt が大きい時には, 材料のプラズマ拡散速度が速く, プラズマを維持することができなくなるため, 裁断電流は大きくなる。

(6) CuW を除いて, SI は AgWC, CuBi, CuCr および Cu の順で減少し, そして I_c および dU_{cn}/dt は同じ順で増加した。

(平成 17 年 2 月 23 日受付, 平成 17 年 8 月 4 日再受付)

文 献

- (1) P.G. Slade: "Advances in Material Development for High Power Vacuum Interrupter Contacts", *IEEE Trans. Comp., Packag., Manufact. Technol. A*, Vol.17, No.1, pp.96–106 (1994)
- (2) R.P.P. Smeets: "Experimental Characterization of Arc Instabilities and Their Effect on Current Chopping in Low-Surge Vacuum Interrupters", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol.20, No.4, pp.439–445 (1992)
- (3) M. Murano, S. Yanabu, H. Ohashi, H. Ishizuka, and T. Okazaki: "Current Chopping Phenomena in Medium Voltage Circuit Breaker", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, Vol. PAS-96, No.1, pp.143–149 (1977)
- (4) A. Yamamoto, T. Okutomi, M. Homma, and M. Okawa: "Instability of Vacuum Arc in Ag-Cu Contact alloys", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol.21, No.5, pp.463–468 (1993)
- (5) C. Ding and S. Yanabu: "Effect of Parallel Circuit Parameters on the Instability of a Low-Current Vacuum Arc", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol.31, No.5 (2003)
- (6) F.M. Pheips III: M.I.T WAVELENGTH TABLES, Vol.2: Wavelength by Element, pp.800–802, The M.I.T. Press, Cambridge (1982)

- (7) R.P.P. Smeets: "Fluctuations of charged particle and light emission in vacuum arcs", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.21, pp.301–310 (1988)
- (8) O. Morimiya: "Theoretical and Experimental Study of a High-Current Vacuum Arc in a Uniform Axis Magnetic Field", *J. Appl. Phys.*, Vol.71, p.101 (1992)
- (9) A. Fujishima: *Electrochemistry handbook*, pp.28–42, Maruzen (2000) (in Japanese)
藤嶋 昭: 電気化学便覧, pp.28–42, 丸善 (2000)
- (10) Y. Waseda: *Metal databook*, p.14, Maruzen (2004) (in Japanese)
早稲田嘉夫 編: 金属データブック, p.14, 丸善 (2004)

山 本 晃 生 (学生員) 1982 年 1 月 28 日生。2004 年 3 月東京電機大学工学部電子工学科卒業。同年 4 月東京電機大学大学院工学研究科電気工学専攻入学, 現在に至る。主に小電流領域真空アークに関する研究に従事。

丁 翠 娥 (学生員) 1962 年 11 月 7 日生。1984 年 7 月中国北京農工大学電気工学科卒業。同年 8 月北京供電局入社。配電系統および変電設備関連の仕事に従事。2002 年 3 月東京電機大学大学院工学研究科電気工学専攻修了。2005 年 3 月同大学院博士課程修了。主に小電流領域真空アークに関する研究に従事。

Mijit Tursun (学生員) 1973 年 1 月 5 日生。1996 年中国新疆大学電気工学科卒業。2004 年東京電機大学大学院工学研究科電気工学専攻入学, 現在に至る。主に小電流領域真空アークに関する研究に従事。

柳 父 悟 (正員) 1941 年 7 月 15 日生。東京大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月 (株) 東芝入社。1972 年リバプール大学 Ph.D., 工学博士。主として, 高電圧大電流現象の研究および同機器開発に従事。現在, 東京電機大学教授, Visiting Professor Liverpool. IEEE, IEE Fellow, イギリス Royal Academy of Engineer FEng., Current Zero Club, 日本工学アカデミー会員。