真空絶縁破壊における電極材料元素及び酸素の 発光スペクトルの観測*

小林 信一**・細田 稔**・斉藤 芳男***

(受付1991年12月2日, 掲載決定1992年2月8日)

Observations of Optical Spectra of Electrode Materials
and Oxygen Emitted from Vacuum Gaps under Breakdown
Shinichi KOBAYASHI, Minoru HOSODA and Yoshio SAITO

** (Department of Electrical Engineering, Saitama University, Urawa, Saitama)

*** (National Laboratory for High Energy Physics, Tsukuba, Ibaraki)

(Received December 2, 1991, Accepted February 8, 1992)

1. はじめに

真空ギャップの絶縁破壊は、電極材料の金属蒸気および不純物ガスなどがギャップ間に放出され、それらがイオン化することにより発生すると考えられている。本研究では不純物ガスとして酸素に注目し、絶縁破壊時の電極材料と酸素の発光スペクトルを観測して絶縁破壊回数に対する各元素のスペクトル強度の変化及び絶縁破壊電界の変化を調べた。電極材料は、Cu, Fe, 及び Al の 3 種類である。

2. 実験装置・方法

Fig. 1 に実験装置図を示す。大別してインパルス発生器 (波頭長 $64 \mu\text{s}$, 波尾長 $700 \mu\text{s}$, 最大尖頭電圧 100 kV) 真空容器, 分光器 (回析格子型), 光電子増倍管 (サイドオン型 1P28A), データ取り込み用のパーソナルコンピュータからなる。光電子増倍管は 2 本用意し, 2 本のスペクトル線を同時に観測できる。試料電極は大気中で超音波洗浄を施した後, 真空容器内に固定し容器内を $1 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ 以下まで排気する。その後電極間にインパルス高電圧を印加し絶縁破壊させる。

発光スペクトル強度の観測の準備のため, まず, 電極間で発するスパーク光のスペクトルをフィルム (Kodak-TRIX) に記録し, 発光元素の同定を行った¹⁾。次に, そのうちの電極材料と酸素の中の 1 本の計 2 本のスペクトル線の位置に光電子増倍管を合わせ, 500 回くり返し絶縁破壊させて絶縁破壊回数に対する絶縁破壊電界の変化及びスペクトル強度の変化を調べた。

以上の実験を Cu 電極 (純度 99.9%) Fe 電極 (同 99.5%) Al 電極 (同 99.99%) について行った。

3. 実験結果・検討

3 種類の電極について発光スペクトルを観測し, 波長を同定したところ, 電極材料元素のスペクトル線の他に, Cu については酸素のスペクトル線 (407.6 nm , 459.6 nm , 466.2 nm) が観測された。そこで, 酸素を不純物ガスとしてとらえ, 比較的強度の高かった 466.2 nm のスペクトル線をその後のくり返し絶縁破壊実験中の測定対象として選択した。また, 電極材料元素のスペクトル線として Cu : 510.6 nm Fe : 527.0 nm Al : 396.2 nm の 3 つの波長をそれぞれ選んだ。

Fig. 2 にくり返し絶縁破壊実験の中の波形の一例として Al の 100 回目の絶縁破壊で得られたものを示した。(a) は電極間の電圧波形である。電圧波形が落ち込んでいる間 (約 0.15 ms) で絶縁破壊が生じている。(b), (c) はそ

* 平成 3 年 10 月 31 日 第 32 回真空に関する連合講演会で発表

** 埼玉大学工学部電気工学科 (〒338 浦和市下大久保 255)

*** 高エネルギー物理学研究所 (〒305 つくば市大穂 1-1)

Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental System.

Fig. 2 Wave Forms obtained at the 100th Breakdown of Al Electrodes.

- (a) Voltage across the Gap
- (b) Spectrum of Oxygen
- (c) Spectrum of Aluminum

の時の酸素のスペクトル線およびアルミニウムのスペクトル線の強度の時間的変化を示しており、それぞれ絶縁破壊中に同時に発光していることが分かる。(b)では発光が時間的に飛び飛びであるのに対し(c)では連続的に観測されているが、これはアルミニウムの発光が酸素の発光に比べて非常に強いためである。(本実験ではスペクトル線の発光強度として光電子倍管から出力されるパルス数を用いた。)

くり返し絶縁破壊を500回行う間に以上のような波形を随時記録し、3種類の電極について Fig. 3 及び Fig. 4 に示される実験結果がそれぞれ得られた。Fig. 3 は絶縁破壊回数が1回目から500回目まで10回毎に絶縁破壊電界及び電極間隔の変化をプロットしたものである。電極間隔が変化しているのは、絶縁破壊をくり返すとコンディショニング効果により最大電圧を印加しても絶縁破壊を起こさなくなるので、絶縁破壊させるために順次ギャップ長を小さくしたためである。Fig. 4 は絶縁破壊回数1回目から500回目まで50回毎(300回目からは100回毎)に電極材料元素スペクトルと酸素スペクトルの相対強度の変化を示したものである。電極材料元素と酸素の発光強度(計測されたパルスの数)を加算した値を1として電極材料元素および酸素の発光強度の割合を帯グラフで示している。

Fig. 3 では3種類のいずれの電極材料の場合もコンディショニング効果が認められる。しかし、Cu の場合は破壊回数150回以降、破壊電界の上昇が飽和している。これは、Fig. 4 のように酸素スペクトルの相対強度が Fe, Al に比べて高いことと関係があると考えられる。そこで、まず1回目から10回目までの間の絶縁破壊電界の上昇分を求めると、Cu は $2.3(\times 10^7 \text{ V/m})$ 、以下同じ)、Fe は3.0、Al は1.5となり、以後の絶縁破壊回数のところ

Fig. 3 Dependence of Breakdown Fields on the Number of Breakdowns.

- (a) Cu Electrodes
- (b) Fe Electrodes
- (c) Al Electrodes

では見られない上昇を示している。Fig. 4で1回目と50回目のスペクトルの相対強度の変化をみるとCuとFeについては酸素スペクトルの相対強度が減少し、代わりに電極材料元素スペクトルの相対強度が増加している。即ち、絶縁破壊回数が10回までは、電極材料よりもむしろ電極表面に付着している不純物が絶縁破壊の発生を左右している可能性が高い。実際、Fig. 5に示したCuの1回目の絶縁破壊時の波形では、酸素スペクトル(実線)が観測された後、約 $7\mu s$ 遅れてCuスペクトル(破線)が観測されている。電極材料中に含まれている酸素が真

Fig. 4 Dependence of Spectrum Line Intensity on the Number of Breakdowns.

Fig. 5 Wave Forms obtained at the 1st Breakdown of Cu Electrodes.

- (a) Voltage across the Gap
- (b) Spectra of Oxygen (Solid line) and Cu (Broken line)

空中に脱離して発生するとすれば、Fig. 2 のように酸素と電極材料元素の両方のスペクトルが同時に観測されるはずである。従って、Fig. 5 は電極表面に付着している不純物（酸素）が絶縁破壊の発生を左右しているという推測を裏付けている。

Al の場合は全絶縁破壊回数500回を通じて酸素スペクトルの相対強度には顕著な変化が見られなかった。この原因として、Al は Cu や Fe に比べて融点が低いため絶縁破壊が電極材料自身に依存する可能性が Cu や Fe より高いことが考えられる。

4. ま と め

真空中の絶縁破壊における発光スペクトルのうち、電極材料元素と酸素の2つのスペクトルに着目して、それらの相対強度の変化と絶縁破壊電界特性の関係を Cu、

Fe、Al の3種類の材料の電極について調べた。その結果、1回目の破壊と50回目の破壊の間で酸素スペクトルの相対強度が激減し、代わりに電極材料元素スペクトルの相対強度の増加が見出され、その間の1回目から10回目の絶縁破壊電界の上昇が全500回絶縁破壊を通じて最大であった。このことから、絶縁破壊回数が10回程度のコンディショニング過程の初期の段階では、電極表面に付着している不純物が絶縁破壊特性に大きく影響を及ぼすものと結論づけられた。

〔文 献〕

1) G. R. Harrison: WAVELENGTH TABLES.

(THE M. I. T. PRESS. 1969).