

20-P33

## DC BREAKDOWN EXPERIMENT ON NIOBIUM ELECTRODES

E. KAKO, S. NOGUCHI, M. ONO, K. SAITO, T. SHISHIDO, S. YOSHIMOTO,  
Y. HASHIMOTO\*, T. ISHII\*, S. KOBAYASHI\*, H. MIWA\*\*,  
T. SUZUKI\*\* and T. HIGUCHI\*\*

KEK, National Laboratory for High Energy Physics  
1-1, Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305, Japan

## ABSTRACT

Breakdown field strength in ultrahigh vacuum at room temperature was investigated for several pairs of niobium electrodes treated by surface preparation techniques similar to the surface treatment of niobium superconducting cavities. The first breakdown field of 38 ~78 MV/m was obtained in the chemical polished and the electro-polished electrodes.

## ニオブ電極での直流絶縁破壊実験

## 1、はじめに

超高真空中でのギャップ放電において、電極間の絶縁破壊現象の原因となるものとして、1. 電界放出電子のジュール加熱による放出源（陰極）の熔融、2. 陰極からの電界放出電子の衝突による陽極の局所加熱による熔融、3. 電極表面上に存在する荷電原子や帯電微粒子群（クランプ）の対極への飛来、などが考えられる<sup>1)</sup>。超伝導空洞においても、同様に電界放出電子が最大加速電界を制限するおもな要因の一つとされ、表面上のマイクロサイズの微粒子（ゴミ、ホコリ、異種金属）や表面欠陥（微小突起、キズ、ピット、不完全溶接）などが放出源と考えられている。また、超伝導空洞内での放電現象によりその放電痕や飛散物が新たな電界放出電子の放出源となる可能性も考えられる。実際に、Lバンドの超伝導空洞の低温性能測定において高加速電界発生時、突然に空洞内の蓄積エネルギーが瞬時に消失し、その後、電界放出電子を原因とする $Q_0$ 値の著しい悪化が起こる現象が観測されている<sup>2)</sup>。空洞内の蓄積エネルギーの消失時に、真空度の悪化とX線の放出を伴うことから、空洞内での真空放電がこの現象の原因と推定される。したがって、超伝導空洞と同様な

表面処理を行なったニオブ電極を試料とする超高真空中でのギャップ放電により、その絶縁破壊電界の特性を知ることは、超伝導空洞における放電現象を理解するためにも重要である。

本研究においては、機械加工、化学研磨（CP）、電解研磨（EP）などにより表面処理されたニオブ電極について、絶縁破壊電界、放電後の電界増倍係数（ $\beta$ ）およびSEM写真による表面状態などが調べられた。

## 2、ニオブ電極および実験方法

ニオブ電極は、直径22mmの円盤状で対向面が半径18mmの曲面となる半球形状に旋盤により機械加工される。その後、表1に示されるような表面処理が行なわれ、最後にクリーンルーム内で超純水による超音波洗浄が行なわれた。

表1、ニオブ電極

サンプル	表面処理	熱処理	仕上げ
[I] #03/#04	CP 100 $\mu$ m	---	---
[II] #07/#08	machining	---	---
[III] #01/#02	CP 100 $\mu$ m	1400°C	CP 100 $\mu$ m
[IV] #05/#06	machining	1400°C	---
[V] #09/#10	EP 100 $\mu$ m	---	---
[VI] #11/#12	CP 100 $\mu$ m	---	---

\*, Saitama University

\*\*, Nomura Plating Co., Ltd.

実験は、埼玉大学工学部電力研究室において行なわれ、その実験装置については、小林らによって行なわれた無酸素銅電極についての実験に関する研究論文<sup>3)</sup>に詳細に記述されている。真空度  $10^{-8}$  Pa の超高真空容器内に同一の表面処理を行なった一対の陽極（上）と陰極（下）が取り付けられる。両極間のギャップ間隔は、0.3~10 mm の範囲で調整可能である。電極に印加される電圧は、インパルス電圧（立ち上がり 64  $\mu$ sec、立ち下がり 700  $\mu$ sec、最大 100 kV）あるいは直流高電圧（最大 100 kV）が使用された。

### 3、絶縁破壊実験の結果

サンプル [I]~[IV] については、インパルス電圧により 300 回の放電が繰り返され、サンプル [V], [VI] については、直流高電圧によりそれぞれ 10 回と 6 回めまでの放電実験が行なわれた。各サンプルの第 1 回、2 回、300 回めの放電における絶縁破壊電界が図 1 にまとめられている。サンプル [IV] の第 1 回めの絶縁破壊電界が 17 MV/m と他に比べ著しく低いのは、熱処理後に水洗しかされておらず、1400°C の熱処理時のチタン蒸気の付着や酸化膜などの表面汚染が原因と思われる。サンプル [I], [II], [III] の第 1 回めの絶縁破壊電界が 78, 48, 54 MV/m と高い値であるにもかかわらず、第 2 回めの絶縁破壊電界では著しく低下している。これは、1 回めの絶縁破壊において形成された放電痕による影響が考えられる。また、その後の 300 回の放電によりサンプル [III] ではコンディショニングの効果がみられ、220 MV/m までの高電界が達成された。このサンプルは、1400°C の熱処理がされていることから、ニオブ中

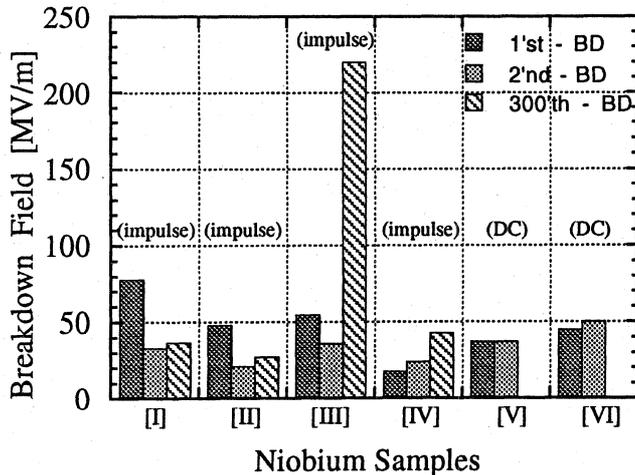


図 1、各サンプルにおける絶縁破壊電界

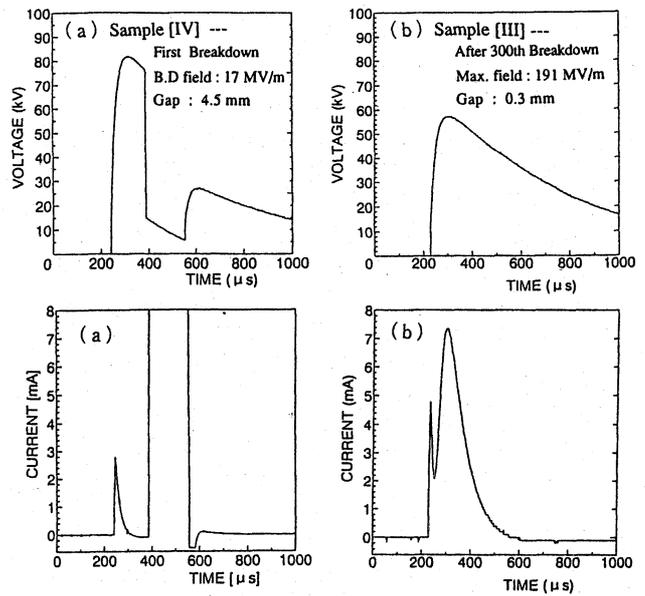


図 2、放電時 (a) および 300 回放電後 (b) における電圧、電流波形

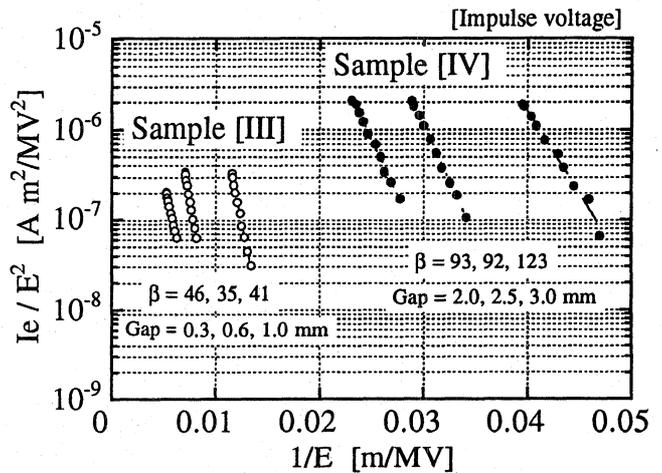


図 3、F-Nプロット (インパルス電圧)

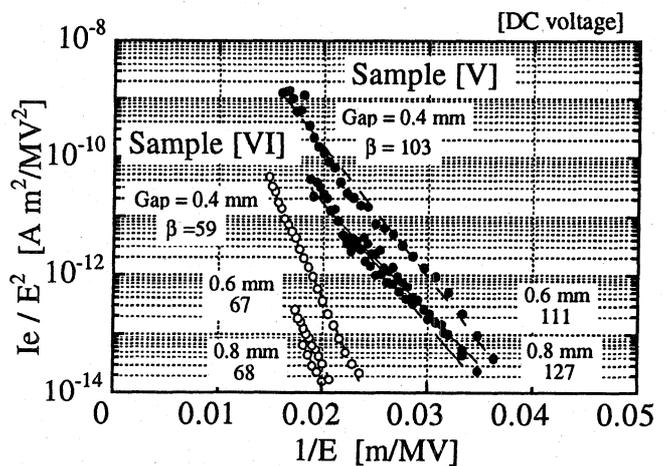


図 4、F-Nプロット (直流高電圧)

に含まれる吸蔵ガスの放出量、あるいは結晶粒の成長などとの関係があるように思われる。

インパルス電圧印加時における電圧、電流波形の例を図2に示す。電圧の急峻な立ち上がり時には、その時間微分に相当する変位電流が流れる。図2(a)に示されるサンプル[IV]の第1回めの放電では、絶縁破壊の前徴となるような前駆電流はみられず、いきなり放電に至っている。このときの破壊電流は、 $\sim 200$  mA であり、電極で消費されるエネルギーは、超伝導空洞の蓄積エネルギーと同程度の数ジュールである。コンディショニングにつれて図2(b)のように、電界放出電子による前駆電流が観測されるようになるが、必ずしもこれが、放電に移行するわけではない。

電界放出電子による電流値 ( $I_e$  [A]) と表面電界 ( $E$  [MV/m]) は、次式で与えられる Fowler-Nordheim の式で表され、この F-N プロットにより電子増倍係数 ( $\beta$ ) が求められる。

$$I_e = C_1 S (\beta E)^2 \exp(-C_2/\beta E)$$

ここで、 $S$  [ $m^2$ ] は放出源の面積、 $C_1$ 、 $C_2$  は定数でありニオブの仕事関数を  $4$  eV とするとき、 $C_1 = 7.0 \times 10^7$ 、 $C_2 = 5.2 \times 10^4$  である。図4、図5にサンプル[III]~[VI]の F-N プロットを示す。得られた  $\beta$  の値は、 $40 \sim 130$  でありギャップ間隔や放電回数によって大きな変化はしない。放出源のサイズは、数ミクロン以下のオーダーであり、コンディショニングにつれて徐々に小さくなっていく傾向がある。Lバンドの超伝導空洞で観測される高周波電界による電界放出電子の  $\beta$  の値は、通常  $200 \sim 450$  であり、この場合より大きい。

#### 4、ニオブ電極表面の SEM 写真

放電実験の前後における電極の表面状態が、SEMにより観測された。図5に示される直流高電圧による10回の放電（絶縁破壊電界  $70$  MV/m、破壊直前の電流  $0.2$   $\mu$ A）後の陰極では、電極の中心付近の直径  $\sim 30$   $\mu$ m の範囲内でのみ、直径  $0.1 \sim 2$   $\mu$ m の放電痕が数十個発見された（陽極では、特に変化なし）。放電が同時に数ヶ所で起こり、同じ場所で繰り返すようである。一方、図6に示されるインパルス電圧による300回の放電後の陰極では、度重なる放電により放電痕は  $\sim 10$   $\mu$ m 以上になっており、溶融物の付着もみられるが、このような表面状態でも  $220$  MV/m の絶縁破壊電界が達成される。



図5、10回放電（直流）後の電極表面  
（サンプル[VI]-陰極）

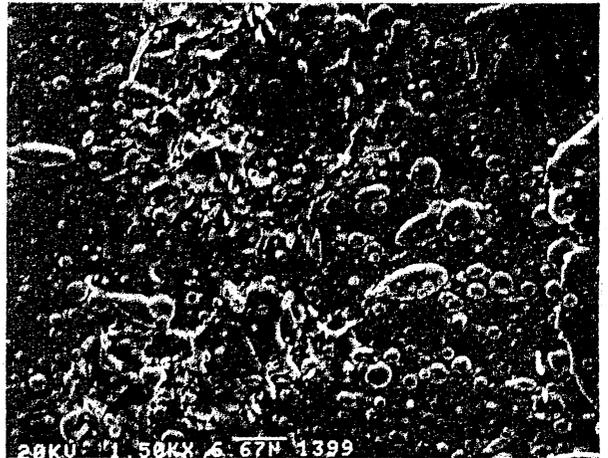


図6、300回放電（インパルス）後の  
電極表面（サンプル[III]-陰極）

#### 5、まとめ

本実験により、超高真空中でのニオブ電極の絶縁破壊が超伝導空洞の放電現象と同程度の電界強度で起こり、放電後に絶縁破壊電界の低下を引き起こす場合もありうることが示された。しかし、絶縁破壊の始まりが何に起因するかは明確ではなく、熱処理の効果も含めて、今後、さらに検討をすることが必要である。

#### 参考文献

- 1) D. Alpert, et. al., J. Vac. Sci. Technol., vol.-1, p35-50, (1964).
- 2) E. Kako, et. al., Proc. of the 6th Workshop on RF Superconductivity, CEBAF, Newport News, (1993); KEK Preprint 93-207.
- 3) S. Kobayashi, et. al., IEEE Trans. on Electr. Insul., vol.-28 No.4, p500-506, (1993).