

JAERI-Research

98-029



プラズマ溶射によって形成されたアルミナ電気絶縁  
コーティング膜の繰り返し衝撃荷重に対する耐久性

1998年6月

金成守康・阿部哲也・榎枝幹男・豊田真彦<sup>\*</sup>  
馬越俊光<sup>\*</sup>・清水克祐<sup>\*</sup>・森 順二<sup>\*\*</sup>・高津英幸

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所

プラズマ溶射によって形成されたアルミナ電気絶縁コーティング膜の  
繰り返し衝撃荷重に対する耐久性

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

金成 守康・阿部 哲也・榎枝 幹男・豊田 真彦\*

馬越 俊光\*・清水 克祐\*・森 順二\*\*・高津 英幸†

(1998年5月8日受理)

プラズマ溶射によってステンレス鋼基材上にNi-Cr中間層を介し形成されたアルミナ電気絶縁コーティング膜（アルミナ膜、膜厚 228 μm）の衝撃荷重に対する耐久性を明らかにするため、アルミナ平端面の接触を伴う落錘試験を用いて繰り返し衝撃荷重（衝撃応力 638MPa）に対する電気絶縁耐久性 (>2,000 MΩ, 1 kV) の劣化を評価した。繰り返し衝撃荷重に対するアルミナ膜の電気絶縁耐久性は、70,000回以上だった。また、アルミナ膜の破壊は、ピンホール状（最大直径約 100 μm）に進行し（76,828回において11個所）、膜の剥離はNi-Cr中間層との接合界面で発生した。絶縁破壊に至るまでのアルミナ膜の経時変化を調べるために、所定の回数だけ落錘試験を行った結果、アルミナ膜厚は、落錘試験開始時 228 μm であったが、衝撃回数に比例して直線的に減少し、その減少率は2.43nm/回であった。絶縁破壊時のアルミナ膜厚は落錘試験開始時の約21%であり（約50 μm）、その断面はアルミナ層とNi-Cr中間層との混在相を示した。一方、Ni-Cr中間層の厚さは、試験前後で変化せず約50 μmのままであった。アルミナ膜の硬さは、落錘試験開始時にH<sub>v</sub>=1119であったが、38,000回の時点でその76%に減少し、絶縁破壊時には62%に減少した。

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山801-1

+ I T E R 業務推進室

\* 三菱重工業株式会社

\*\* 原子力エンジニアリング株式会社

Durability of Alumina Electrical Insulation Films by Plasma  
Spraying Coating Method under Repeated Impact Loads

Moriyasu KANARI, Tetsuya ABE, Mikio ENOEDA, Masahiko TOYODA<sup>\*</sup>,  
Toshimitsu UMAKOSHI<sup>\*</sup>, Katsusuke SHIMIZU<sup>\*</sup>, Junji MORI<sup>\*\*</sup> and Hideyuki TAKATSU<sup>\*</sup>

Department of Fusion Engineering Research  
Naka Fusion Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 8, 1998)

Durability of dielectric breakdown ( $> 2,000 \text{ M}\Omega$ , 1 kV) characteristics of alumina electrical insulation films (alumina films, thickness  $228 \mu\text{m}$ ) has been examined by applying repeated impact loads to alumina films plasma spray coated on a stainless steel substrate with a Ni-Cr intermediate layer. In the present experiment, alumina overcoated specimens having flat ended surfaces were impacted with a stress of 638 MPa. Alumina films have shown high durability of greater than 70,000 cycles under the repeated impact loads. And local fracture of the alumina films was observed at some pinholes of about  $100 \mu\text{m}$  diameter at the maximum, eleven holes in total at 76,828 cycles, and the local exfoliation of the alumina film was observed between alumina film and Ni-Cr intermediate layer. To examine the evolutions of the thickness and hardness of the alumina film, cross-sectional SEM observation and hardness measurement were performed for some specimens after the predetermined cycles. As the results, the thickness of alumina films of an as-received specimen was  $228 \mu\text{m}$ , and linearly decreased as the increase of the number of the impact load cycles by the rate of 2.43 nm/cycle. When the dielectric breakdown occurred in a specimen, the thickness of the alumina film was only about 20% ( $50 \mu\text{m}$ ) of that of the as-received one and the cross-sectional view of alumina film exhibited a duplex region of Ni-Cr and alumina layers. While the thickness of Ni-Cr intermediate layers after the test was almost the same as that of the as-received one of  $50 \mu\text{m}$ , even in the specimen in which dielectric breakdown occurred. Hardness of the as-received alumina film was  $H_V=1119$ , and decreased with the increase of the number of the load cycles; 76% of the as-received one at 38,000 cycles and finally 60% at 76,828 cycles, respectively.

---

<sup>\*</sup> Office of ITER Project Promotion

<sup>\*</sup> Mitsubishi Heavy Industries, LTD.

<sup>\*\*</sup> Nuclear Engineering, Co. LTD.

**Keywords:** Durability, Alumina, Insulation Coating Film, Plasma Spraying, Repeated Impact Load, Dielectric Breakdown

This is a blank page.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 試験方法 .....	1
3. 結果および考察 .....	2
3.1 落錘試験 .....	2
3.2 アルミナ膜の電気絶縁耐久性 .....	3
3.3 アルミナ膜厚および硬さの経時変化 .....	4
4. まとめ .....	5
謝 辞 .....	6
参考文献 .....	6

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Experimental .....	1
3. Results and Discussions .....	2
3.1 Repeated Impact Load Test .....	2
3.2 Durability of Alumina Electrical Insulation Coating Films .....	3
3.3 Elapsed Changing Film Thickness and Hardness .....	4
4. Summary .....	5
Acknowledgement .....	6
References .....	6

This is a blank page.

## 1. はじめに

高電磁場環境下で運転する磁場閉じ込め核融合炉において、炉内構造物に誘起されるうず電流と磁場とが、相互作用することにより強力な電磁力が発生する。このため、各炉内構造物間を電気的に絶縁して渦電流流路長および電流値を減らし発生電磁力を低減化することは炉内構造物の健全性保持の観点から重要な技術的課題である。

酸化物セラミックスであるアルミナは、耐熱性に優れ、金属に比べ電気絶縁性が格段に高く、化学的に安定であるため、高温下で使用されるブランケットなどの電気絶縁材として有望である。一方、アルミナは、セラミックスであるため金属に比べ韌性が低く脆性破壊を引き起こす、また、製造法が熱焼結法であるため任意の形状に成型することが困難である、などの問題があり、構造部材の絶縁材としてあまり用いられていなかった。

プラズマ溶射法は、物理蒸着法(PVD, Plasma Vapor Deposition)、化学蒸着法(CVD, Chemical Vapor Deposition)などのコーティング法に比較して大気中での膜の形成が可能であること、膜の形成速度が速いこと、コーティング基材に対する制約も少ないと等から最も一般的に用いられているコーティング技術である。小野塚ら[1]は、核融合炉炉内構造物の絶縁材としてプラズマ溶射法によるアルミナコーティング膜を開発し、その密着性、熱衝撃や摺動負荷に対する健全性および絶縁破壊電圧などを実験的に評価した。

核融合炉では、運転時に炉内構造物同士が衝突し、表面に形成された絶縁コーティング膜が損傷することが予想される。このため、繰り返し衝撃荷重に対する絶縁コーティング膜の機械的・電気的耐久特性を明らかにすることは重要である。本研究では、自作した落錐試験機を用いて、小野塚ら[1]の手法に基づいて製作されたアルミナコーティング膜の衝撃荷重耐久性を調べた。さらに、衝撃回数やコーティング膜の電気絶縁特性とコーティング膜厚および硬さの変化の関連に着目し、耐久性試験と平行して膜厚測定や硬さ測定および組織観察を行った。以下、2章では試験方法、3章では試験結果を示すとともにそれらを考察し、4章でまとめを行った。

## 2. 試験方法

Table1に絶縁コーティングに要求される主な性質とアルミナセラミック焼結材の特性[1, 2]を示す。アルミナは、高融点材料であり、高温における電気抵抗が高く、電気絶縁材として良好な性質を有することがわかる。供試材には、80%Ni-20%Cr中間材(層)を介しアルミナ膜(膜厚 228 μm)をプラズマ溶射したSUS316材(試験片 1 : φ 10 mm × 20 mm, 試験片 2 : φ 20 mm × 20 mm)を用いた。Ni-Cr中間層およびアルミナ膜のコーティング条件[1]をTable2に、供試材の主要な寸法および外観をそれぞれFig. 1およびFig. 2(a)に示す。繰り返し衝撃荷重に対する耐久性を評価する試験方法は未だ規格化されていないため、本研究では、落錐試験機を自作し試験に供した。試験機の概略をFig.3に示す。試験片1は、アルミナ膜面が下向きとなるように所定の錐(錐を含めた試験片1の質量  $m_1$ )にネジ止めされ、試験片2は、アルミナ膜面が上向きとなるよ

うに試験機架台にネジ止めされている。固定後、試験片1は、錘と共に一定の試験片間の距離 $h$ になるまで引き揚げられた後、試験片2上に自由落下され、両試験片にコーティングされたアルミナ膜は相互に衝突する。また、両試験片は、接触状態を一定に保つために、治具に固定してからそれぞれ錘および試験機に取り付けられ、錘は直線形ガイドで支持され平行移動する。今回の試験では、 $m_1$ および $h$ は、それぞれ12 kg、20 mm一定とした。

本研究において、二種類の試験を行った。すなわち、第一に、繰り返し衝撃に対するアルミナ膜の電気絶縁性の耐久性を調べるために、2個の試料について絶縁破壊が発生するまで落錘試験を繰り返した。また、アルミナ膜の破壊形態を明らかにするために、絶縁破壊部に露出した金属組成の定性分析を行った。第二に、衝撃回数に対するアルミナ膜の表面様相、膜厚および機械的性質の経時変化を調べるために、所定の衝撃回数(1,000, 38,000, 63,500, 76,828回)まで落錘試験を繰り返した後の各試料について、表面および切断面の表面観察および表面硬さ測定を行った。アルミナ絶縁破壊の有無は、任意の衝撃回数毎に両試験片を台座ごと取り外し、絶縁抵抗計YIC-321225<sup>1)</sup>を用い、JIS規格(JIS C 1302)に従い測定した。また、試料の取り付け位置関係から、試験片2上には試験中の損耗粉が堆積することが予測されたため、測定は、堆積物の絶縁破壊測定への影響を防ぐため試験片1で行った。測定において、印加電圧は1 kVとし、アルミナ膜の電気抵抗が2000 MΩ以下に減少した衝撃回数を両試験片の絶縁破壊回数 $n_d$ と規定した。絶縁破壊部の組成分析には電子プローブマイクロアナライザ(EPMA, Electron Probe MicroAnalyzer)JXA-8600<sup>2)</sup>を、表面観察には光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡(SEM, Scanning Electron Microscope)JSM-5410<sup>2)</sup>を、硬さ測定はヴィックカース微小硬さ試験機MHT2<sup>3)</sup>をそれぞれ使用した。また、硬さ試験における荷重は、9.81Nとした。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 落錘試験

本試験において、著者らは、試験片の衝突時に生ずる衝撃応力 $\sigma_i$ と単位面積当たりの吸収エネルギー $E_i$ を試験指標とした。Fig. 3に示すように、錘を負荷された試験片1(質量 $m_1$ )が、試験片2上へ自由落下した時の衝撃荷重 $F$ は、以下の通りである。試験片1が有する位置エネルギーが、すべて運動エネルギーに費やされると仮定すると、

$$m_1gh = \frac{1}{2}m_1v_1^2 \quad \text{あるいは} \quad v_1 = \sqrt{2gh}, \quad (1)$$

ここで、 $g$ : 重力加速度、 $v_1$ : 衝突速度である。衝突時の $m_1$ の運動量変化は、 $m_1$ から $m_2$ に及ぼされる力積に等しいので、

$$m_1(v_1 - v_2) = F \cdot t, \quad (2)$$

<sup>1)</sup>横河電機株式会社

<sup>2)</sup>日本電子株式会社

<sup>3)</sup>松沢精機株式会社

ここで、 $t$ ：衝突時間。式(1)を式(2)に代入し整理すると、

$$\begin{aligned} F &= m_1(v_1 - v_2)/t \\ &= m_1(\sqrt{2gh} - v_2)/t, \end{aligned} \quad (3)$$

よって、 $\sigma_i$ は、

$$\begin{aligned} \sigma_i &= F/A, \\ &= m_1(\sqrt{2gh} - v_2)/(At), \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $A$ ：衝突時の接触面積。また、 $E_i$ は、 $m_1$ の持つ位置エネルギーがすべて衝撃エネルギーに変換されると仮定すれば、

$$E_i = m_1gh/A. \quad (5)$$

式(3)において、 $t$ は衝突時に生ずる試験片の振動の加速度成分  $a_y$  を振動計(デジタル振動計 BBN821M<sup>4)</sup>、圧電型加速度測定子 BBN508B<sup>5)</sup>)で測定し求めた。衝突時、 $F$ は瞬時に試験片1から試験片2に伝達される。また、 $F$ は本質的に質量と加速度との積で表わされるので、試験片同士がある加速度で下向きに運動している時間を  $t$  とみなせる。なお、加速度の測定は、試験片に直接、加速度測定子を取り付けることが困難であることから、試験片に近い架台上で行い、Fig.4に示す代表的な測定結果より、 $t=150\ \mu s$ を得た。式(1)より  $v_1$ を求め、 $v_2 = 0, m_1, t, h$  および  $A$  を式(3)、式(4)および式(5)に代入し算出した  $F, \sigma_i$  および  $E_i$  は、それぞれ 50.1 kN、638 MPa および 300 J/m<sup>2</sup>である。なお、試験条件( $m_1$  および  $h$ )は、 $\sigma_i$ によって基材SUS316が著しく塑性変形しないように、基材の0.2%耐力(205 MPa[3])から決定した。

### 3.2 アルミナ膜の電気絶縁耐久性

絶縁破壊に至る衝撃回数値の再現性を確認するために、同一条件の落錐試験を、2回実施した。その結果、両試料は、それぞれ76,828、79,500回で絶縁破壊(各1個所)が確認され、良好な再現性を示した。絶縁破壊が確認された試料(76,828回)について、外観および表面観察した結果を、それぞれ Fig.2(b) および Fig.5 に示す。両試験片は、接触周縁部において著しい損傷を示し、その幅はそれぞれ 1.40 ~ 2.54 mm および 1.58 mm ~ 2.17 mm であった。これは、平面接触では、その圧力分布が周縁部で最大となるため(エッジ効果)[4]、優先的に損耗が起こったと推測できる。本試験では、この周縁部を除いた試験片中心部で絶縁破壊を測定した。試験前後における試験片表面のSEMによる観察像を、Fig.6に示す。ここで、(a)受け入れ材、(b)試験片1、(c)試験片2(接触部)および(d)試験片2(非接触部)である。Fig.6(a)より、受け入れ材は、粒径5μm以下のアルミナ粒状結晶が部分的に観察されるが、主として大きさ 10 ~ 50 μm の多孔性アルミナ組織である。この多孔性組織は、プラズマ溶射時に液相まで加熱されたアルミナ相が瞬時に試験片表面に吹き付けられ凝着してできたと推測できる。一方、Fig.6(b),(c)より、試験後のアルミナ膜表面に

<sup>4)</sup>アステック株式会社

<sup>5)</sup>ティアック株式会社

は、大きさ  $50 \sim 100\mu\text{m}$  程度の押しつぶされた組織が観察されるが、受け入れ材で観察された空孔は見られない。また、両試験片間での表面性状の差は見られなかった。また、試験後の表面粗さ  $R_a$  は、受け入れ材の  $3.86\mu\text{m}$  から  $1.88\mu\text{m}$  に減少した。従って、これらの組織は、アルミナ層表面の多孔性溶着組織が、繰り返し衝撃試験により、押しつぶされてアルミナ膜表面に付着したと推測できる。**Fig.6(a)** および (d) より、試験後、試験片 2 の非接触部上には、受け入れ材では観察されなかつた  $1\mu\text{m}$  以下の微小粒が観察される。これらの微小粒は、試験後の両試験片接触部でも観察されており、試験中に生じたアルミナの損耗粉であると推測できる。試験後のアルミナ層の破壊は、その大きさが最大で約  $100\mu\text{m}$  の穴状に発生し、その数は 11 個所であった。このうち、絶縁破壊は、最大のアルミナ膜破壊部でのみ確認された。**Fig.7** に、絶縁破壊部の光学顕微鏡像 (a)、SEM 像 (b)、EPMA 定性分析結果 (Al(c), Ni(d), Cr(e) および Fe(f)) を示す。**Fig.7** より、絶縁破壊部は、他の部分に比べ、アルミナ表面層の Al 成分が少なく、下地成分である Ni および Cr が検出されている。一方、基材 SUS 成分である Fe は検出されない。このことから、アルミナコーティング膜の剥離は、アルミナ / Ni-Cr 中間界面で生じたことがわかる。

### 3.3 アルミナ膜厚および硬さの経時変化

アルミナコーティング膜厚の経時変化を調べるために、0(受け入れ材, (a)), 1,000(b), 38,000(c), 63,500(d), 76,828(e) の各回数まで繰り返し試験を行った試験片 1 の切断面 SEM 像を **Fig.8** に示す。**Fig.8** より、受け入れ材における初期厚さ  $\delta_i$  は  $228\mu\text{m}$  であるが、繰り返し衝撃回数が増加するにしたがって、膜厚は明らかに減少している。また、絶縁破壊を起こした 76,828 回 (**Fig.8(e)**)において、試験片の表層は、アルミナと Ni-Cr 層の混在相を示している。このことから、試験中、アルミナは徐々にその厚さが減少し、最終的に、アルミナ-Ni-Cr 中間層間で剥離が生じ絶縁破壊に至ったと推定できる。しかし、アルミナ層がピンホール状に剥離した部分以外では、絶縁破壊を起こした 76,828 回においてさえ、アルミナ / Ni-Cr 層間にき裂は観察されなかつた。**Fig.8**において観察したアルミナ層(空丸)および Ni-Cr 中間層(空三角)の膜厚  $\delta$  を繰り返し回数  $n$  に対して整理した結果を、**Fig.9** に示す。また、参考のため、試験片 2 におけるアルミナ層(実丸)および Ni-Cr 層(実三角)の膜厚変化も同様に示す。**Fig.9** より、試験片 1 のアルミナ膜厚は、繰り返し衝撃回数の増加に対して直線的に減少し、76,828 回における厚さは  $50\mu\text{m}(0.21\delta_i)$  だった。また、膜厚減少率は、 $2.43\text{ nm}/\text{回}$  であった。この事実は、**Fig.8** における観察結果から推察されたように膜厚が徐々に減少したことを探しておらず、本コーティング膜を繰り返し衝撃荷重を受ける構造物などに適用する場合に重要である。すなわち、セラミックス材であるアルミナは、韌性が低いため、衝撃荷重に対して低衝撃回数で急速破壊を起こす懸念がある。しかしながら、本試験結果から、 $638\text{ MPa}$  の高い衝撃応力下において、アルミナ膜は急速破壊、剥離を起こさず、76,828 回まで徐々にその厚さを減少する傾向を示したことから、繰り返し衝撃荷重を受ける構造物へ本コーティング膜を適用することが可能であることを示唆している。

アルミナコーティング膜の機械的性質の経時変化を調べるために、0, 1,000, 38,000, 63,500, 76,828 の各回数まで繰り返し衝撃荷重を負荷した試験片 1(空丸)の表面硬さの測定結果を **Fig.10** に示す。

また、参考のため、試験片 2(実丸)におけるアルミナ硬さ変化も同様に示す。Fig.10より、受け入れ材のアルミナ膜硬さ  $H_{Vi} = 1119$  は、焼結材に比べ約 20% 低い。また、衝撃回数 1,000 における試験片 1 の硬さは、ほぼ  $H_{Vi}$  に等しく、アルミナ膜硬さについての機械的性質が変わらないことを示している。一方、38,000 および 63,500 回における硬さは、 $0.76H_{Vi}$  に減少している。しかし、Fig.8 より、アルミナ層中にクラックなどは観察されていない。このことから、この硬さの減少は、Fig.6(b),(c) で観察された表面上に存在する箇状の付着物の影響であると推定できる。すなわち、この付着物は、化学的に結合したアルミナではなく、また、付着物とアルミナ膜表面間には隙間があり、アルミナ膜より硬さが低い付着物に硬さ試験機の圧子を押し込んだために見かけ上、硬さが減少したと考えられる。76,828 回における硬さは、更に減少し  $0.62H_{Vi}$  だった。これは、Fig.8(e) で観察されたように、この回数におけるアルミナ膜厚が  $50\mu\text{m}(0.21\delta_i)$  まで減少したため、硬さの低い下地 Ni-Cr 中間層 ( $H_V = 150 \sim 250$ ) の影響を受け、硬さが減少したものと考えられる。Mulhearn ら [4, 5, 6] の観察から、金属のヴィッカース押し込みの場合、圧痕下に形成される塑性応力場は、深さ方向に対角線長さの約 1.5 倍程度であることが示されている。本試験の硬さ測定における圧痕の対角線長さは、 $40 \sim 50\mu\text{m}$  であり、明らかに塑性応力場が Ni-Cr 中間層まで達したと推測できる。

#### 4. まとめ

プラズマ溶射によってステンレス鋼(SUS316)基材上に Ni-Cr 中間層を介し形成されたアルミナ電気絶縁コーティング膜(アルミナ膜)の繰り返し衝撃荷重(衝撃応力 638MPa)に対する電気絶縁耐久性(> 2,000 MΩ, 1kV)を明らかにするため、アルミナ平端面の接触を伴う落錘試験を用いて評価し、次の結論を得た。

- 1) 繰り返し衝撃荷重に対するアルミナ膜の電気絶縁耐久性は、70,000 回以上であった。
- 2) アルミナ膜の破壊は、ピンホール状に進行し(最大直径 約  $100\mu\text{m}$ 、76,828 回の繰り返し衝撃回数において 11 個所)、剥離は Ni-Cr 中間層との接合界面で発生した。
- 3) アルミナ膜が絶縁破壊に至るまでの膜厚および機械的性質の経時変化を調べるために、所定回数の落錘試験後の試料についてアルミナ膜の表面および断面の SEM 観察および表面の微小硬さ測定を行った。その結果、
- 4) 一方、表面硬さは、38,000 回の時、受け入れ材に比較して 76% に減少し、絶縁破壊時には約 62% に減少した。これら硬さの減少は、a) アルミナ膜表面の付着物の硬さの影響、b) アルミ膜厚の減少による Ni-Cr 中間層の硬さの影響、それぞれに起因しているものと推定される。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、試験装置の使用を許可して頂き、また多くの援助と助言を頂きました衛藤 基邦 室長、深谷 清 氏(現 東海研究所 界面工学研究室)をはじめとする東海研究所 高温材料強度研究室の方々、EPMA 分析にご助力頂きました NBI 加熱研究室 大楽 正幸 氏に深く感謝致します。また、落錐試験の遂行にご助力頂きましたブランケット研究室 矢野 篤 氏(現 (株)大阪真空機器製作所 八王子工場)、猪原 崇 氏に深く感謝致します。最後に本研究にあたり、多くのご支援を頂きました那珂研究所 太田 充 所長、永島 孝 研究主幹、核融合工学部 松田 慎三郎 部長、関 泰 次長およびブランケット工学研究室の方々に深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] Onozuka, M., Tsujimura, S., Toyoda, M., Inoue, Abe, T. and Murakami, Y.: Fusion Technology, 29, 73(1996).
- [2] 中小企業事業団・中小企業研究所：“材料利用ハンドブック”，日刊工業新聞社，東京，111(1988).
- [3] Edited by Boyer, H.E. and Timothy, T.L. : "Metals Handbook", American Society for Metals, Ohio, 15.4(1985).
- [4] Johnson, K.L. : "Contact Mechanics", Cambridge University Press, Cambridge, 35(1985).
- [5] Samuels, L.E. and Mulhearn, T.O. : J. Mech. Phys. Solids, 5, 125(1957).
- [6] Mulhearn, T.O. : J. Mech. Phys. Solids, 7, 85(1959).

Table 1: Requirements of Alumina films.

Required Properties	Insulation materials	Alumina(Sinter)
Environment	Atmosphere and vacuum	—
Temperature (K)	623	2323(Melting point)
Electrical resistivity ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	$> 2 \times 10^3$	$3.0 \times 10^{12}$ (673K)
Dielectric breakdown voltage (V)	$> 1000$	—
Vickers hardness	—	$\geq 1400$

Table 2: Coating Conditions of Plasma Spraying Method on Alumina film.

Coating Meterials	80%Ni-20%Cr	Alumina
Environment	Atmosphere	Atmosphere
Working gas	Ar+H <sub>2</sub>	Ar+H <sub>2</sub>
Power (kW)	37	44
Working Distance (mm)	120	120
Traversing speed (m/min)	20	20

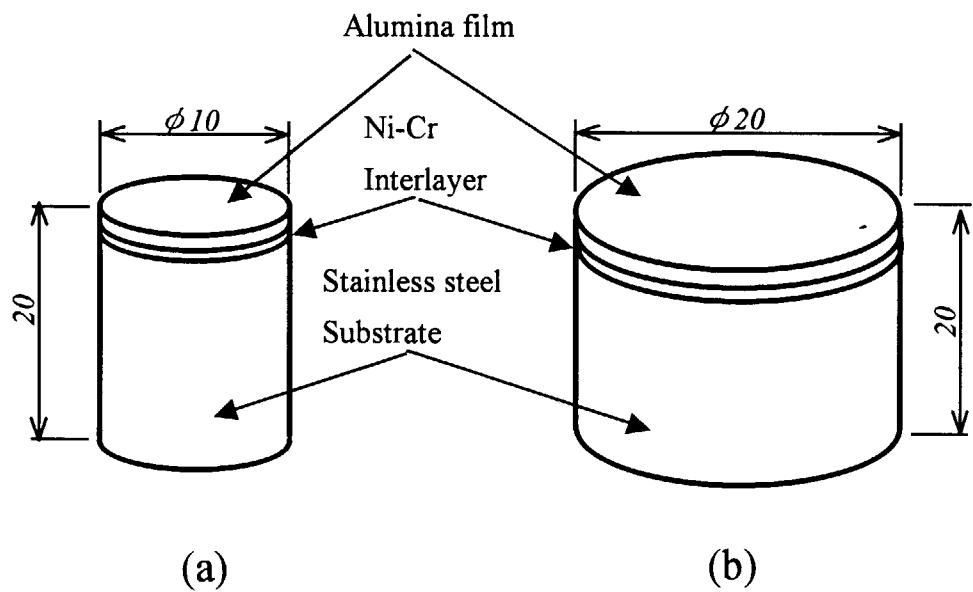
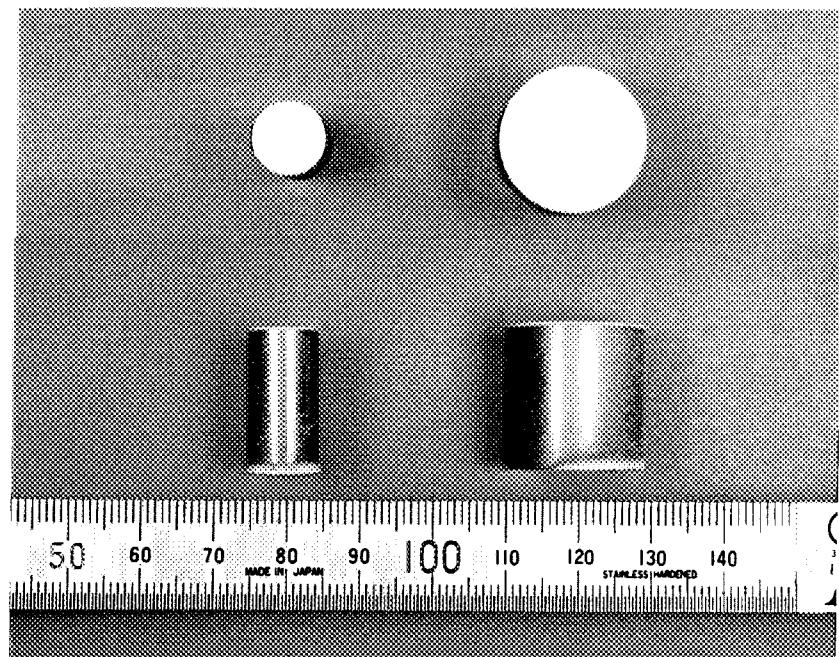
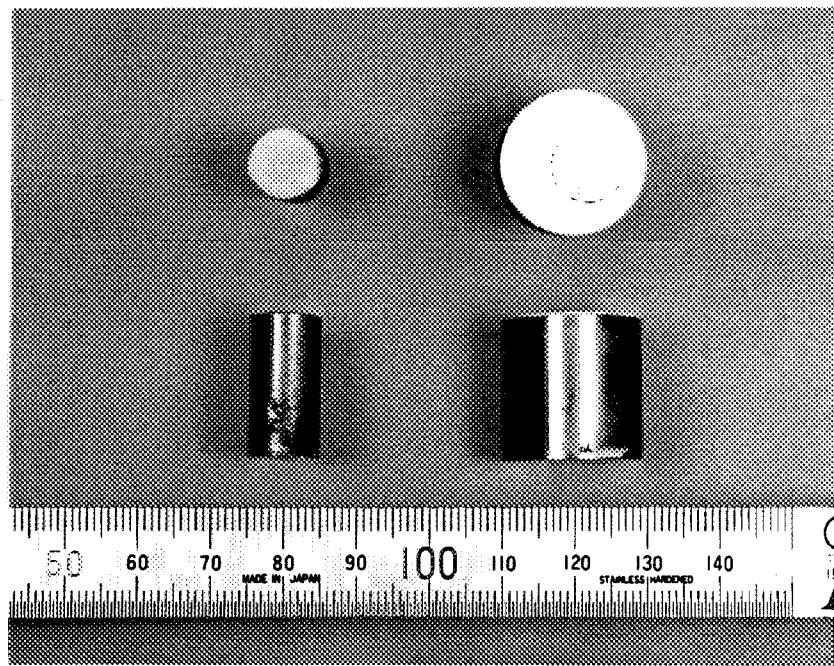


Fig. 1: Specific Configurations of Specimens. (a) Specimen 1 and (b) Specimen 2.



(a) As coated



(b) After 76,828 cycles

Fig. 2: Macroscopic Appearance of As-received and Dielectric Breakdown Specimens.  
(a)As coated and (b)Dielectric Breakdown(after 76,828 cycles).

This is a blank page.

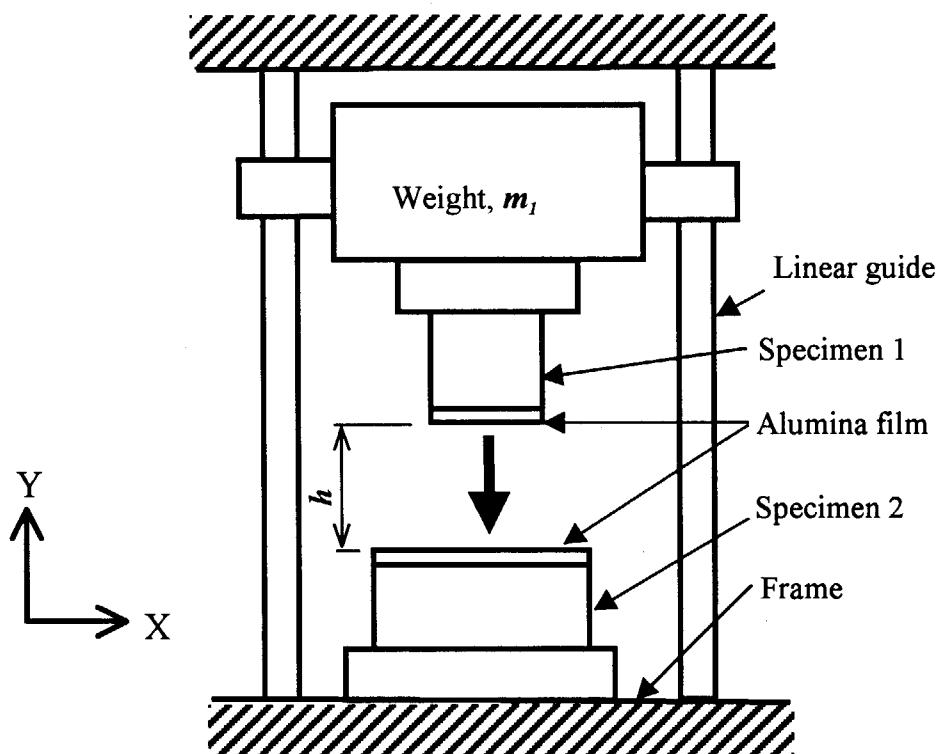


Fig. 3: Schematic Drawing of Experimental Setup.

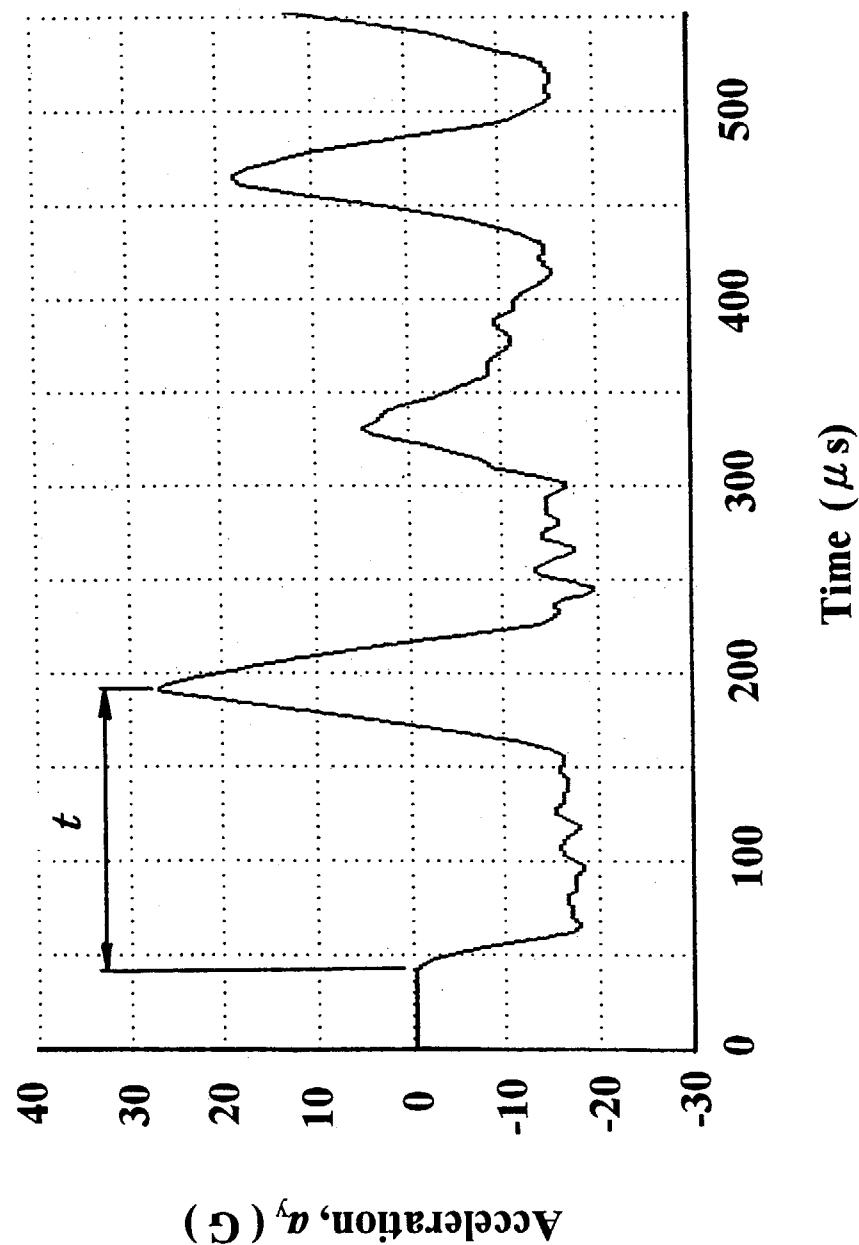
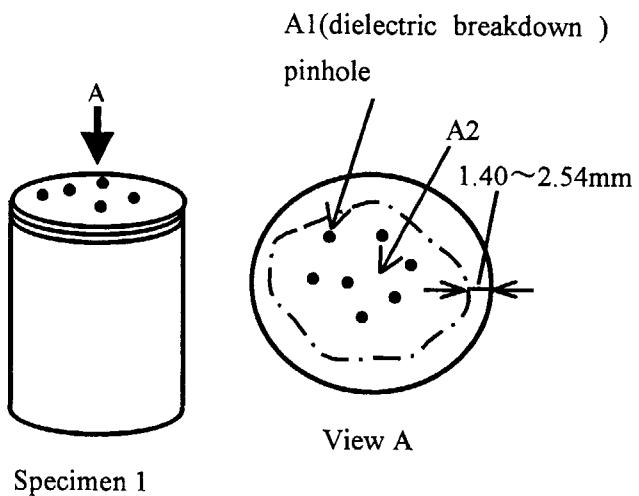
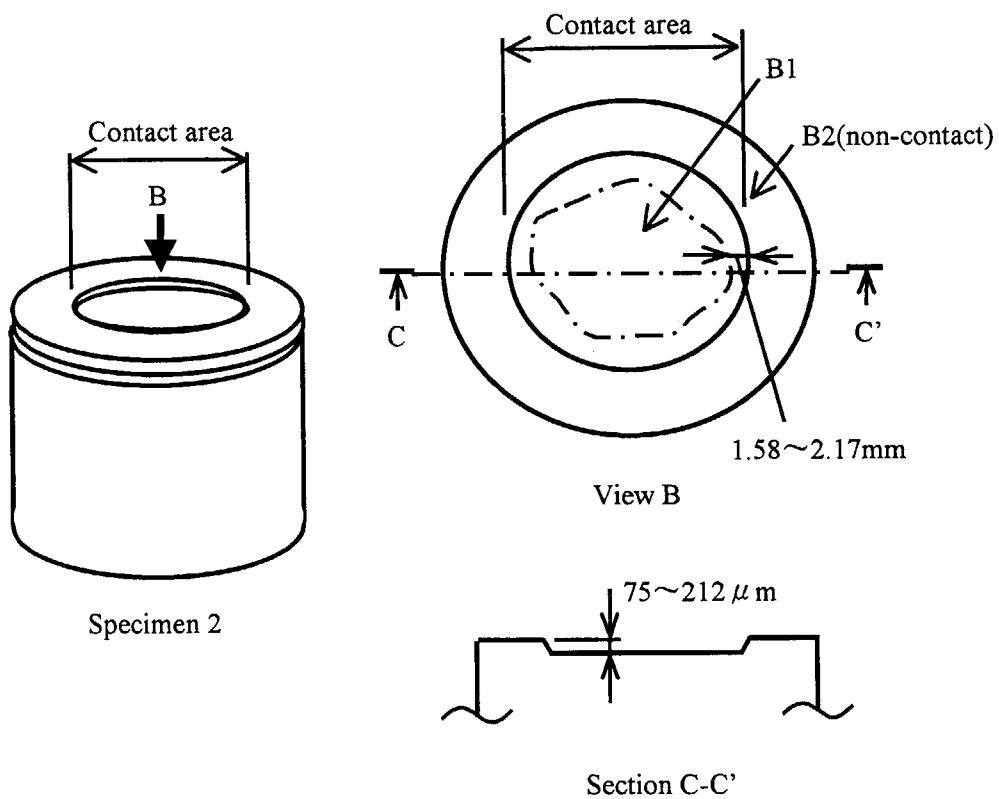


Fig. 4: Measured Datum on Acceleration of Sample.

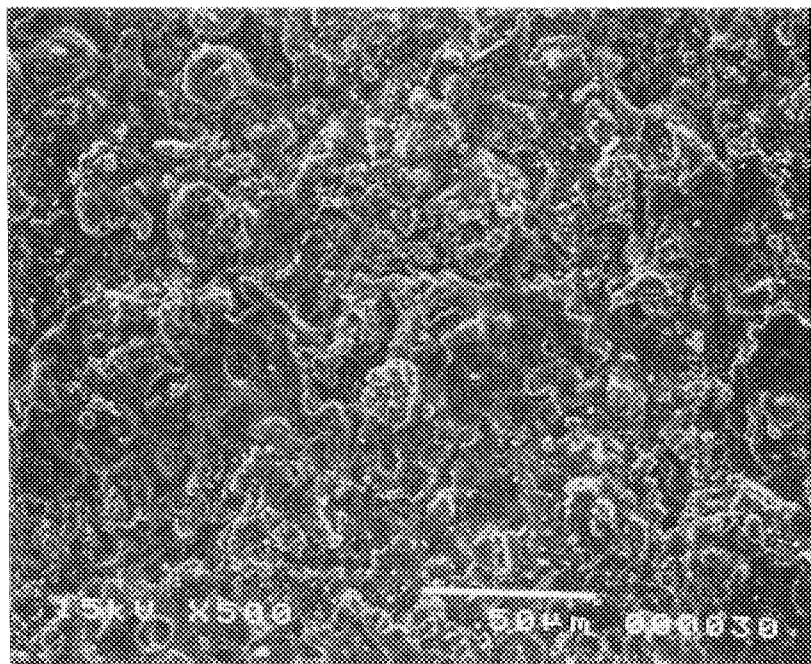


**(a) Specimen 1**

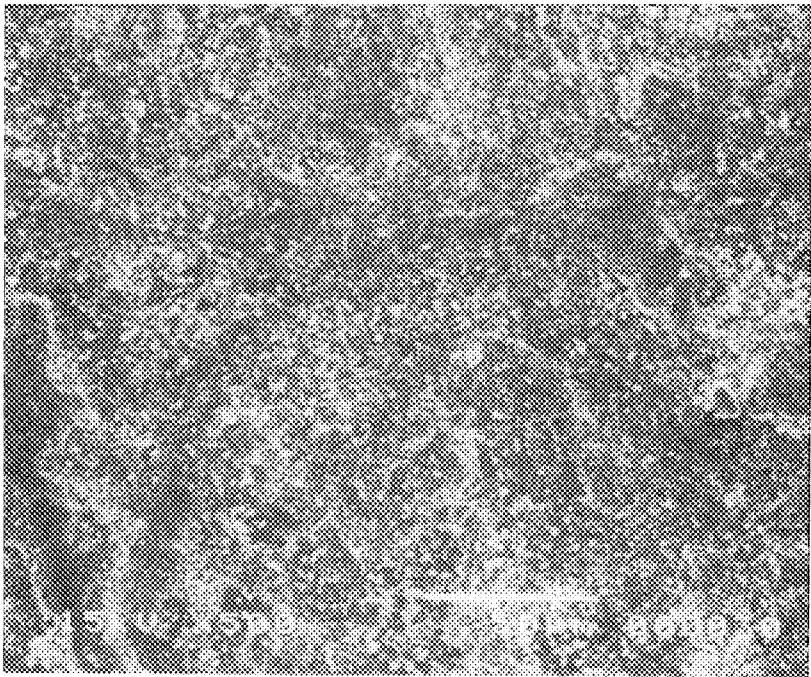


**(b) Specimen 2**

Fig. 5: Sketches of the Dielectric Breakdown Specimens. (a) Specimen 1 and (b) Specimen 2.

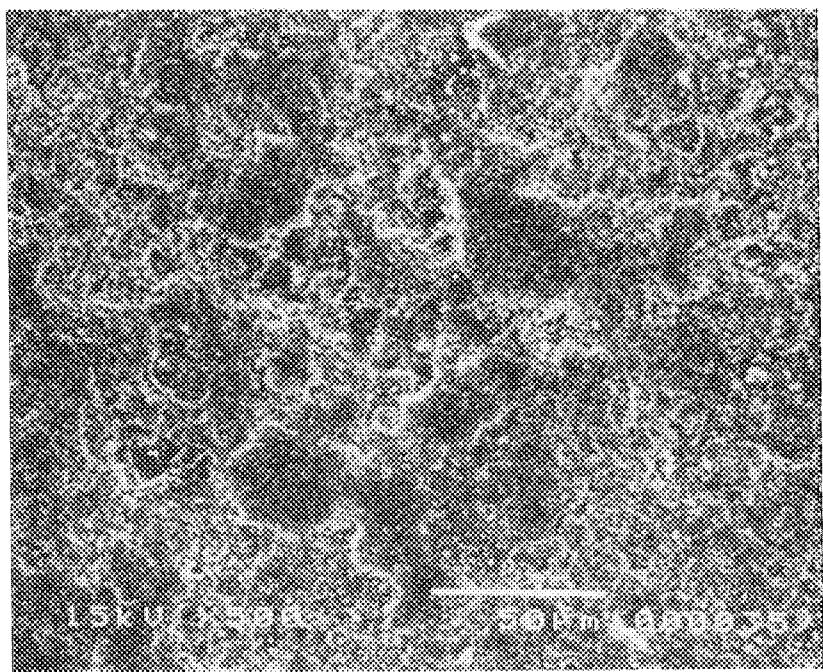


**(a) As-coated**

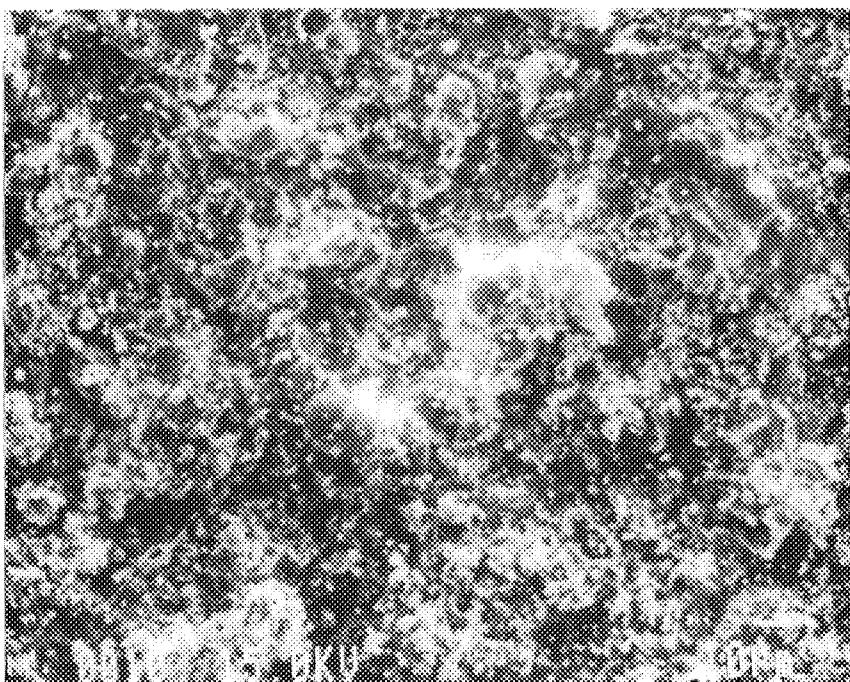


**(b) Specimen 1**

Fig. 6: Surficial SEM Micrographs of As-received and Dielectric Breakdown Specimens.  
(a)As-received, (b)Specimen 1, (c)Specimen 2, and (d)Specimen 2(non-contact).  
(b),(c) and (d) are Corresponding to Parts A2, B1 and B2 in Fig. 5, Respectively.

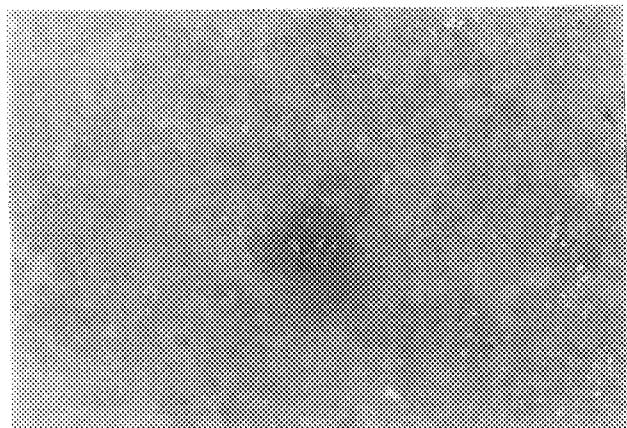


**(c) Specimen 2**



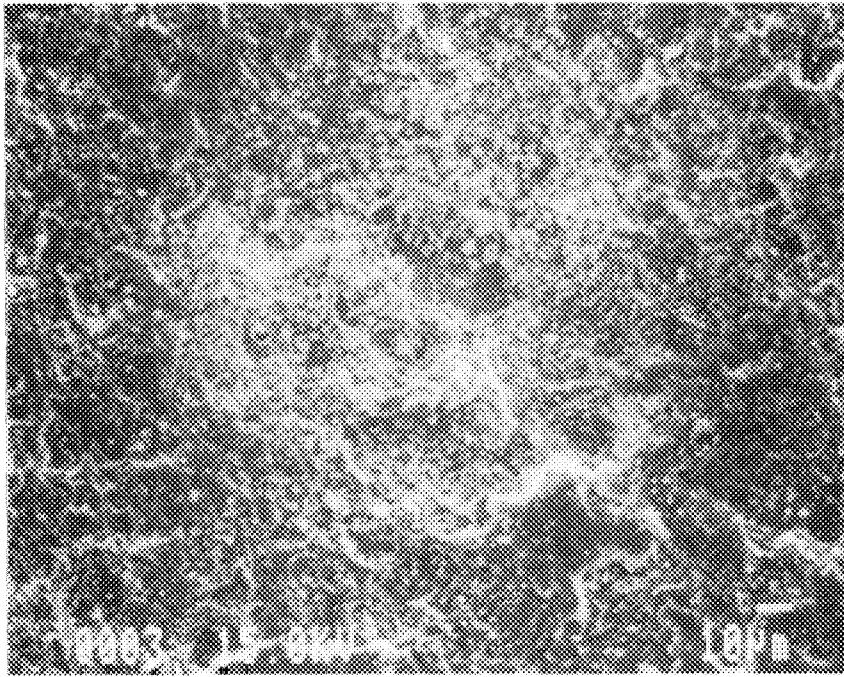
**(d) Specimen 2 (non-contact)**

Fig.6:(continued)



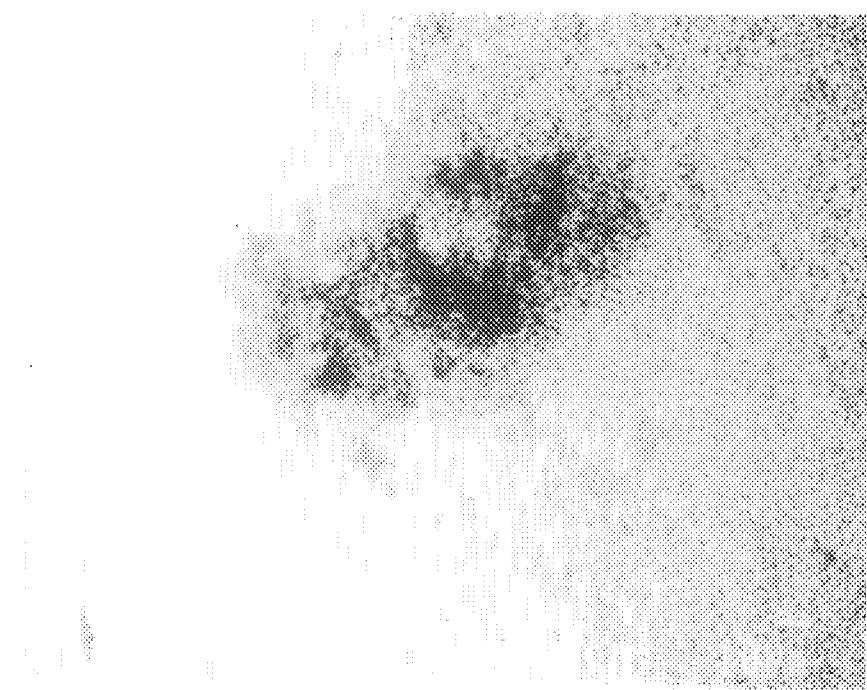
1 mm

(a) Optical

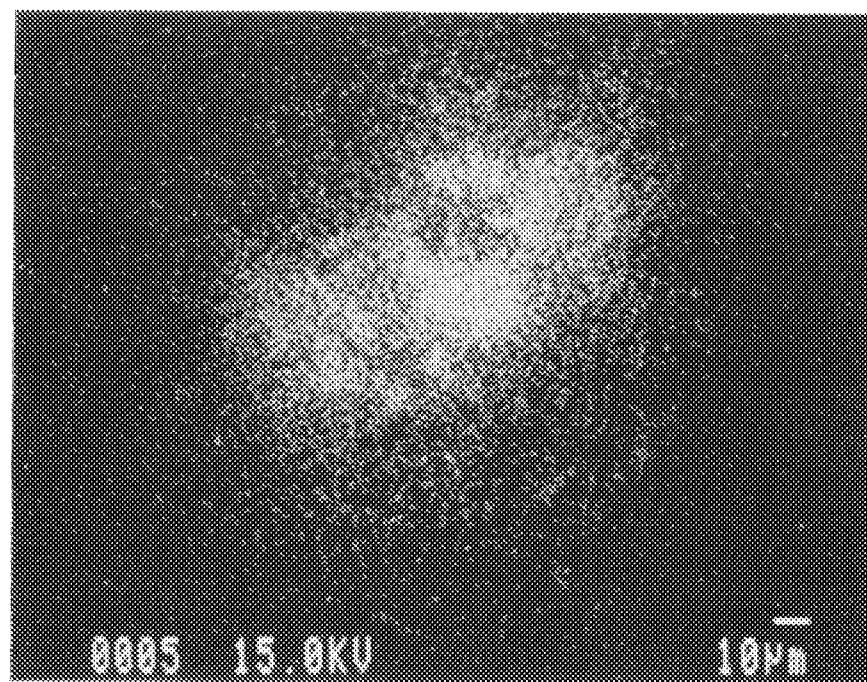


(b) SEM

Fig. 7: Optical and SEM Micrographs, and EPMA Analyses of a Defect on the Surface of the Dielectric Breakdown Specimen. (a)Optical and (b)SEM micrographs, and EPMA Analyses of (c)Al, (d)Ni, (e)Cr and (f)Fe.

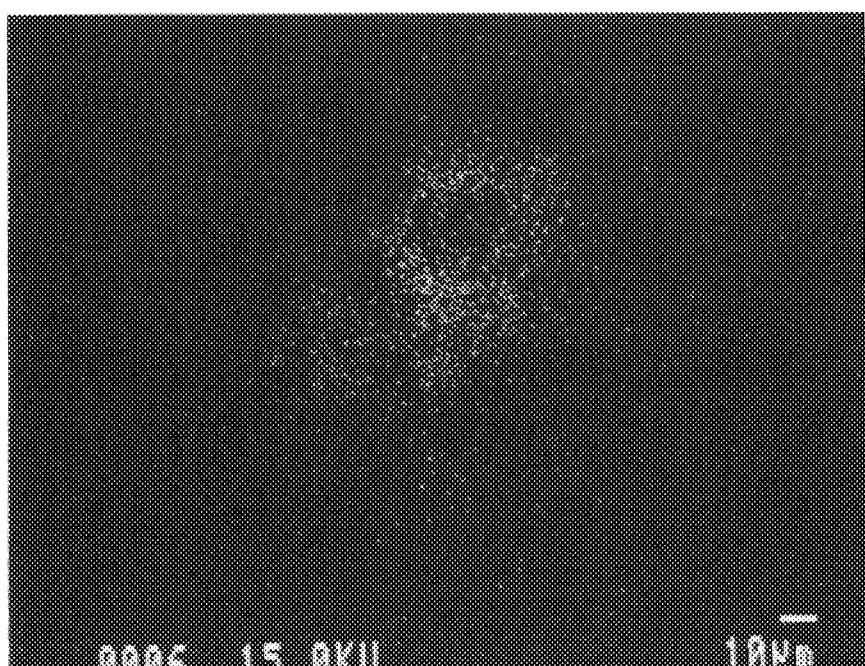


(c) Al

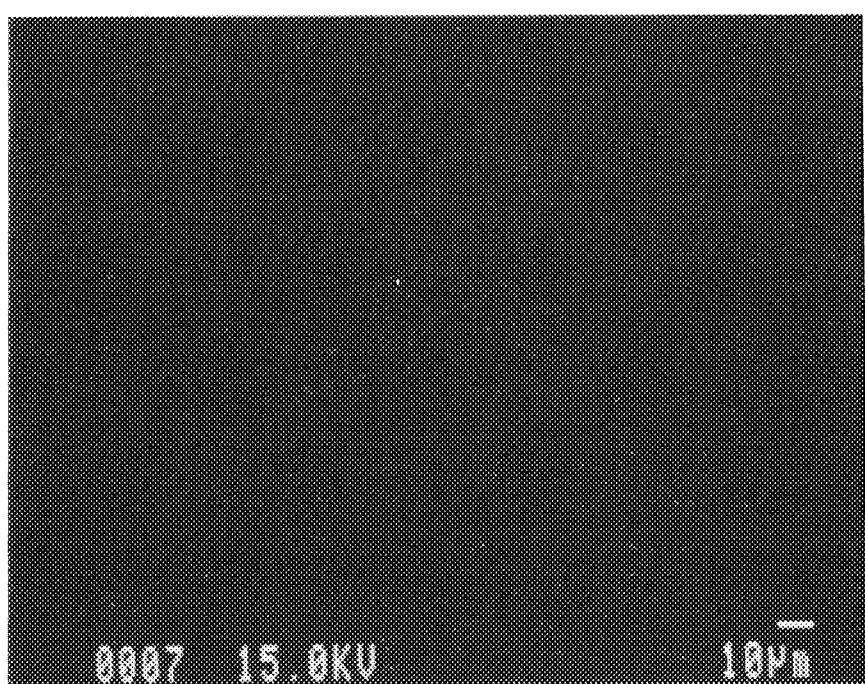


(d) Ni

Fig.7:(continued)



(e) Cr



(f) Fe

Fig.7:(continued)

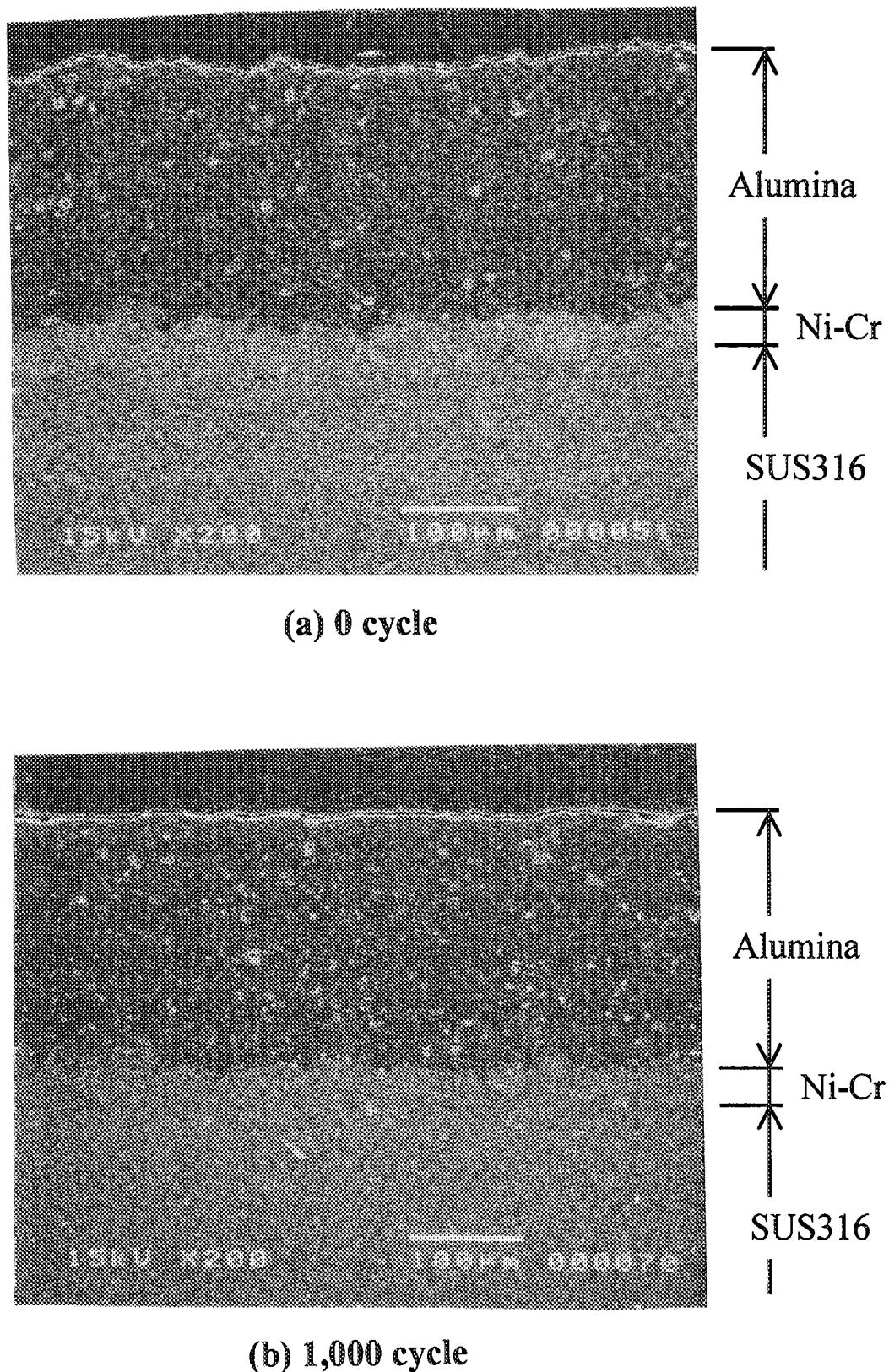


Fig. 8: Cross-sectional SEM Micrographs of Specimen 1. (a)0, (b)1,000, (c)38,000, (d)63,500 and (e) 76,828 cycles.

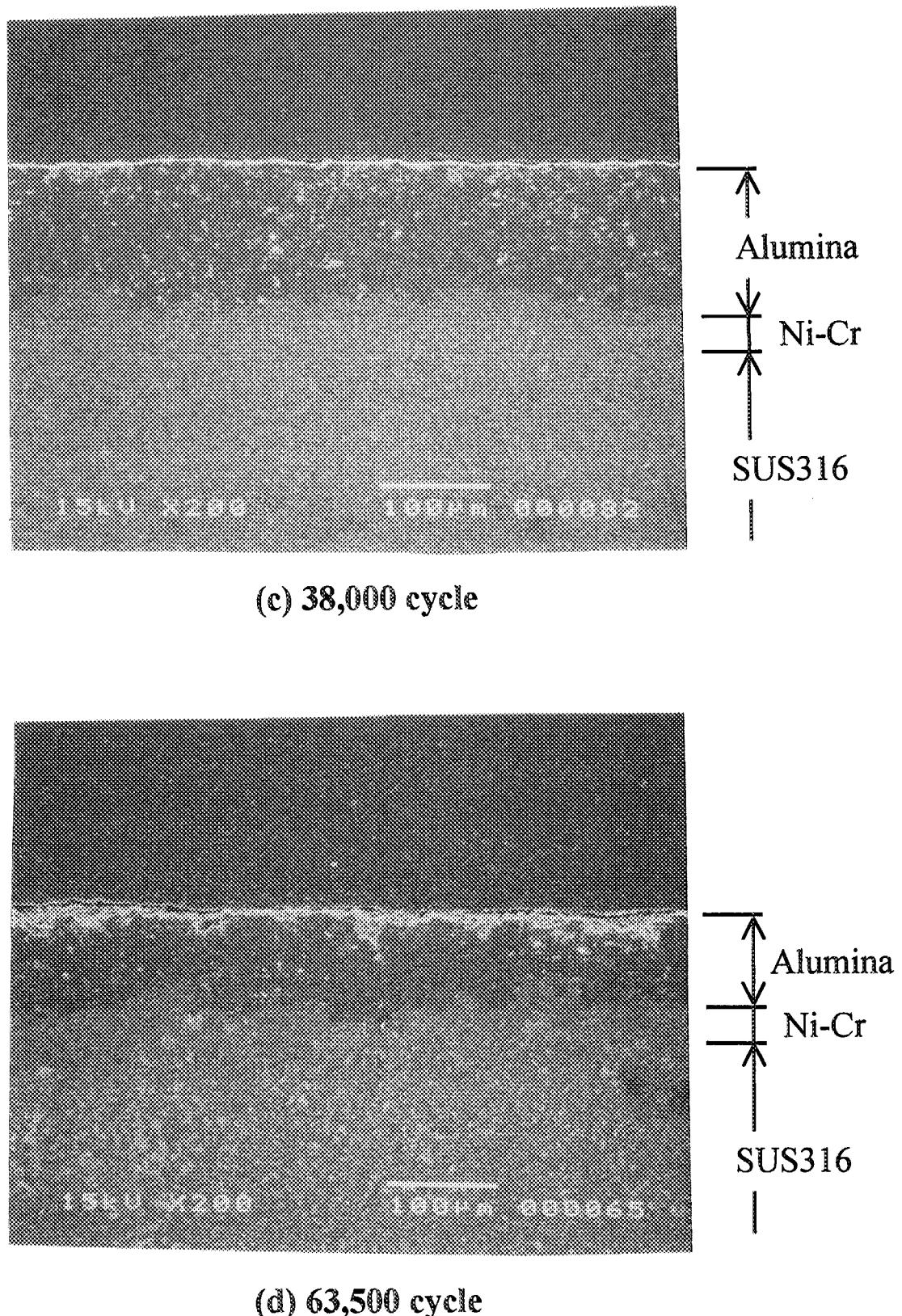
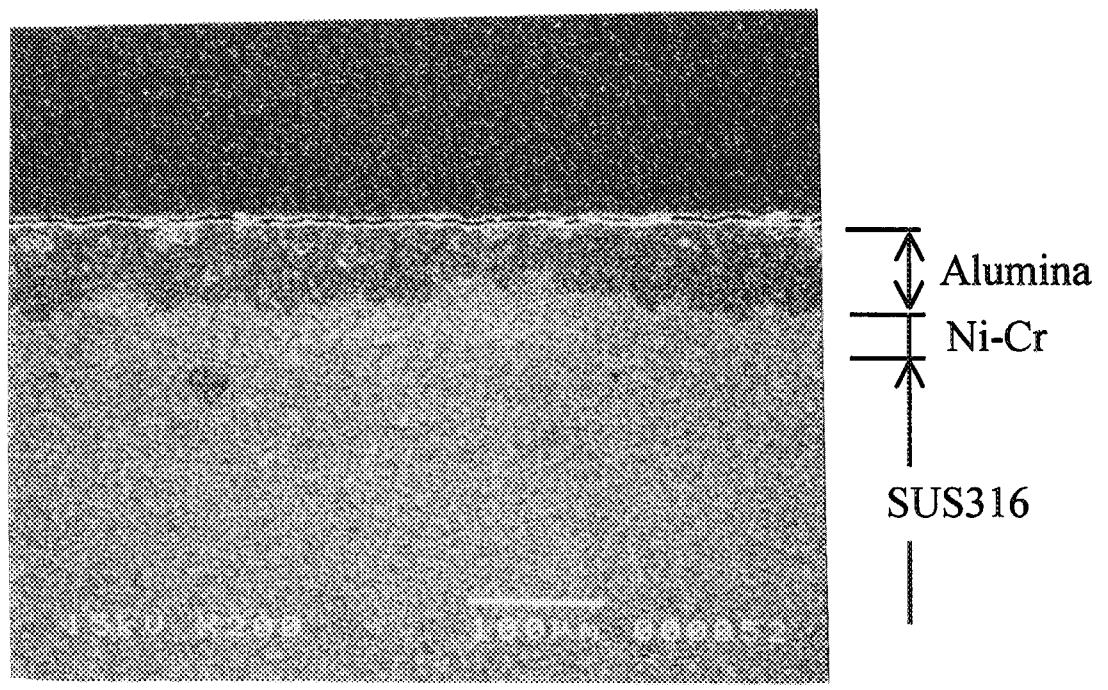


Fig.8:(continued)



(e) 76,828 cycle

Fig.8:(continued)

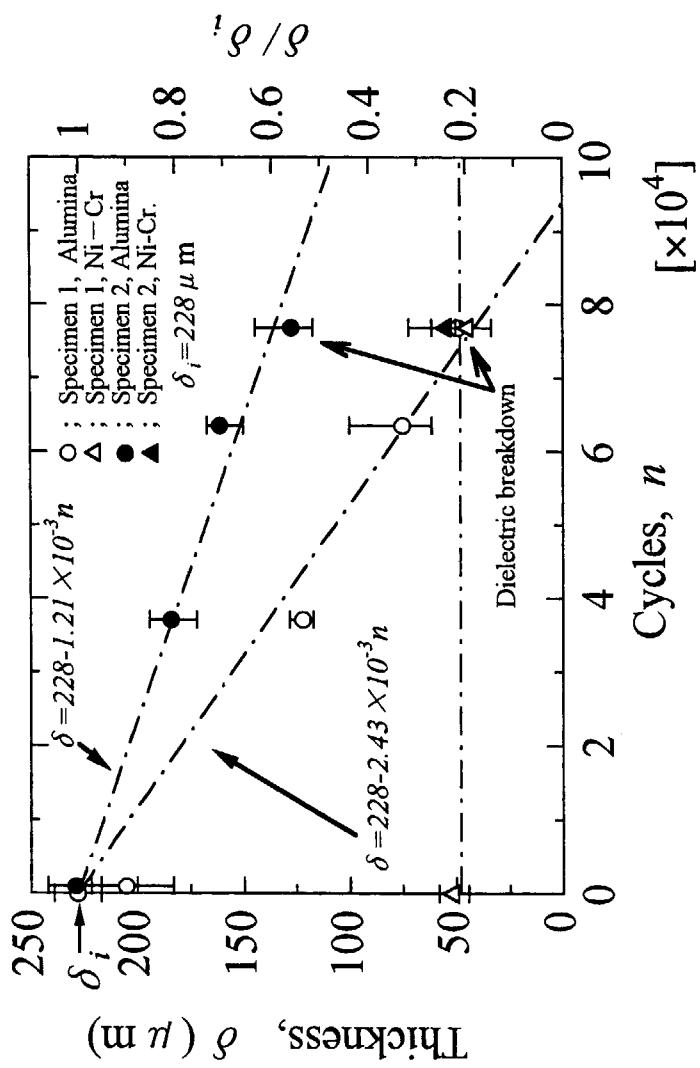


Fig. 9: Thickness Changes of Alumina Coating film by Impact Load Cycles. Alumina of Specimen 1(Open circle), Ni-Cr interlayer of Specimen 1(Open triangle), Alumina of Specimen 2(Solid circle) and Ni-Cr interlayer of Specimen 2(Solid triangle).

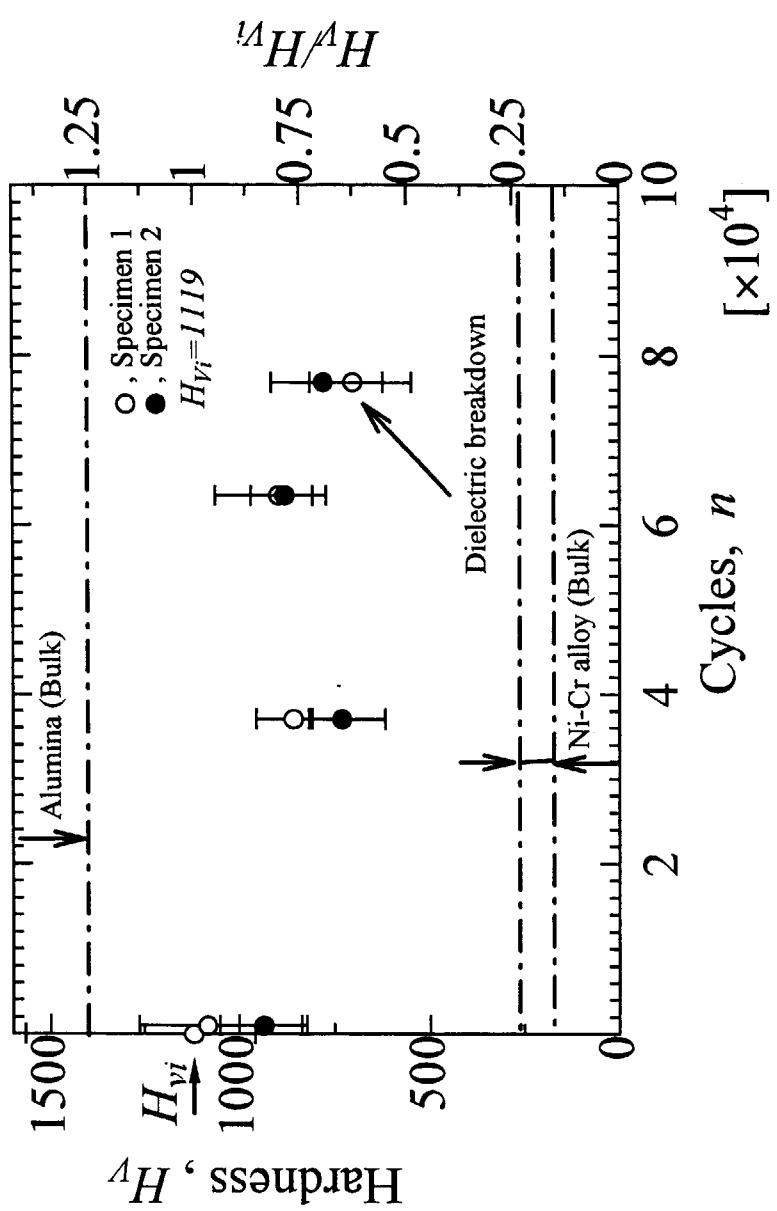


Fig. 10: Vickers Hardness Changes of Alumina Coating films by Impact Load Cycles.  
Specimen 1(Open circle) and Specimen 2(Solid circle).

This is a blank page.

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは液体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- E.C.開催理事会指令ではbar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換 算 表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-1</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	I cal = 4.18605J (計量法) = 4.184J (熱化学) = 4.1855J (15°C) = 4.1868J (国際蒸気表)
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>	
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>-5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>-5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>	
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-1</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	= 735.499W
	1.60218 × 10 <sup>19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>19</sup>	1	

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>		1	100
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1	0.01	1	

照 射 線 量	C/kg	R	線 量 當 量	Sv	rem
	1	3876		1	100
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1			

(86年12月26日現在)

プラズマ溶射によつて形成されたアルミナ電気絶縁コーティング膜の繰り返し衝撃荷重に対する耐久性