

Y.Saito, H.Tanaka\*, K.Hayashi\*\*, S.Anami, M.Matuda, S.Fukuda,  
T.Shidara, H.Hanaki, H.Honma, K.Nakao, A.Kinbara\*\*\* and J.Tanaka

National Laboratory for High Energy Physics

\*FUJITSU LABORATORIES LTD.

\*\*Communication Equipment Works, Mitsubishi Electric Corporation

\*\*\*Department of Applied Physics, University of Tokyo

#### ABSTRACT

For investigation of rf alumina window breakdown, high power test up to 200MW(2856MHz) and microscopic observation on broken windows are carried out. It is found that the puncture is generated on the surface by thermal heating, which is caused by multipactor electron bombardment. It is also observed that at 150MW operation the spatially localized multipactor grows drastically and causes a puncture.

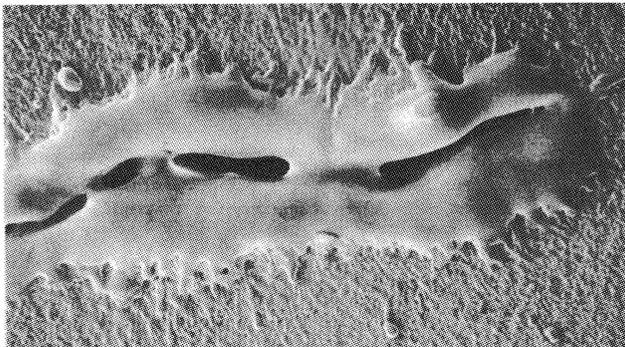
## 1. 緒言

大電力クライストロンの出力部等に用いられるアルミナ高周波窓の破壊現象は、各国の加速器において少なからず発生している。これは、より大型な加速器の開発に伴う高周波源の大電力化によっても問題となる。窓の破壊防止方法を確立するためには、破壊に到る素過程を調べなければならない。

今までの実験で、大電力高周波(2856MHz, ~30MW)を投入した際の窓の発光現象は、アルミナ表面の電子衝撃によるルミネセンス(蛍光)であること、またこの電子衝撃は、アルミナ表面でのマルチプラ現象による2次電子の増殖によるものであること、更に、2次電子放出係数の小さいTiN薄膜の窓へのコーティングはこれを抑制する効果のあることが明らかになっている<sup>1,2)</sup>。本報告では、窓の破壊の初期過程、特に貫通孔の発生について、この電子衝撃による発光現象との関係を含めて述べる。

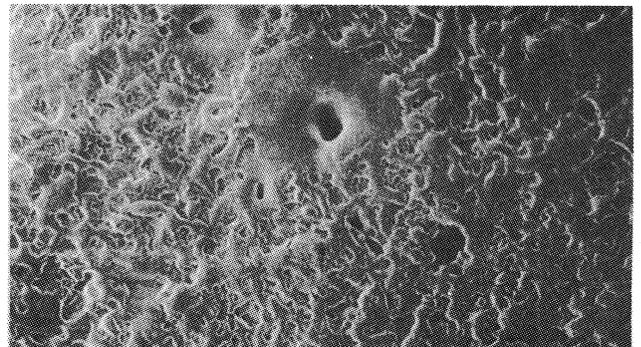
## 2. 窓に発生した貫通孔の観察

大電力クライストロンや導波管に用いるアルミナ高周波窓は、特に尖頭値の大きいパルス電力を投入する場合には、貫通孔が発生して破壊する例が多い。Fig.1に典型的な孔の様子を示す。孔とその近傍は表面が溶融しているのが認められる。Fig.2は、貫通孔に沿った断面写真の1例である。この図で、孔はまず左側表面で発生し、枝分かれしながら内部を進行して他方の表面に到達したことがわかる。これらの観察から、アルミナ表面で局所的加熱溶融がおき、孔が発生して内部へ成長していくと考えら



① 孔の周囲に溶融したものが流れて再結晶している。(貫通孔)

100 μm



② 非常に小さい孔。孔の周辺の表面が溶融している。(未貫通)

10 μm

Fig.1 アルミナ高周波窓に発生した貫通孔(2856 MHz, ~30MW, パルス)

れる。

### 3. アルミナの微視的構造

一般にアルミナセラミックは、粒界や粒内に気孔をもち、また粒界面には焼結助剤を含む。その様子は、Fig.3に示すようにさまざまである。これらは微視的に誘電強度を低下させ、特に高温になるほど誘電破壊を起こす核となりやすいと考えられる。従って表面が加熱された場合、表面及び近傍の特異点から孔が発生しやすく、又、更に内部の特異点を経路として孔が成長していくことが予想される。実際、図中の①~③

を使用して見たところ、粒径が均一(1~2 $\mu\text{m}$ )で気孔が少なく、粒界物質も少ない③の破壊例が非常に少なかった。従ってアルミナの緻密性が、破壊のおこりやすさを決定している事がわかる。

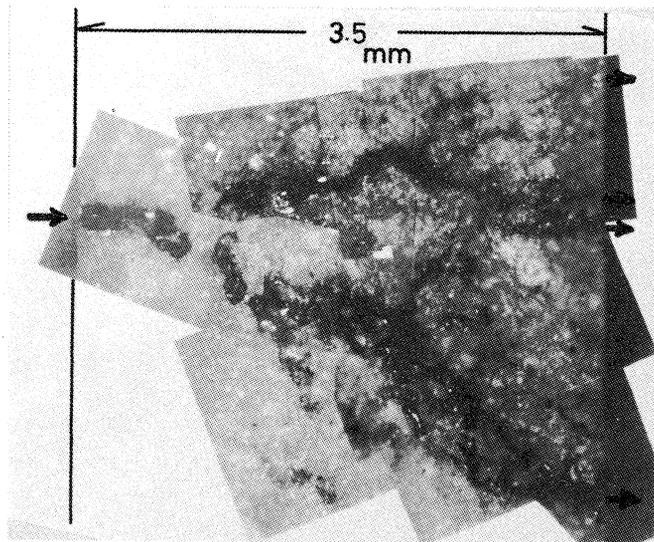


Fig.2 枝分かれした貫通孔の様子(断面写真)

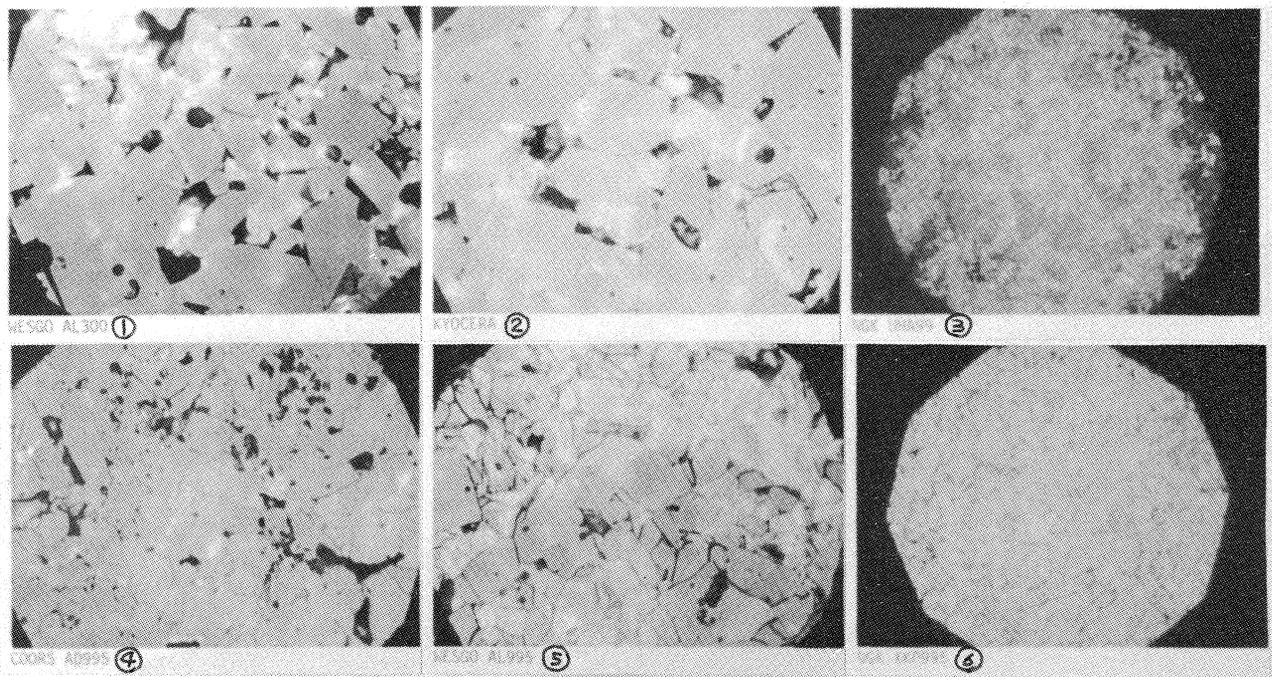


Fig.3 各種アルミナ窓材の微視的構造。ダイヤモンドポストで研磨後、リン酸でエッチング。焼結助剤がエッチングされ、粒界が見える。又、粒間のさまや粒内気孔も見える。③は、気孔が少ないため、エッチングに時間を要したことから、焼結助剤が少ないといえる。

### 4. 貫通孔の発生

大電力投入時のアルミナ窓の発光現象は、マルチプラズマを伴った電子衝撃による、アルミナのルミネセンスである。<sup>1,2)</sup> この電子衝撃が、上に述べたようなアルミナ表面の加熱と孔の発生の原因となっていることが、以下の2つの観察により明らかになった。Fig.4(a)は、電力投入時(20MW, 10pps)の窓の発光の様子であるが、特に1ヶ所発光強度の大きい部分がある。この窓を取出してみると(Fig.4(b))、この発光に対応した部分は表面が溶融しており、孔(径:~20 $\mu\text{m}$ )も発生しているのが(未貫通)、顕微鏡に

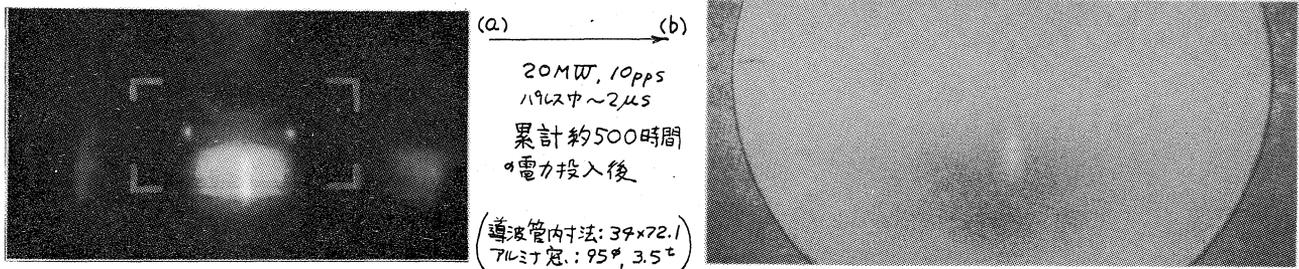


Fig. 4 電力投入時に於ける窓の発光の様子(a)と、取出した後の表面の様子(b)

より認められた。尚、溶融に至らない場合でも、発光している部分は必ず淡黄色に変色しており、電子衝撃により相当な放射線損傷をうけている事がわかる。<sup>1)</sup>

Fig. 5(a)は、レゾナントリングを用いて<sup>3)</sup>150MWの電力を投入した際の発光の様子を映像増倍管で観察したものである。小さい輝点(肉眼では見えない)が数個認められる。この1つが、約2時間後に突然明るさを増し(Fig. 5(b))、再び暗くなることはなかった。この部分でもやはり表面溶融と孔(径:~100μm)の発生が観察された。このことから、局在したマルチパルサ電子衝撃が存在し、それが急激に成長して表面溶融を誘起したことがわかる。

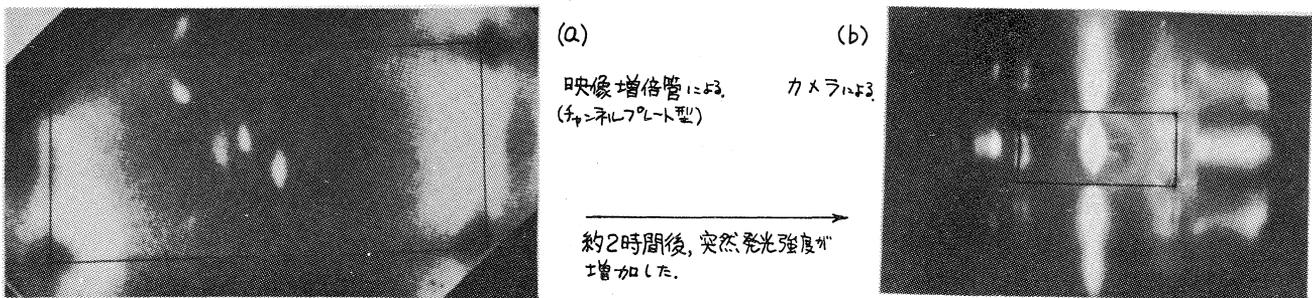


Fig. 5 発光点の明るさが増加する様子(レゾナントリングによる試験: 150MW, 2μs, 20pps)

## 5. まとめと考察

アルミナ高周波窓の破壊例の1つである貫通孔の発生は、発光を伴うマルチパルサ電子衝撃による表面の加熱溶融が原因であることがわかった。レゾナントリングを用いた大電力試験に於いて、局在したマルチパルサが観察されたが、これはアルミナの表面状態の不均一性(吸着ガス<sup>4)</sup>、よごれ、チャージアップ、アルミナ自身の不純物或いは微視的構造の特異点など)が、2次電子放出のバラツキに寄与しているためと考えられる。又、このマルチパルサが急激に成長して表面溶融に至る過程には、アルミナの吸着吸蔵ガスの放出、チャージアップに帰因する放電、温度上昇による局所的なtanδ増加や誘電強度劣化、電子衝撃の結果生ずる放射線損傷によるアルミナの組成変化などの関与が考えられる。高周波窓の破壊防止のためには、マルチパルサ抑制効果を持つTiN薄膜のコーティング<sup>5)</sup>を行なうとともに、アルミナ材料の選択及び表面処理に注意を払うことが必要であるといえる。

- [文献] 1) 齊藤 他: 真空 28 (1985) 341  
 2) 齊藤 他: 真空 29 (1986) 389  
 3) 田中 他: 本予稿集  
 4) 齊藤 他: 真空 27 (1984) 461  
 5) 松田 他: 真空 29 (1986) 392