

## Development of an S-band RF Window for Linear Colliders

A. Miura and H. Matsumoto

The Graduate University for Advanced Studies  
KEK, National Laboratory for High Energy Physics  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

### Abstract

We report on our research and development of an S-band (2856 MHz) alumina RF window for a high power transmission which exceeds 100 MW. In order to reduce binder materials such as MgO and internal voids, we have developed on techniques of sintering high purity (99.9%) alumina disks without MgO and treating them with a Hot Isostatic Pressing (HIP) method. An experiment at a resonant ring has shown that the new RF window based on this technique can successfully withstand a maximum transmission-power of 300 MW with pulse width 2.5  $\mu$ s at 50 Hz.

### リニアコライダのためのSバンド高周波窓の開発

#### 1. 序論

Japan Linear Collider (JLC) では百 MW 級のピーク電力で使用可能な信頼性の高い高周波窓の開発を行っている[1, 2]。高周波窓の破壊は数十MWの領域で起る。これまでの多くの研究から破壊の主要因の1つとしてマルチパクタが考えられていた[3, 4]。さらに2次電子放出係数の低いTiNをアルミナ表面にコーティングすることにより、マルチパクタを抑制できることがわかっている。しかしながらマルチパクタを抑制しただけでは高周波窓の破壊を完全に防ぐことはできない。これはアルミナ内部の空孔や焼結助剤等の構造欠陥による局所的な発熱が原因であると考えられる。そこで焼結助剤及び内部の空孔の影響を調べる必要がある。パラメータの一元化を行うため、まず内部の空孔を除去するHIP処理をアルミナに施し[1]、焼結助剤の量及び種類をパラメータにして破壊のメカニズムについて調べた。さらに空孔の影響を調べるため、貫通孔をあけたアルミナについて破壊との関係を調べた。本論文ではこれらのアルミナを用いた高周波窓の大電力試験について報告する。

#### 2. 高純度、低空孔率アルミナの焼結と性質

アルミナの破壊は、空孔や高誘電損失焼結助剤などのアルミナの内部欠陥が原因と考えられが、これまではアルミナの空孔の除去や焼結助剤を減少させる効果的な手段はなかった。しかしながら最

近では原料粉体の製造技術が進歩し粒径を0.1~0.5  $\mu$ mにすることが可能となり、これを使用した純度99.9%の緻密なアルミナの焼結が可能になってきた。また、アルミナの高周波損失は純度に比例して減少する。これは高純度化するに従い高周波損失の原因となる焼結助剤の含有量が減るためである。ここで注目すべきことに、焼結助剤の高周波損失はその種類により大きく異なることが分かった[5]。これは同じ純度のアルミナであっても焼結助剤の種類により耐電力に差が生じることを意味している。特に高周波損失量を大きく左右する焼結助剤としてMgOがあげられる。同じ純度のアルミナにMgOを全く添加しないで焼結すると、通常の高純度アルミナより1桁低い低誘電損失( $\text{TAN } \delta = 2.7 \times 10^{-5}$ ,  $f=10.0\text{GHz}$ )のアルミナが得られることが分かった。但し、アルミナの焼結には複数の助剤が使用される。これらの含有量の比率によっても誘電損失は変化する。本実験では最も影響の大きいMgOに着目して調べることにした。

アルミナ内部空孔を除去する技術の1つにHIP処理がある。HIP処理とは高温(1400度)、高圧(2000気圧)の不活性ガス中でアルミナ内部の空孔を圧縮除去する方法である[1]。この方法により焼結後のアルミナ空孔率はほとんど無視できるまで減少する。このことによりアルミナ粒界間のなじみが改善し機械的強度も増加する。更に光を散乱する空孔が除去されるため、アルミナの透光率が上昇し内部に不純物や空孔が集中すればその部分が黒雲のよう

にみえる。これにより不純物が局部的に集まっているアルミナを予め選別することが可能となった。

### 3. レゾナントリングを用いた高周波窓大電力試験

本実験に使用したレゾナントリングの構成を図1に示す。クライストロン(東芝E3712)出力は方向性結合器(-11.54dB)を通してレゾナントリングに供給される。リング内の高周波は周回毎に増幅され、 $2.5\ \mu\text{sec}$ のパルス幅で22~25倍のピーク電力が得られる。リングの周長は波長の整数倍になるように位相器で調整する。本装置では最大310MW迄の励振が可能である。真空度は3台のイオンポンプ(160l/min)で $5.0 \times 10^{-9}\text{Torr}$ に保っており、全体の温度は安定な運転を確保するため冷却水によって $30 \pm 0.1$ 度と高い精度で一定にした。周回高周波電力の進行波及び反射波は夫々-70dBのベータホールカップラーにより測定した。反射電力が1MWを越えるとインターロックシステムにより次のパルスは停止する。真空度はコールドカソードゲージ(CCG)とBAゲージで計測した。CCGはインターロック用に、BAゲージは真空度測定用に使用した。アルミナからの放出ガスは質量分析器を用いて分析した。アルミナ表面の発光パターンは高周波窓の上流の観察窓にイメージインテンシファイアを設置し観測した。発光の時間依存性は窓の特性を調べる上で極めて重要な情報であるが、これは下流側の観察窓に光電子増倍管を設置して測定した。この信号はインターロックにも使用した。X線計測は高周波窓の近傍の上、下流にシンチレーションカウンタを設けて行なった。これによりX線発生時の時間変化を測定することが可能となった。X線の積算量はサーベイメーターを用いて測定した。また高周波窓の外壁にはアルミナの温度上昇を計るため熱電対(Ar-Cr)を取付けた。

今回実験に用いた窓の構造を図2に示す。ピルボックス部はSUS304の内面に $10\ \mu\text{m}$ の銅鍍金が施してある。ヘリコフレックスにより真空遮断を行っているため、アルミナの交換が容易に行える。このように窓枠は再利用できるので、実験条件を一定に保つことができる。この窓はKEKの2.5GeV Linacで長年使用されている実績のあるものである。

本研究では6枚のアルミナディスクについて試験を行なった。表1及び表2にそれらのパラメータ及び誘電正接を示す。すべてのアルミナにはHIP処理を行い、コーティングはしていない。

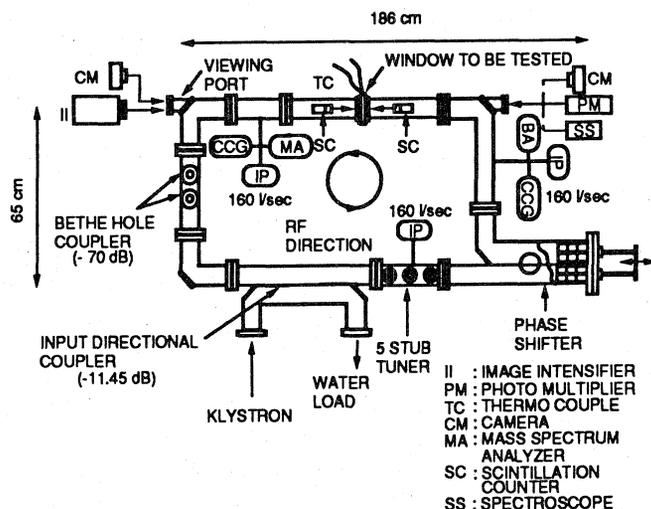


図1 レゾナントリングの構成

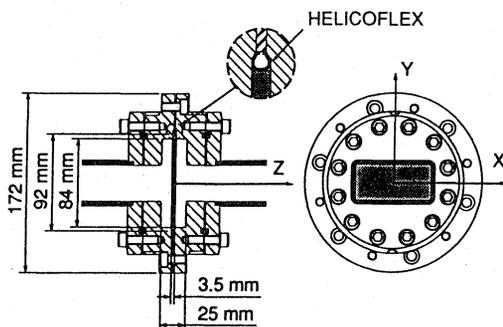


図2 高周波窓の構造

表1 試験したアルミナのパラメーター

HIP 処理済, コーティング無し						
	#1	#2	#3	#4	#5	#6
純度 (%)	99.5	99.5	99.9	99.9	99.9	99.9
集中した不純物	無し	有り	無し	無し	無し	無し
MgO (焼結助剤)	含む	含む	含む	含まない	含む	含む
貫通孔 (直径0.5mm)	無し	無し	無し	無し	無し	有り

表2 試験したアルミナの誘電正接

試料	#1,#2	#3,#5,#6	#4
Tan $\delta$ ( $\times 10^{-4}$ ) ( $f=2835\text{MHz}$ )	13.0	3.0	0.27*

\*  $f=10.0\text{GHz}$

試料 #1と#2は純度が99.5%であるが、透視観察をしたとき夫々黒雲の無いものと多いものを選んだ。試料 #3, #5, #6は純度 99.9% のアルミナで、やはり黒雲のないものを選んだ。試料 #4は同じく純度 99.9% のアルミナであるが焼結助剤としてMgOを全く添加していないものである。試料#5は試料#3と全く同じアルミナで、再現性を確認するために試験を行った。試料#6は空孔の影響を調べる為、試料 #3, #5 と同じアルミナに直径0.5 mm の貫通孔を 10個 あけ試験を行った。

試験はパルス幅 $2.5\mu\text{s}$ 一定とし、繰り返しは 10pps, 25pps, 50ppsと順次上げて行った。それぞれの繰り返しに於て透過電力を徐々に上昇させ平均電力を増加しながら試験を行った。

#### 4. 試験結果

図3に各試料の試験結果を示す。試料#1は最初の繰り返し10ppsの運転で同一箇所の局所放電による連続発光が増大し、透過電力200MWで大放電をした後破壊した。発光部分を光学顕微鏡で観察すると直径数十 $\mu\text{m}$ 程の溶融したピンホールが無数にあり、さらに数cmの亀裂を発見した。またこれは全試料の中で最も高い温度上昇を示している。これはアルミナ表面の局所放電に非常な局所的なマルチ

パクタが発生し、それによる電子衝撃が熱源となって破壊したと考えられる。

試料#2についてはアルミナ表面の局所放電が発生せず、試料#1程の温度上昇は見られなかった。繰り返し10ppsで204MW迄運転した後、繰り返しを25pps迄上げた。この時、透過電力113MWでアルミナディスクを寸断する亀裂が発生し破壊した。表面には溶融痕が全く見られないので、この亀裂は極在した焼結助剤（黒雲部）による内部の局所発熱によるものと考えられる。

試料 #3は繰り返し10ppsで200MW迄運転した後、25ppsで280MW迄運転した。最後に50ppsに繰り返しを上げ200MW迄電力を上げた段階で実験を終了した。この試料は温度上昇が小さく極めて安定に動作した。試験後のアルミナ表面には溶融痕や亀裂等は全く観測されなかった。この試料の光電子増倍管で測定したアルミナディスクの発光の信号波形を図4に示す。パルス運転の立ち上がり、立ち下がり時のマルチパクタの生じる50MW以下の透過電力で、数百ns程度の発光が起っていることがわかる。これはピーク透過電力がマルチパクタ領域以上の場合でも、立ち上がり、立ち下がり時に起こるマルチパクタを抑制するために、TiNコーティングが重要であることを示している。

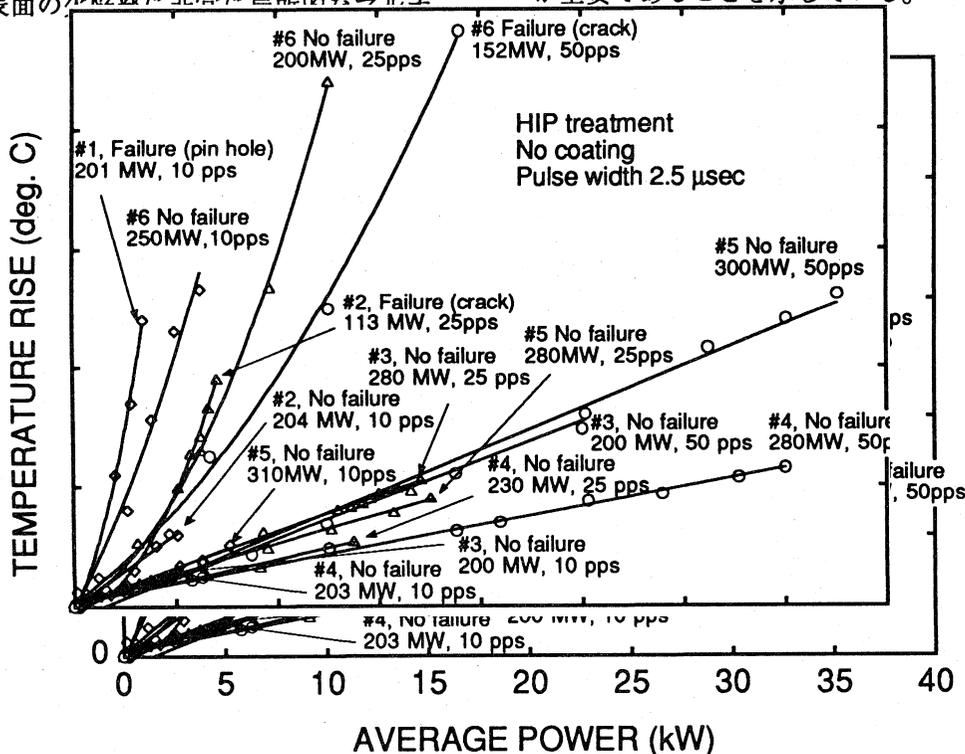


図3 各アルミナ試料の大電力試験結果 横軸は高周波窓を透過する平均電力を縦軸は高周波窓外壁の温度上昇を示す。

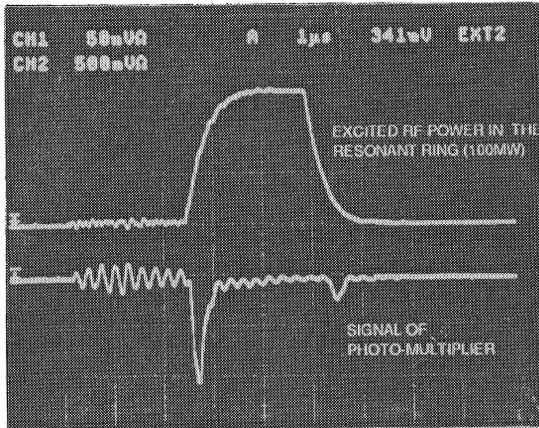


図4 アルミナ発光の時間依存性

試料#4 は繰り返し10ppsで203MW迄運転した後、25ppsで230MW, 50ppsで280MW迄運転した。この試料は表面が梱包材の有機物により汚染されていた為、表面での放電が多発し、エージングに大変時間を要した。質量分析器で観測すると、放電時には全圧力の10~60%の炭素(一酸化炭素及び二酸化炭素)が放出された。そして試験後に窓枠には炭素と思われる黒色の微粒子が多量に付着しているのが発見された。しかしながら温度上昇は最も小さく最大電力280MW, 繰り返し50ppsまで透過電力を上げたときも、安定に動作した。試験後のアルミナ表面には有機物汚染のパターンが焼き付けられたのが観測されたが溶融痕や亀裂は全く観測されなかった。

試料#5 は繰り返し10ppsで310MW迄運転した後、25ppsで280MW, 50ppsで300MW迄運転し、安定に動作した。温度上昇は試料#3の結果を良く再現しており、300MW以上の電力で安定に動作することが確認された。

試料#6 は繰り返し10ppsで200 MW迄運転した後、25ppsで280MW, 50ppsで152MW迄運転した後、亀裂が生じて破壊した。試料#6 は試料#3, #5と全く同じアルミナであるが、平均電力の低いところで急激な温度上昇を示している。試験中は貫通孔の部分で発光が持続し(図5)、亀裂は貫通孔の1つからアルミナ円板を寸断する様に発生した。この亀裂は貫通孔の局所的な放電が熱源となって熱歪によって生じたものと考えられる。

以上の結果からアルミナの放電破壊の原因及び対策として以下のことが考えられる。

- 1) 表面欠陥を発端として局所的なマルチパクタが発生し温度が上昇する。この部分の2次電子放出係数が増加し熱伝導率も低下する。この過程

が繰り返され急激に成長し破壊につながる(試料#1)。

- 2) 局所的に集中した焼結助剤やアルミナ微結晶の界面等の内部欠陥で局所的な発熱が起り、熱歪により亀裂が生じる(試料#2)。
- 3) 超高純度アルミナにHIP処理を施し空孔を除去することにより、耐電力は飛躍的に向上する(試料#3, #4, #5)。
- 4) 高周波損失の大きいMgOを焼結助剤として添加しないことにより、アルミナの温度上昇を抑制することができ、また耐電力は飛躍的に向上する(試料#4)。
- 5) アルミナ内部に空孔が存在すると局所的な放電が起り、熱歪による亀裂を生じる可能性がある(試料#6)。

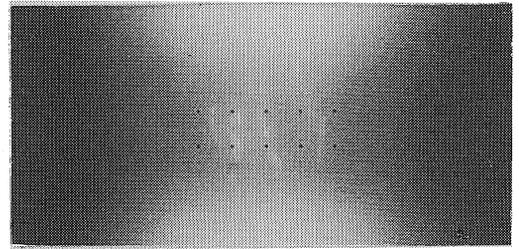


図5 貫通孔近辺での放電の様子

## 5. 結論

破壊の主要因であると考えられていたマルチパクタは透過電力50MW以上では起こらなが、パルス運転では立ち上がり立ち下りの短時間にマルチパクタが起っていることが観測された。これはマルチパクタ領域以上の透過電力でもTiNコーティングが重要であることを示している。

MgOを添加しない高純度(99.9%), 低誘電率のアルミナにHIP処理を施し空孔を除去することで高周波窓の耐電力は飛躍的に向上することがわかった。これらの研究からアルミナ内部の欠陥が破壊に大きく寄与していることがわかった。

## 6. 謝辞

本研究はJLC R&D計画の一環として行われました。大電力試験に関して新竹 積博士、斎藤芳男博士、道園真一郎博士より貴重な助言を多く頂きました。また日本高周波(株)馬場齊氏には大電力高周波部品について助言頂きました。セラミックのHIP処

理及び高純度セラミックの製作はそれぞれ日本鋼管(株)及び日本セラテック(株)により行われました。また低誘電損失アルミナは(株)神戸製鋼所により製作されました。レゾナントリング試験にはJLCグループの皆様に多大な御助力を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

## 7. 参考文献

- [1] A. Miura and H. Matsumoto, "Development of an S-band RF Window for Linear Colliders", KEK Preprint 92-215, 1993
- [2] A. Miura and H. Matsumoto, "Development of an S-band RF Window for Linear Colliders", Proc. of Part. Acc. Conf., May 1993
- [3] R. Hayes, "Reserch on Microwave window multipactor and its Inhibition", Final Report, Report # AD 256259, Eitel-McCullough Inc., San Carlos., June, 1964
- [4] Y. Saito, N. Matsuda, et al., "Breakdown of Alumina RF Windows", IEEE Transaction on Electrical Insulation, VOL. 24 No. 6, December, 1989
- [5] W. D. Kingery, et al., "Introduction to Ceramics", John Wiley & Sons Ink. New York, 1982