大電力高周波投入時における導波管系のガス放出*

斉藤芳男**・穴見昌三**・福田茂樹**・設楽哲夫**

本間博幸**・中尾克己**・花本博文**

(昭和58年12月9日 受理)

Outgassing Results of the Waveguides System
fed with the High Power MicrowaveYoshio SAITO, Shozo ANAMI, Shigeki FUKUDA, Tetsuo SHIDARA,
Hiroyuki HONMA, Katsumi NAKAO and Hirofumi HANAKI

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

(Received December 9, 1983)

1. 緒 言

高エネルギー実験用加速器は現在その加速エネルギーの増大化が要請されているが、その大電力出力化を行うに際しての真空に関する問題点は残されたままである。そのうち特にホットバキウムに属するような強電界下(高周波も含めて)でのガス放出に帰因する放電破壊現象が大きい問題として挙げられる。例えばクライストロンの管内放電による耐電圧の劣化、真空導波管内のセラミックス窓の放電破壊などである。このような系は多種の材料からできておりガス放出が複雑であるばかりでなく、高電圧の印加を伴うので *in-situ* 観察がしにくく放電現象をはっきりつかむのが難しい。今回我々は真空導波管系の高周波大電力投入時のガス放出の様子を、四重極質量分析計(QMS)を用いて調べ、又そこに組み込まれたセラミックス窓の放電を観察した。

2. 実験装置

装置模式図を Fig. 1 に示す。クライストロンの高周波電力出力(2856 MHz)は0から30 MWで2 μ sのパルス運転である。導波管内の電界強度は投入電力の $\sqrt{}$ 乗に比例し、30MWの時は5.2 kV/mmである。またパルス繰り返し数は10回/秒である。クライストロンの出力窓(アルミナセラミックス)から水負荷の手前にある導波

管窓(アルミナセラミックス)までの間の導波管(内寸34 mm×72.1 mm, 長さ約1350 mm)を引口を介して50 l/sのイオンポンプと120 l/sのターボ分子ポンプで排気する。系にはヌードイオンゲージとQMSを取り付けてある。

Fig. 2 に系のベーキング中における主な残留ガスの経時変化をベーキング開始後の時間に対して示す。系の構造上窓付近は加熱できず、導波管で約100°C, 他は約120°Cで7時間加熱した。H₂O, COは加熱による脱ガスが進行することがわかる。これに対してH₂はH₂Oより遅れて増加しベーキング時間内では分圧が下がる傾向は見られない。ベーキング終了と同時に急激に水素分圧は

Fig. 1 Schematics of the waveguides system.

* 昭和58年11月2日 第24回真空に関する連合講演会で講演(2Bp-5)

** 高エネルギー物理学研究所(茨城県筑波郡大穂町上原1-1)

Fig. 2 Outgassing results during baking.

下がる。導波管は OFHC で作られているが、これにステンレス鋼のフランジを取付ける際水素炉中での銀ろう付けを行っている。従って OFHC 中に水素が充分溶解しておりそれがベーキングにより固体内拡散で脱離するが、このベーキング条件では脱ガスしきらないためと考えられる。

ベーキング後系の真空度は 1×10^{-6} Torr 程度であり、系のコンダクタンスとポンプの排気速度から、導波管表面のみからガス放出があると仮定すると放出速度は約 3×10^{-9} Torr $\cdot$ l/cm 2 sec と見積られた。また、系の残留ガス主成分は H $_2$, H $_2$ O, CO であった。系に高周波電力を徐々に投入していくいわゆる高周波エージングは 10^{-6} Torr 台の真空を保つようにして行った。

3. 高周波エージング

高周波電力投入時の残留ガスのスペクトルを停止時のそれと比較した例を Fig. 3 に示す。高周波電力の投入に

Fig. 3 Residual gas spectra. a) with microwave of about 0.5 MW b) without microwave.

より H $_2$, CO, CO $_2$ やメタン等の炭化水素が増加することがわかる。H $_2$ O は大きな変化はないが若干減少しており、解離脱離による脱ガス機構が存在すると思われる。

Fig. 4 にこれら主な放出ガスの高周波エージングの際の変化を示す。エージング初期に H $_2$, CO, CO $_2$ は 1 桁増加, H $_2$ O は 50% 程度増加し、以後徐々に減少し 1MW 程度の電力投入までには大部分のガス放出が終わっている。30MW までのエージングが約 8 時間で完了すると、再び 1 MW 以下の電力を投入しても最初のようなガス放出はない。従ってベーキングで取去れない表面のよごれ等が高周波放電による電子やイオンの衝撃で H $_2$, CO, 炭化水素等として脱ガスされたと考えられる。1 MW 以下での放出ガス量はイオンゲージによる全圧の値とポンプの排気量から見積って 10^{-1} Torr $\cdot$ l 台であったが、これは導波管内壁表面からとすると 10^{15} , セラミックス窓表面からとすると 10^{17} molecules/cm 2 の程度となるがどちらが主な放出源かは現在までのところ明らかではない。

Fig. 4 Outgassing results during the microwave aging.

なおエージング終了後、系を 10^{-7} Torr 台に保ち高周波電力を停止しておき数日後再び投入すると、1MW 以下でも最初のエージングと同様のガス放出が見られた（量は 10^{-8} Torr・l/台）。これは系内の残留ガスの再吸着だけでなく、セラミックス中の吸蔵ガス、或いは前述の OF HC 中の H_2 等が表面へ拡散したためと考えられる。

Fig. 4 で見られるようなエージングにおいて、その途中何回か高周波電力の投入と停止を行いその時の H_2O の分圧の変化を観察すると、エージング初期では投入直後1度減少し解離現象を示すが、その後長い時定数（数分）で徐々に増加した。これはエージング初期にはまだ吸着エネルギーの小さい H_2O が多く、また投入電力も小さいため、水分子のまま脱離する量が支配的なためと考えられる（例えば電力投入による系の時定数の長い温度上昇による脱離などが可能性として考えられる）。エージ

Fig. 5 A glow discharge on the microwave window. The waveguides cross-section is shown by the rectangular frame.

ングが進み 1 MW を起える段階では、電力投入とともに H_2 , CO は 3 倍に増加するが H_2O は約 10% 減少してその後の増加は見られなかった。投入電力が大きくなると衝撃電子のエネルギーも高くなり残りの強い吸着エネルギーを持つ H_2O が解離し、 H_2 や CO として脱離すると考えられる。

4. アルミナセラミックス窓の放電

エージング中窓を導波管の z 軸方向から観察すると、投入電力が 1 MW を起えるところから **Fig. 5** に示すような青色のグロー放電が認められ始める。この写真は 8.7 MW 投入時のものであるが、このパターンがどのような電場分布から生ずるのかは現在判っていない（基本的な電場は窓の表面に平行でかつ写真の上下方向であるが、他の方向成分の存在も考え得る）。エージングが進み 30 MW の電力が投入される段階でもこの放電は続くが、更に 20 時間余りエージングを行うと断続的になりやがて消える。この時ガス放出もやはり放電に対応して断続的に変化し、放電が起きると H_2 , CO は増加、 H_2O は減少し、放電が止むと H_2 , CO は減少、 H_2O は増加して高周波電力を投入しない時の値にもどる。従ってこの段階でのガス放出はグロー放電のみによるものであり、アルミナ表面に吸着した H_2O が解離脱離する現象であると言える。グロー放電の起きている部分の面積を **Fig. 5** のパターンから見積り放電によるガス放出速度を全圧で換算すると 10^{13} molecules/cm²・sec のオーダーであった。

一般に低真空でのグロー放電は、気体の空間密度によ

Fig. 6 A cross-section of the damaged window.

Fig. 7 A microscope photo of the alumina used as a microwave window.

り左右されるが、このようなアルミナ表面でのグロー放電は、表面の吸着密度に依存したなだれ現象であると考えられる。実際、グロー放電が観察されない状態になっても10時間程高周波電力を停止しておくと、再投入した際十数分間放電が観察され、MSQの信号はやはり H_2O の解離を示した。つまり系の残留ガス中の、或いはアルミナの吸蔵ガス中の H_2O が表面に再吸着し、再び表面密度がふえたためグロー放電が起きたと考えられる。このとき放出された量は 10^{16} molecules/cm²の程度と求められたが、少なくともこの吸着量が存在するとグロー放

電は起こることになる。なお、グロー放電が観察されない状態でも窓の表面に垂直に約20ガウスの磁場をかけるとグロー放電が起きたが、これは表面付近の荷電粒子の実効的な行程が長くなり、なだれ現象が起りやすくなったことを示しているとともに、この放電がいわゆるマルチパクタによるものではないことも示している。

実験後窓を取り出して観察すると、Fig. 5と似たパターンが茶色く見られ（その組成は現在調査中）、グロー放電により表面状態に変化が起きたことが判った。実際に加速器に使用しピンホールが貫通したアルミナ窓の断面を顕微鏡で観察したものがFig. 6である。表面から破壊が始まり、枝わかれしながら他方の表面まで貫通しているのがわかる。従ってグロー放電による表面状態の変化が、最初の表面破壊とスパッタリング等の何らかの関係をもつことが推察される。Fig. 7はアルミナ表面を研磨後化学エッチングした状態の顕微鏡写真である。粒内気孔、粒間気孔が多く認められ（窓として使用する前後で差はなかった）、吸蔵ガスも多くまた吸着に対する実効表面積も大きいと考えられる。更にはこれらが、表面破壊が選択的に起きるための特異点となり、また破壊が枝分かれしながら進行していく際の分岐点となることが予想される。