

Study of RF breakdowns in X-band High Field Regime

S. Matsumoto, K. Yokoyama, T. Higo, S. Fukuda, Y. Higashi, Y. Watanabe, N. Kudoh,
Accelerator Laboratory, KEK, High Energy Accelerator Research Organization,
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801 Japan

Abstract

A program of the experiment of RF breakdowns under very high field strength of order of 100MV/m is ongoing at KT-1 X-band RF test station at KEK. As a basic research of the RF breakdown phenomena in the accelerating structure, a waveguide both its height and width being reduced (a narrow waveguide) is used to enhance the field. The dependence of breakdown rate on the gradient were measured and the rate of a copper waveguide was found to be larger than that of a stainless steel waveguide.

Xバンド高電界RF放電現象について

1. はじめに

RFの発生源、搬送系、加速空洞など、RFにかかわるいずれの部分も、電界強度が増加すれば、やがて放電をおこす。加速器に使用される加速管は、必要な耐電圧性能が確保されるよう、材料やその工作方法、また加工後の表面処理などを適切に選択し注意深く製作される。こうしてできた加速管であっても、運転の際には、加速管表面電界強度やRFパルス幅、さらには加速管内の真空度などに応じて、ある頻度で放電が発生する。これらは、ただちに性能劣化に至るような放電ではないが、パルス動作の線形加速器の加速管での放電発生は、当該パルスでのビーム加速の失敗につながるため、加速器ビームの利用効率の観点からこのような放電の発生率には許容上限がある。

我々は、実用的な加速勾配を高める目的で、Xバンド (11.42GHz) を使用した加速管の研究を行っている。加速管の性能評価は、まずモデル加速管を設計製造し、つぎに高電力RFを実際に投入して行うことで行われる。最近の研究で、Xバンド加速管は、最大100MV/mの加速勾配に達する可能性があることがわかってきた[1]。この加速勾配の上限を決める要因の一つは、加速管内での放電である。100MV/m近傍での放電現象発生理解は、高電界加速管開発の重要な課題である。

我々は、この加速管の最大加速勾配に相当する100MV/mオーダーの電界を、「狭導波管」と名付けた実験用導波管内に発生させ、そこで起こる放電を研究している。標準矩形導波管のE面間寸法を縮めた狭窄部を作り、そこに導波管伝送TE₁₀モードを通すと、狭窄部は周囲よりも電界強度が高くなる(図1はHFSS計算の結果)。この狭窄部のRF高電界下で起こる放電を詳しく調べることで、加速管内の放電現象の理解に役立つこと、さらには、高電界下での放電現象の一般についての有意義な知見を得ようと考えている。

狭導波管は、加速管に比べると単純な構造であることから、1) 製造費用がかからず、かつ実験の期

間を短くできること、2) 実験結果の解析が加速管ほど複雑でない、などの利点がある。また、3) (放電に伴う)放射線の発生は少ないので、簡単な遮蔽で済むこと、4) 必要なRFパワーも加速管に比べると少なくすむ、など実験のしやすさの点でも有利である。本来、狭導波管は、加速管材料の高電界RF耐性を実験的に調査するため考案された[2]。われわれも種々の材料を試験する予定であるが、本稿では、これまでに実験が終わっている銅(OFC)製(製造番号CU005)とステンレス(316L)製(同SUS003)を取り上げる。それらのRFパラメーターは表1参照。

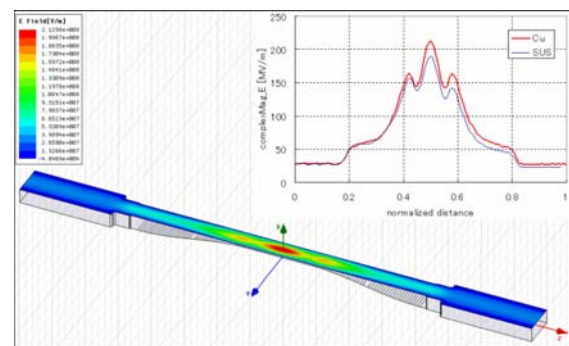


図1 狭導波管の形状とz軸上の電界Ex分布。

表1: 狭導波管のパラメーター

製造番号	#SUS003	#CU005
物質	ステンレス (SUS316L)	銅 (OFC)
vswr (測定)	1.12	1.14
loss[dB] (測定)	-1.56	-0.28
vswr(HFSS)	1.08	1.04
Loss [dB] (HFSS)	-1.83	-0.26
E-field@50MW (HFSS) [MV/m]	134	150

2. 実験方法

実験は、KEKのKT-1ステーション（Xバンド出力50MW、繰り返し50pps）で行っている。時間的な効率やデータ処理などを考慮して、放電発生率（Breakdown Rate; 以下BDRと略）が、RFパルスあたり 10^{-6} から 10^{-4} の範囲を調べている。50ppsでは、数時間から数分に一回の放電頻度である。なお、この実験でのBDRは、実際の加速管で許容されるものより一ないし二桁程度高い。使用する狭導波管は、KT-1で、十分100MV/m以上の表面電界強度が出るように設計された。具体的な実験装置や方法の詳細は文献[3]にある。以下、要点のみ記す。

狭導波管に、一定の幅とパワーをもった矩形RFパルスを放電が起こるまで繰り返し印加し続ける。放電の発生は、狭導波管部からのRF反射の急増で判別する。放電がおこったら、すぐにRF印加をやめ、導波管内の真空度が回復するまで待つ。その間に必要なデータの取得や保存を行う。真空が回復したら、まず低いパワーと狭い幅のRFから印加しはじめ、次にあらかじめ決められた手順にしたがい放電発生直前の幅とパワーまでもどし次の放電がおこるまで印加し続ける。以上を放電が起こるごとに繰り返すことで実験が進行する。一つのRUN（一つのRF幅とパワーの組み合わせ）に対して、24時間分のデータをとった。RFパルス幅は、40、100、200、300、400nsの五種類（SUS003は40nsのかわりに50ns）。

3. 実験結果

3.1 放電発生率[3]

RFが印加されてから放電が発生するまでの時間（RFパルス数）を $p(i)$ （ i は放電事象のindex、 $i=1 \sim N$ ）とすると、パルス当たりのBDRは、パルス数の積算値 $P = \sum p(i)$ 、放電発生回数 N より、 $BDR = N/P$ で与えられる。図2は、こうして算定されたCU005とSUS003のBDRを狭導波管内の電界強度に対しパルス幅ごとにプロットした結果である。CU005のデータ点数およそ80に対しSUS003は20程度。

SUS003は、もともと実験に使える時間が少なかったことに加え、KT-1の出力限界に達したため、狭導波管内の電界強度を135MV/mより上げることが難しく、もっとおおきなBDRの領域を調べられなかった。そのためかSUS003では、互いに統計誤差の範囲内でのばらつきでおさまっている。一方、CU005は網羅的にデータが取れた。データ点は、おのおのの統計誤差の範囲を超えて広くばらついている。特に400ns幅でのデータを見ると、BDRデータの再現性は低く、電界強度が同じも、BDR結果が一桁以上違う場合もある。

それぞれのRF幅のBDRデータを印加電界強度 E の累乗関数 E^a にあてはめてみた。SUS003は、おおよ

むね $a \sim 20$ となる。CU005は、データばらつきのため、BDRが低い方でフィットした累乗曲線を高いところまで単純に外挿してみることで、おおまかな傾向を見ると、 $a \sim 40$ ないし ~ 50 となる。ちなみにこれまで試験された数多く銅製Xバンド加速管データを集計すると、加速管のBDRのRFパルス幅 T および加速勾配 E への依存性は、 $BDR \propto E^{30} T^5$ とまとめられる[5]。狭導波管のBDRも、加速管と同様、 E および T に対する急峻な依存性を持っている。

図2の電界強度の範囲では、SUS003のBDRがCU005のそれより全般的に小さい。これはステンレスの方が、放電発生率に関しては、加速管材料として優れていることを示す。文献[2]や、またDCパルスでの耐電圧試験[4]の結論の再現である。ただし、BDRが 10^{-9} 程度以下では両者の差はほとんどなくなることが図2より読み取れる。BDRが低い場合、すなわち電界強度が低いところでは、BDRに関する限り銅とステンレスは材料として優劣ないことになる。これは、たとえば長いパルス幅での実験をおこなえば、比較的容易に確かめることができるだろう。

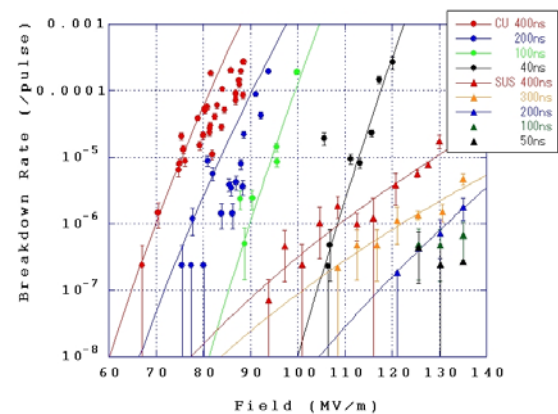


図2: 銅製狭導波管（CU005）とステンレス製狭導波管（SUS003）のBDR結果。

3.2 放電の出現時間分布

CU005のRUNごとに、放電に至るまでの保持時間 $t(i)$ の分布を見てみた。図3に一例を示した。ここにあるように、相対的に短い保持時間ののち放電に至る場合が数多くのある一方、少ない頻度だが保持時間の長いものもある。図4に、このRUNでの放電履歴を与えた。放電が「ときたま集中して起こる」傾向にあることがわかる。

集中して起こる放電事象同士の関連について、たとえば、放電の発生場所が同じかどうか、ということは興味深い。放電発生地点は、ピエゾ素子による音波検出システムである程度同定できるので、放電の位置が変化しているかどうか分かる。詳しいデータ解析はこれからである。また、集中する放電が終わると、また保持時間が長くなるが、この回復過程も調査対象である。

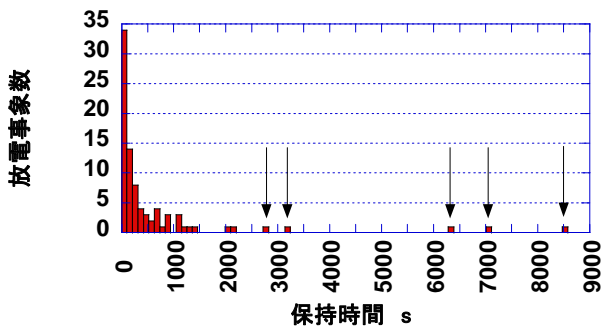


図3：CU005、RF幅400ns、電界82MV/mのRUNの放電保持時間分布。放電総数87。矢印は長時間保持のケース。

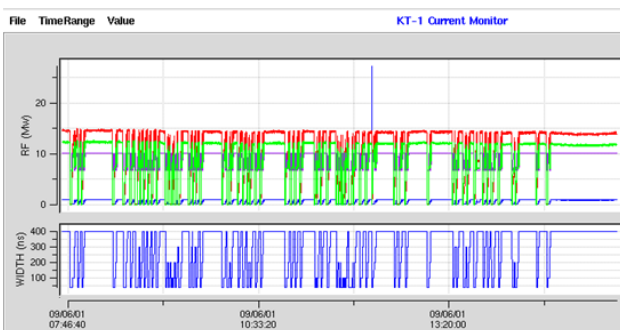


図4：図3のRUNの放電試験中の投入RF履歴。8時間分の表示。上段は、赤：入力、緑：透過、青：反射、下段はパルス幅。放電が発生するとRFパワーが遮断されるので、履歴にRFの急低下が残る。履歴グラフのディップが放電発生に対応。放電が時間的に固まって起こる傾向が見える。

3.3 放電開始時間

単純に「放電開始時間」＝「RF反射が起こり始めた時間」と定義して、放電開始時間のRFパルス内での相対時間位置を逐一見出す（図5）。あるCU005のRUN（パルス幅400ns）について、上記の分析をおこなった結果例を図6に与える。RFパルス先頭では放電発生頻度は低いが、この例では、パルス印加後約250ns経過するまで、徐々に増加、250ns以降は一定の頻度になっていることがわかる。ほとんどのRUNで、パルス先頭部で放電発生頻度がすくないので、どうやらこれは狭導波管放電の一般的な特徴のようである。何らかの系統的な理由があるはずだが、まだ分かっていない。

まとめ

材料の耐電界性能を調べる目的で導入された狭導波管実験であるが、どの材料が優れているかを調べるだけにとどまらず、印加電界強度やRFパルス幅の違いによるBDRの変化を追うことで高電界下でのRF放電に対する基礎的研究に使えることが分かってきた。

狭導波管放電実験では、BDR結果の再現性の低さ

や履歴による結果の違いがみられ、放電に至る条件の複雑さを反映しているものと思われる一方、放電開始位置の分析では、印加RFパルスの先頭付近での放電発生頻度が少ないことなど、放電発生にあるメカニズムが存在するらしいことも分かってきた。今後は、集積した未解析のデータをより詳しく解析する予定である。また新たな金属材料での同一形状の狭導波管を製作し試験することも考えている。

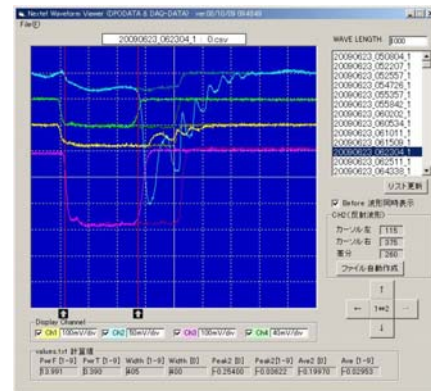


図5：RFパルス内での放電開始位置の同定。保存されている波形データを使い解析する。

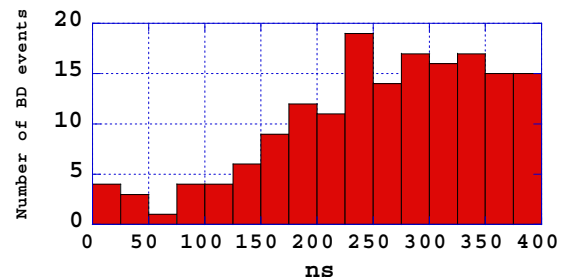


図6：RFパルス内での放電開始位置の分布。CU005。400ns、86MV/mでのRUN。BDR=1.99e-4 /pulse。放電総数は176個。パルス先頭部での放電発生がすくない。

参考文献

- [1] 肥後壽森ほか, “Xバンド高電界加速管の100MV/m試験” 本プロシーディングス。
- [2] V. A. Dolgashev, S. G. Tantawi, "RF Breakdown in X-band Waveguides," TUPLE098, EPAC'02, 3-7 June, 2002, Paris., France, pp. 2139-2141.
- [3] K.Yokoyama, et al., "High-Gradient RF Breakdown Studies with Narrow Waveguide", TU5PFP028, Proc. of PAC09, May 2009, Vancouver, B. C., Canada.
- [4] A. Descoudre, et. al., "DC Breakdown Experiments for CLIC", Proc. of EPAC08, Genoa, Italy, June 23-27, 2008, pp.577-579.
- [5] A. Grudiev, "Comprehensive analysis of rf test results", Talk at 2nd Collaboration Meeting on X-band Accelerating Structure design and test programs; <http://indico.cern.ch/sessionDisplay.py?sessionId=21&slotId=0&confId=30911#2008-05-14>.