

# HIGH-FIELD EXPERIMENT WITH NARROW WAVEGUIDE

Kazue Yokoyama<sup>1</sup>, Toshiyasu Higo, Shuji Matsumoto, Shigeki Fukuda,  
Noboru Kudoh, Yasuo Higashi, Yuich Watanabe  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK),  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

High-gradient RF breakdown studies have been in progress at Nextef (New X-band Test Facility at KEK) since 2006. To study the characteristics of different materials on high-field RF breakdown, we have performed high-gradient experiments by using narrow waveguides that has a field of around 140 MV/m at 50 MW power. The first high-gradient test was conducted by using a waveguide made of copper at XTF, the old X-band Test Facility at KEK. The second high-gradient test has been conducted by using a stainless-steel waveguide at Nextef. The result of second test showed that the stainless-steel waveguide had a better performance, fewer RF breakdowns for a higher electric field than the copper waveguide. Breakdown rate of stainless-steel case was measured and the results are described in this paper.

## 狭導波管を用いた高電界放電特性

### 1. はじめに

Nextef (New X-band Test Facility)では、異なる材料での高電界放電特性に関する基礎研究を2006年から進めている[1][2]。この基礎研究は、100 MWのRF入力で200 MV/mの電界が得られるように、導波管の幅と高さの両方を狭くした狭導波管を用いて高電界試験を行っている。この手法で達成できる電界値や放電頻度、及び物質表面の放電痕の観測などから物質による放電特性を実験的に調べるものである。このような物質による放電特性を調べる基礎研究は、常伝導加速器での安定な高電界加速の可能性を探るためにCERNやSLACでも行われている。例として、CERNでは電極にDC高圧をかけて表面のプロセッシングをした後に、放電頻度を測定して評価をしている[3]。また、SLACでは、幅、高さのどちらか一方を狭くした狭導波管を用いて放電による物質放電限界値を評価した[4]。Nextefでは、高電界RFを印加して物質の放電特性に重点をおいて研究を行っている。

Nextefでの最初の高電界試験は、銅製狭導波管を使用してXTF(X-band Test Facility)で行った[2]。プロセッシングは約1ヶ月行った。この結果をもとに、移設後のNextefではより信頼性の高い実験を行えるように設備を整えた。2番目の高電界試験は、ステンレス製狭導波管を使用してNextefで行った。より詳細な放電特性を調べるために、プロセッシングの方法の確立や放電時のRF波形の観測、放電頻度の測定法などを改良している。

本稿では、高電界試験の状況と、これまで行った銅製とステンレス製の狭導波管試験のまとめを報告する。

### 2. 高電界試験セットアップ

#### 2.1 狭導波管

狭導波管はWR90導波管をベースにしたもので、高さ10.16 mmから1 mmまで減少させた中央では、RF入力パワーが100 MWで約200 MV/mの高電界が発生するような設計になっている[2]。幅も狭めて群速度が約0.3  $c$ で通常リニアコライダー等で用いる加速管に近い値にした。表1に今回報告する狭導波管のパラメータを示す。

表1. パラメータ比較

| 製造番号                        | #CU002  | #SUS003         |
|-----------------------------|---------|-----------------|
| 物質                          | 銅 (OFC) | ステンレス (SUS316L) |
| vswr (測定)                   | 1.44    | 1.12            |
| loss[dB] (測定)               | -0.42   | -1.56           |
| vswr(HFSS)                  | 1.04    | 1.08            |
| Loss [dB] (HFSS)            | -0.26   | -1.83           |
| E-field@100MW (HFSS) [MV/m] | 212     | 189             |

#### 2.2 高電界試験セットアップ

狭導波管の高電界試験は、Nextef KT-1ステーションで行っている。この試験施設では、PPMクライストロンを用いて、パルス幅400 ns、繰り返し50 pps、RFパワー約50 MWまでの高電界試験が可能である。図1に、そのセットアップを示す。放電観測のために、鉛シールド内狭導波管周囲にX線

<sup>1</sup> E-mail: [kazue.yokoyama@kek.jp](mailto:kazue.yokoyama@kek.jp)

検出器（シンチレータ及びPMT）とアコースティックセンサーを設置している。また、方向性結合器から取り出したRF入出力、反射波形をクリスタルダイオードで検波し、オシロスコープ（DPO7054）でデータ収集を行っている[5]。図2にデータ収集系のセットアップを示す。RFトリップが起こった場合、10パルス分のデータを保存する。また、毎パルスの波形の積分値とピーク値を算出し、定常パルスと比較した値を保存している。これらの波形を解析することによって、放電イベントの同定が可能である。このシステムによって、狭導波管で見られる放電波形は、連続するイベントではなく1パルスの急激な変化であることがわかってきた。また、クライストロンで時々発生する、パルス欠けイベントの検出やRF変動も観測可能になり、狭導波管由来のイベントとの分別も可能になっている。

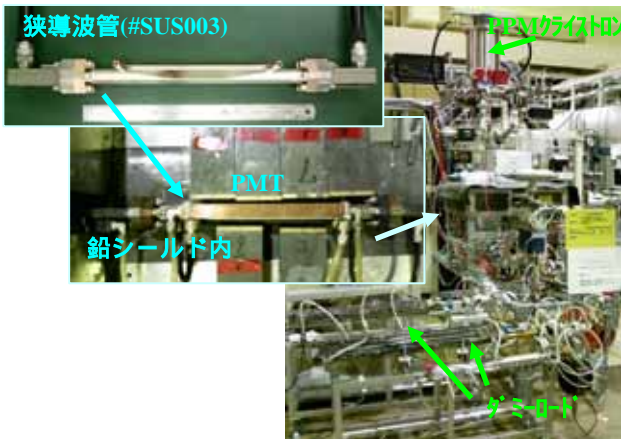


図1．高電界試験セットアップ。

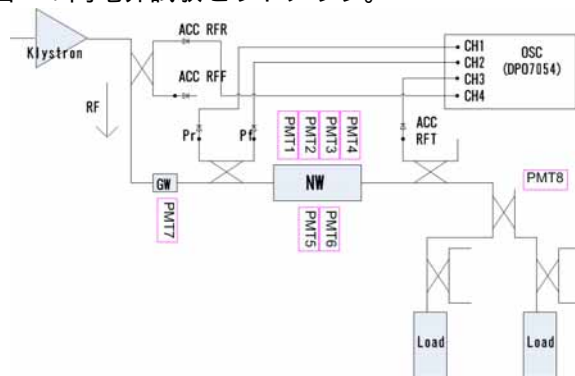


図2．RF波形データ収集システムブロック図。

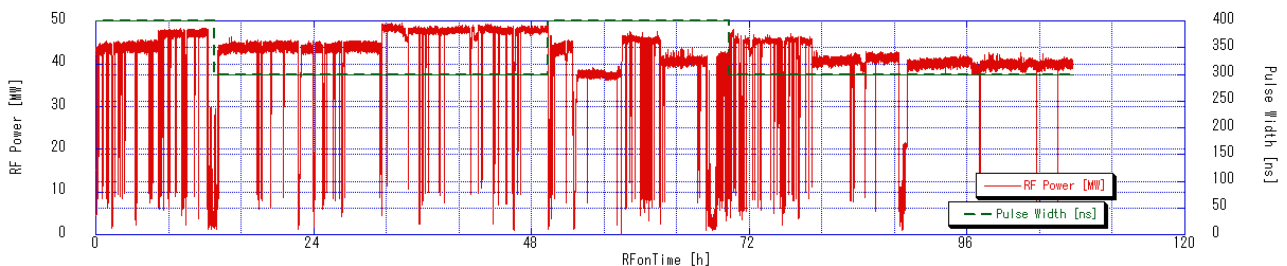


図3．放電頻度測定中のRFパワー推移。

## 2.3 プロセッシング

RF投入の初期には、表面の小突起や不純物を減らして表面状態を改善し、RF的になめらかにすることが必要である。この間の現象の特徴としては、真空圧力の増加(アウトガス現象)として現れる。真空圧力の大幅な上昇は二次放電を誘発し時には物質表面に大きなダメージを与える可能性があると考え、プロセッシングでは、このようなダメージを避けながら進めた。そのため、プロセッシングの自動運転プログラムでは、常に真空圧力をチェックしながら、パワーの増減を行っている。真空度が一定値以上悪くなった場合には、パワーを増やさない、また真空圧力の上昇があった場合には、パワー値を下げる等の制御を行っている。ここでの真空値の閾値、パワーの上げ幅や時間ステップに関しては、経験によるところが大きい。我々はこれまでの経験を勘案して、先ず短いパルス幅で電力を最大まで上げ、そのプロセッシングが終了したら次のパルス幅に広げるといったステップを踏んでいる。また、一定パルス幅でパワー値を増減させてプロセッシングを進めるだけでなく、パルス幅を変えてプロセッシングを進める方法も検討している。

最近では放電現象が電界の値のみならず、パルス内の物質表面温度上昇に関与するPT値パラメータ(RF入力パワー [MW]) $\times$ (パルス幅 [ns]) $^{\alpha}$ にも関連するとされ注目されている。この立場では物質表面の温度が上昇すると、物質疲労が起こり、表面が破壊される[6]。破壊が起きない程度のパワー値とパルス幅の最適なコンビネーションを物質によって見つけることができれば、プロセッシング時間はより効率よく進められると予想している。これらの実証も又本実験の目的の一つである。

## 3．実験

### 3.1 測定方法

放電の同定方法としては、RF反射波形の大きさ、入力波と透過波から求めるミッシングエネルギー、ファラデーカップで検出する急激な放出電流波形の変化、真空度の悪化によるもの等で判別するのが一般的である[7]。狭導波管内のどこかで放電した場合、反射波は通常状態よりも大きくなる。今回は、数MW程度のRF反射波レベルで、放電イベントを同定する方法を取った。将来的には反射波のみの方法でなく、より精度を上げる予定である。

放電頻度 (BDR) の測定は基本的に最大定格までのプロセッシングが終了した点から、投入電力の小さい方向へパルス幅や電力毎の放電回数を数える。今回は、電力、パルス幅を一定にして、約24時間運転を行い、その間の放電によって落ちた回数からBDRを求めた。図3にBDR測定中のRFパワーのトレンドグラフを示す。一度大きな放電が起きると、元のパワーに戻るまで低いパワーでも多くの放電が起きる。この現象は、大放電で荒れた表面が再度滑らかに改善されるまで放電が繰り返されると推測している。この状態は今までと異なった状態になるために、元の測定パワーに戻るまで再度のプロセッシングが必要になる。そのため、この状態での放電はBDR計測には含めなかった。

### 3.2 結果と考察

図4に#CU002と#SUS003のプロセッシングによる達成PT値と電界を示す。図4において上限はプロセッシング中の最大値、中心値がガウス分布を仮定したときの値である。#CU002の試験は、XTFで行ったが放電頻度が高く、50 MW以上投入できなかった。#SUS003では、Nextef KT-1ステーションで可能な最大RFパワー(50 MWレベル)に達してしまい、試験体により決まるであろう限界値に達していない。PT値は、耐放電性の指標であり、我々の限られたデータからはステンレスのほうが若干優れていると評価できる。但し、両者のプロセッシングの方法など試験環境の違いを考慮すると引き続き両材質の評価試験をする必要がある。また、本試験で得られたPT値は、SLACで行われた狭導波管試験での到達PT値より低い。この原因を探ることも今後の課題である[4]。

図5に放電頻度 (BDR) の測定結果を示す。これは#SUS003のデータだけであるが、各パルス幅ごとにBDRの電力依存性の大体の傾向が得られた。図に示した線は、BDRが電力の指数関数になっているとしてフィットしたものである。SLACの同様の試験は電力投入の限界を調べるもので、本試験のような定常状態でのBDRを測定するものではない。その意味で狭導波管でのBDR計測は初めてである。今後銅製狭導波管で同様のデータを取り図4の傾向と比較し、材質の違いを明らかにしたい。

## 4. まとめ

銅製とステンレス製狭導波管の高電界試験を終え、物質による放電特性の研究環境がほぼ整った。#SUS003に関しては、今後、SEM等による表面観察を行う。また、銅製狭導波管#CU004で、高電界試験を行い銅のBDR測定を行い、#SUS003と同じ実験環境での放電特性の評価を行う予定である。また、次の材料としてはジルコン銅を検討している。熱処理によって結晶配列が壊れる問題があるが、放電頻度を比較しながら製作方法を探究することも検討している。

## 参考文献

- [1] 松本 修二, 他 "100MW級Xバンド加速管試験施設 Nextefについて", in this meeting.
- [2] 横山 和枝, 他 "狭導波管を用いたX-band高電界試験", 第4回日本加速器学会・第32回リニアック技術研究会 プロシーディングス, TP09, 和光, Aug. 2007.
- [3] A. Descoudre, et. al., "DC Breakdown experiments for CLIC", Proc. of EPAC08, Genoa, Italy, June 23-27, 2008, pp.577-579.
- [4] V. A. Dolgashev, S. G. Tantawi, "RF Breakdown in X-band. Waveguides," TUPLE098, EPAC'02, 3-7 June, 2002, Paris, France, pp. 2139-2141.
- [5] 牛本信二, 他 " Nextef におけるRF波形データ収集システム", in this meeting.
- [6] J.J. Huopana, et. al., "Thermal Fatigue Issues in High Gradient Particle Accelerators," CLIC-Note-702.
- [7] M. Johnson, et. al., "RF-breakdown Experiments at the CTF3 Two-beam Test-stand", Proc. of EPAC08, Genoa, Italy, June 23-27, 2008, pp2800-2802.

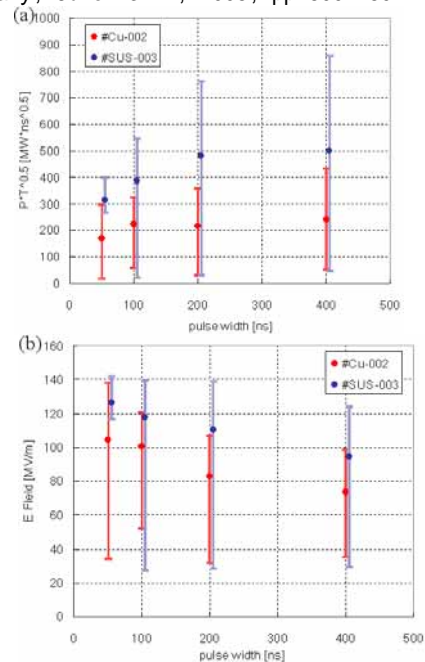


図4.物質放電限界。(a) PT値、(b)E-Field。

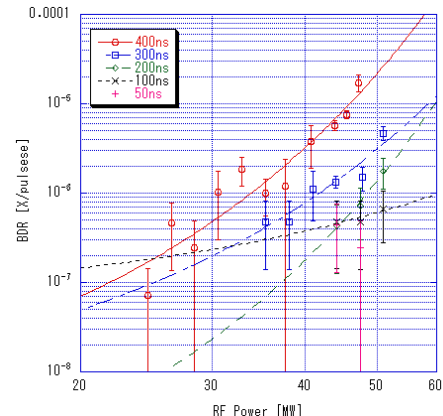


図5. #SUS003の放電頻度。