

HIGH-FIELD STUDY OF REDUCED CROSS-SECTIONAL X-BAND WAVEGUIDES

Kazue Yokoyama¹, Toshiyasu Higo, Noboru Kudoh, Yasuo Higashi, Shuji Matsumoto
Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK),
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Abstract

To study the characteristics of different materials on high-field RF breakdown we designed a reduced cross-sectional waveguide that has a field of approximately 200 MV/m at an RF power of 100 MW. This paper presents the first high-power test conducted on one of the copper waveguides at XTF and intermediate results of one of the stainless steel at Nextef.

狭導波管を用いたX-band高電界試験

1. はじめに

KEK X-band RF 試験施設 (NEw X-band TESt Facility : Nextef)では、リニアコライダー試験施設 (Global Linear Collider Test Accelerator : GLCTA)の資産を活用し、これまでXバンド開発で築いた技術経験を生かして、更に高電界の加速可能性(~ 150 MV/m)に対する基礎試験を進めている[1]。高い周波数帯での常伝導加速器は、小型加速器への応用、高電界を必要とする加速器や、更に高いエネルギーのLC加速器として期待される。加速器として実用的な高電界での運転を可能にするためには、暗電流を抑え、放電頻度を減らすこと、放電しても破壊されないことがあげられる。一般に、TiやMoなどの高融点材料は電界特性がよいとされる[2]。表面処理や材料の違いによる高電界特性を実験的に評価するために、100 MWのRF入力で200 MV/mの電界が得られるような狭導波管を設計した。まずは、プロトタイプのコピー銅製狭導波管の高電界試験(~ 130 MV/m、 ~ 400 ns、50 pps)をKEKアッセンブリーホール (X-band Test Facility : XTF) で約240時間行った。現在はステンレス製の狭導波管高電界試験をKEK入射器棟クライストロン組立ホールで行っている。両者のテスト環境の違いはあるが、ここでは、主に銅製のものについて報告する。

2. 狭導波管の設計と製作

狭導波管は、できるだけ実際の加速管に近いRF特性をもつように、群速度を下げ(~ 0.3c)且つ空洞内で進行波をもつために、中央部が極端に狭くなっている。その構造は、図1に示すように、WR90導波管がベースで、波長変換部は幅を22.86 mm ($\lambda_g \sim 32.15$ mm) から14 mm ($\lambda_g \sim 76.59$ mm) に、1波長程度の長さを持つコサインテーパーで中央に向けて高さを10.16 mmから1 mmまで減少させたものである。全長をコンパクトにするために、1 mm高さの中央

部の長さをパラメータにしてHFSSの計算でコサインテーパーの反射のマッチングをとるようにした。そのため、電界分布は図1右上に示すように3つ山を持つ。銅よりもステンレスの方がパワーロスが大きいため電界は低くなり、Z軸に対する電界の対称性は悪くなる。狭導波管内での電場特性に関しては、狭導波管の製作精度にも依存するため、ビード測定を行うなどしてより詳細な情報を得る必要がある[3]。また、プロトタイプのコピー銅製狭導波管Cu-002ではVSWRが1.4であるが、SUS-003以降はロウ付けの改善などによりVSWRを低くすることができた。

銅製の狭導波管Cu-002は、図2に示すように各面のパーツ4つから成る。加工にはミリング及びワイヤーカット (WEDM) を使い、E面にミリングで最終加工を行った。これらのパーツは10 μm の化学洗浄を行った後水素ロウ付けで一体化され、さらに導波管フランジ (MO型) をロウ付けして最終コンポーネントになる。表1に狭導波管の各加工特性を示す。

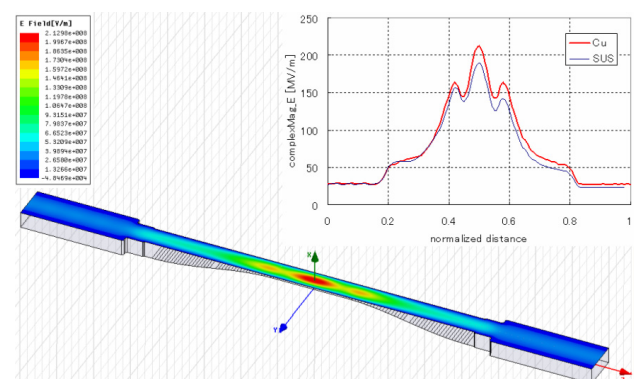


図1 : HFSSの計算による銅製狭導波管構造と電界分布。

¹ E-mail: kazue.yokoyama@kek.jp

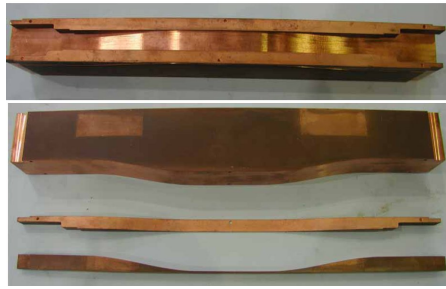


図2：狭導波管ロウ付け前加工パーツ。

表1：狭導波管製作仕様と特性。

	Cu-002	SUS-003	Cu-004
材料	無酸素銅OFC	SUS316L	無酸素銅OFC
アニール	500 °C	1020 °C	500 °C
加工	ミリング、WEDM	ミリング	ミリング
洗浄	CP	SUSpika	CP
接合	Cu/Au/Ni, 水素炉	Cu/Au, 水素炉	Cu/Au, 水素炉
VSWR	1.4	1.12	1.02
Loss [dB]	-0.42	-1.62	-0.32
高電界試験	完了	試験中	今秋試験予定

3. Cu-002の高電界試験

3.1 セットアップ

銅製狭導波管Cu-002の試験をXTFで約1ヶ月半の間行った。日中約10時間の運転で、計約240時間のエージングが行われた。セットアップを図3に示す。放電イベントはRF入出力、反射波形のモニター、及びアコースティックセンサー、X線検出器（シンチレータ及びPMT）の検出信号によって確認することができる。

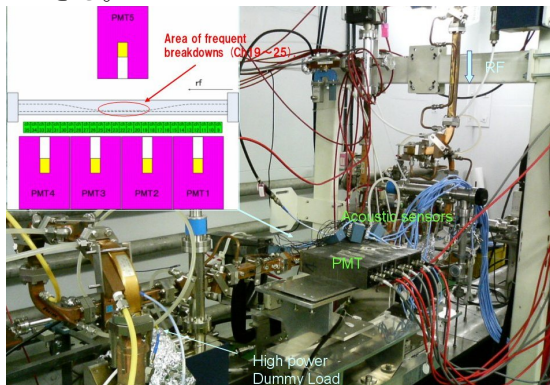


図3：XTFでの狭導波管高電界試験のセットアップ。

3.2 RFプロセッシングと放電

RFプロセッシングは、繰り返し50 ppsで、パルス幅50 ns、100 ns、200 ns、400 nsと広げていった。50 nsでは、RF入力パワーが約40 MW付近で放電が頻発した。400 nsでは約20 MW程度で放電限界があるように見受けられた。図4に電界強度とパルス幅に関するプロセッシング履歴を示す。パルス幅50 nsでは約130 MV/m相当に達した。図5にパルス内の物質

表面温度上昇に關与するパラメータである(RF入力パワー [MW])×(パルス幅 [ns])^{1/2} と放電頻度を示す[4]。今回の試験によるこのパラメータの最終値は400 MW·ns^{1/2}程度で、放電積算数は約2300回である。施設の移転関連で、Cu-002に関する試験はここで終了することになった。

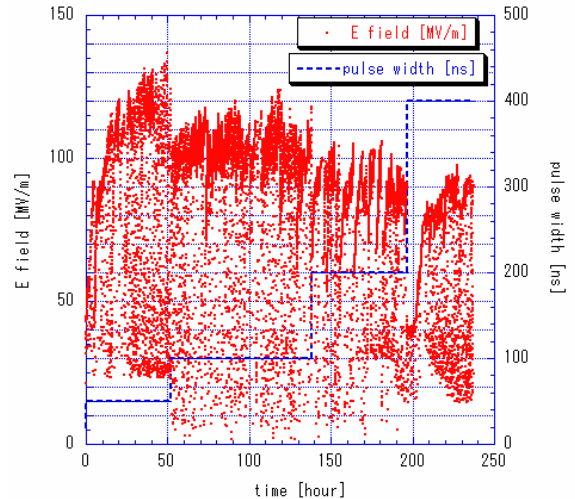


図4：Cu-002狭導波管RFプロセッシング履歴、電界強度とパルス幅。

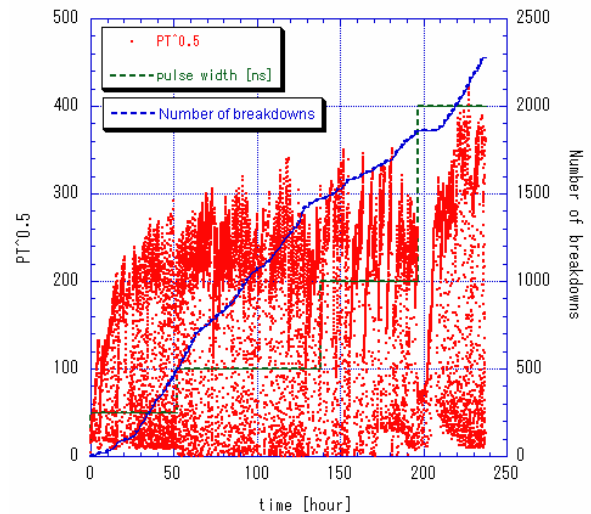


図5：Cu-002狭導波管RFプロセッシング履歴、 $P \cdot T^{1/2}$ 値と放電頻度及びパルス幅。

3.3 表面観察

高電界試験後、Cu-002を図6のように解体したところ、H面が高さ1 mmの部分の上流あたりにE-面において多数の放電痕が見られた。放電痕の多くなりかけの部分（図中赤枠表示部）についてSEMを用いての表面観察を行った。放電痕の典型例を図7に示す。丸いスポットの中央に溶解した物質の塊が見受けられ、それが周囲に飛び散っているように見えるのが特徴である。図7④のように放電痕の激しい部分では、レーザー顕微鏡による表面粗度の測定によると、突起が20 ~ 30 μmになっていたことがわかつ

た[3]。

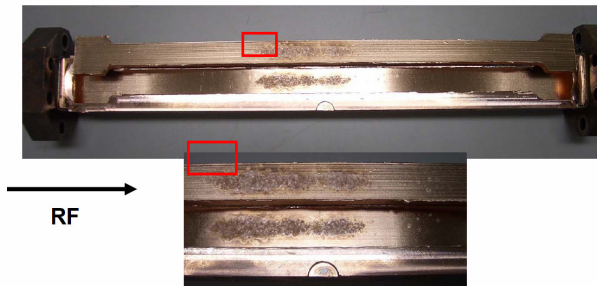


図6：Cu-002を2つにカットして上下に並べて置いた写真。

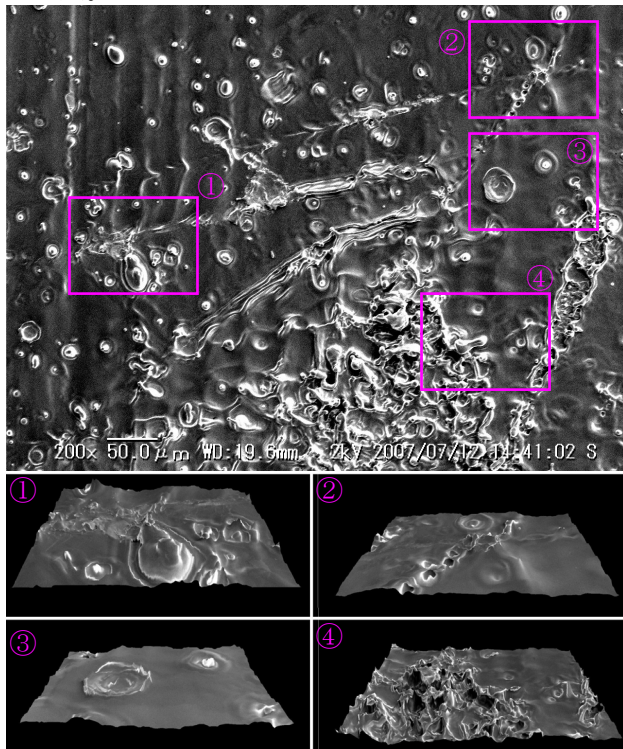


図7：SEMによる3D表面観察例。

5. SUS-003の高電界試験

SUS-003の高電界試験をKEK入射器のクライストロン組立ホールで約1ヶ月間行った。施設移転直後であったため、セットアップとしては、放電イベントはRF入出力及び反射波形のモニター及び、X線検出器の検出信号によって確認した。24時間運転を行うことができたため、約1ヶ月で約400時間のRFプロセッシングが行えた。Cu-002と同様、RFプロセッシングは、繰り返し50 ppsで、パルス幅50 ns、100 ns、200 ns、300 ns、400 nsと広げていったが、200 nsあたりからクライストロンと狭導波管の間の仕切り窓が問題でRF出力のパルス欠け現象が頻発し、放電現象よりもシステム的な問題によるRFダウンイベントが多くなってしまった[5]。そこで、50 ns、100 nsでRF入力を増やす試験を行った。50 MW (~ 130 MV/m) まで増やしたが、放電頻度は顕著にならな

いことがわかった。図8に運転時間に対するRF入力パワーとパルス幅を示す。今後、ガードウィンドウの交換を行い、長パルスでの高電界試験を行う予定である。また、100 nsまでの短パルスでは50 MW入力でも放電現象は少なかったため、さらに高いパワーでの試験を今秋に行うことを予定している。

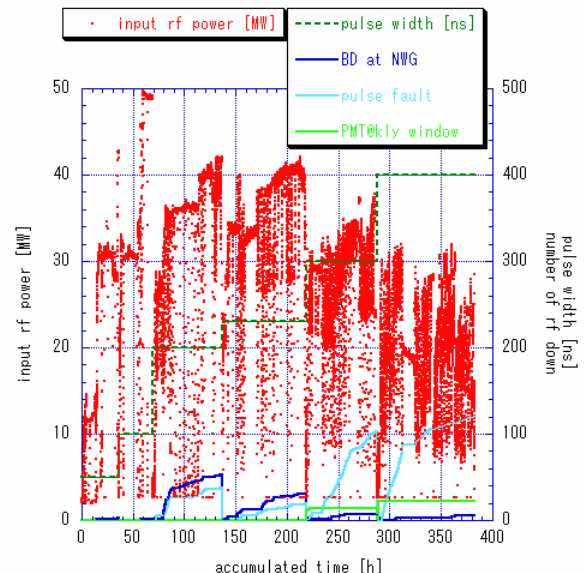


図8：SUS-003狭導波管RFプロセッシング、RF入力パワーとRFダウン頻度及びパルス幅。横軸は積算運転時間。

6. まとめ

Nextefでは、表面処理や材料の違いによる高電界特性を実験的に評価することを進めている。今回報告したCu-002とSUS-003の高電界試験では、銅製よりもステンレス製の方が、ショートパルスに関しては放電頻度が少なく耐放電性が良いという結果が得られた。今後、SUS-003と同じテスト環境で、銅製狭導波管Cu-004の高電界試験を予定している。また、銅製のもので加工や洗浄方法が違う狭導波管や、TiやMo製の狭導波管の製作も進めている。

参考文献

- [1] 松本 修二, 他 "KEK X-band RF試験施設 (Nextef) について", TO03, in this meeting.
- [2] P. Wilson, "A Theory for the Comparative RF Surface Fields at Destructive Breakdown for Various Metals", SLAC-TN-06-003, 2006.
- [3] K.Yokoyama, et al., "High Field Performance in Reduced Cross-Sectional X-band Waveguides made of Different Materials", Proc. of PAC07, Albuquerque, NM, USA.
- [4] Dolgashev, et al., "Study of RF Breakdown in Normal Conducting Structures with Various Geometries and Materials", Advanced Accelerator Concepts Workshop 2006, Lake Geneva, Wisconsin, July 10-15, 2006.
- [5] 松本 修二, 他 "XバンドPPM クライストロンの開発", 第31回リニアック技術研究会, 仙台, FP35.