

# CHANGE OF HIGH GRADIENT PERFORMANCE DUE TO HEAVY DAMPING GEOMETRY

Toshiyasu Higo<sup>#</sup>, Shuji Matsumoto, Kazue Yokoyama, Shigeki Fukuda,  
Yasuo Higashi, Toshikazu Takatomi, Kenji Ueno  
KEK, High Energy Accelerator Research Organization  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

Higher gradient performance has been pursued at KEK based on X-band accelerator structures. This program sets the nominal field level of 100 MV/m aiming at CLIC baseline and the study has been conducted under a close collaboration among CERN, SLAC, KEK and related institutes. Last year we have reported the performance of an un-damped structure which was successfully operated at the nominal field. This year we have been conducting the similar structure except for the heavy damping feature for all of the cells. The processing speed was slower than the un-damped one but finally reached the nominal field. The final breakdown rate showed higher than the un-damped one by more than an order of magnitude. Various features, which may be related to the performance change, were observed but the actual mechanism and reason of the difference between un-damped and damped structure is still not clear. We present in this paper these various characteristic features of the present damped structure with referring to those of the un-damped one.

## 強減衰構造に起因する高電界特性の変化

### 1. はじめに

LHC の実験結果が出始めると共に TeV 領域での電子陽電子リニアコライダの必要性が明らかになってくると、100MV/m 級の加速勾配をもつ加速技術が重要になる。KEK や SLAC では 2006 年より CERN との共同研究として、CLIC[1]を目指した試験加速管の高電界試験を行ってきた[2,3]。昨年の本学会報告では、CERN、SLAC、KEK の共同で進めている加速管試験について、主に KEK の X バンドテスト施設 Nextef[4]において進めている試験について述べた[5,6]。この加速管は、加速パラメータはほぼ CLIC 仕様であるが、ダンピング構造をもたない最初の試験加速管（コードネーム T18）である。加速勾配 100MV/m 超の運転は可能であり、50 km に及ぶライナックを形成した時の加速管に許される放電頻度、 $\sim 10^{-7}$ /パルス/m を達成できることが示された。

その後、加速パラメータは殆ど同じで、高次モードをダンピングするための磁場結合孔とそれに続くダンピングチャンネルを有する強減衰型加速管を製作し、同様の試験を行った。本稿では、ダンピングポートを導入したために生じたと思われるいくつかの特徴を述べる。現在 CLIC の加速管[7]はこの強減衰型加速管を設計基準に据えているので、この可能性や課題、今後の開発方針について議論する。

### 2. 加速管デザイン

高電界を目指す加速管とするため、加速管のレギュラー部分の群速度を 1% 前後まで落とし、そのために加速の有効長は 17 cm 程度の加速管である。

またカプラーでの問題と切り離すため、導波管から直接円筒導波管の TM01 型モードに変換することにより、電磁界の増強が無くスムーズに加速モードに変換できるような設計としてある。TM01 モードはマッチングセルで高電界レギュラー部分とマッチングをとり、レギュラーセクションに接続される。

レギュラーセルの加速パラメータは図 1 に示す。T18 がダンピング無し、TD18 が強減衰の加速管である。共に 60MW 程度のパワーを必要とし、電界強度分布などは殆ど同じである。この設計で特徴的なのは、下流に向かって加速電界が上昇し、それに伴って表面電界もかなり高くなることである。もしこれが問題であれば加速電界プロファイルを平坦にすることはできるので、現在これについては余りきにしていない。特に群速度が小さくなった場所であり、問題は少ないと考えている。

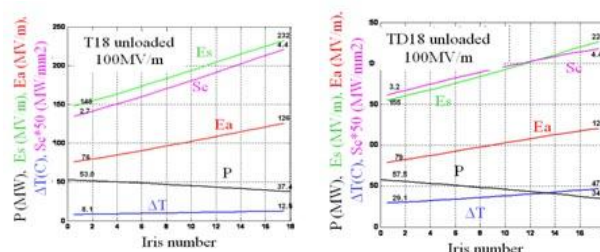


図 1 : 試験加速管パラメータ

一方本稿で問題にする強減衰にした時の特徴的な違いは、 $\Delta T$  で表されているパルス内表面温度上昇に現れる。図 2 のセル中心部拡大写真にあるように、減衰の為に各セルには 4 つの開口部があり、加速モードの閉じ込めを効率的に行い、しかも高次モー

<sup>#</sup> toshiyasu.higo@kek.jp

ドの Q 値を 10 以下に抑える類の設計のため、開口部に磁場の集中が生じる。これがパルス内温度上昇の最大値を決めるが、図 1 から読み取れるように、減衰無しで 13°C 程度であったものが減衰孔を設けると 50°C 近くまで上昇してしまう。この値はどこまで許容されるかははっきりわかっていないが、40°C 程度には抑えねばならないのでは無いかと考えている。本稿の試験はその許容限度に関する試験データを供給することになる。



図 2 : 強減衰加速管セルの減衰孔近傍

### 3. 実験手法

#### 3.1 加速管の製作

試験加速管の製作方法は、GLC/NLC 開発時代に築いた方法を忠実にとることを基本に進めている[8]。将来は種々の改良もあり得ようが、高電界の可能性を追求するにあたり、これが現状では一番物事の本質に迫ることができると考えている。

全てのパーツは KEK が製作する。クラス 1 の無酸素銅バーを輪切りにし、超硬ツールでのミリングを行い、これを正確に位置決めして単結晶ダイヤモンドの旋盤加工を施して作る。これらのディスクは拡散接合を用いて接合するので、平面度は  $0.5 \mu\text{m}$  より良い精度で平面を形成していることを重要視している。カプラーも同様に製作するが、こちらは U 字型チャンネルと蓋のセットをロウ付けにより部分組立し、拡散接合した本体にシートロウで接合する。

パーツ完成時点でスタック・クランプによるビードプルでの RF 計測を行い、加速管全体の確認をしてから SLAC に送り出す。SLAC では接合直前に化学研磨を行う。本稿で述べる二種 (T18、TD18) の加速管セルに対しては、SLAC で「Light Etching」と呼んでいるサブミクロンのエッチングを行った。GLC/NLC 時代には、ミリングを含むセルはいわゆる「Heavy Etching」を行って高電界特性を安定化させてきているので、今回の Light Etching の選択は問題になるかも知れない。エッチング後、水素炉での拡散接合 ( $\sim 1040^\circ\text{C}$ 、 $\sim 1$  時間) とロウ付けを経て組立される。最後に、二重排気できる真空容器内に組み立てられた加速管を入れ、 $650^\circ\text{C}$  で 10 日程度のベーキングを行って完成させる。KEK に送る加速管はその後窒素パージ状態で空輸される。

#### 3.2 Nextef へのインストール

輸入後は内面の汚染を嫌うのでインストールまで

は開封しない。インストール直前に窒素フローを確保するチュービングを取り付け、システム側も窒素フローを確保しながら真空作業を行う。システム内に組みこまれた状態を図 3 の写真に示した。

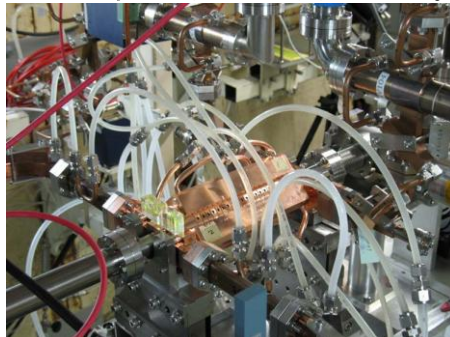


図 3 : Nextef での TD18 加速管セット

#### 3.3 試験方法

Nextef での試験方法は基本的にこれまでと同様である。プロセッシングはプログラムにより自動で進められる。繰り返しは通常 50Hz 固定とした。短パルス (50ns) から始め、100MV/m まで到達した後に適宜パルス幅を伸ばしていくこととした。加速管周辺の導波管に方向性結合器を設置し、入力波、反射波、透過波をモニターする。大きな反射波が発生したら次のパルスは止めて最後から 9 パルスまでさかのぼって波形を記録する。反射波のインターロックレベルは通常正常パルスでの値より多少上にセットする。方向性結合器の方向性が十分でなく、 $\sim 20\text{dB}$  程度の漏れがあるのでこれを余儀なくされている。但し、これを用いて時間の原点を確認することができる。加速管の放電時には多量の電子フラッシュが発生するので、上流・下流でこれを常時モニターし、これも放電の同定に用いる。実際には RF 波形が殆ど変化しない小さい放電でもカレントフラッシュはよく観測されるので、こちらの方が感度の良いモニターになっている。これらの波形を解析することにより、放電の大きさ、発生場所などを解析する。

### 4. 実験結果

#### 4.1 プロセッシングスピード

プロセッシングと後の各種特性計測を含む全運転履歴を図 4 に示す。加速電界を RF オンの積算時間の関数としてプロットしてある。左図 (T18) では、80MV/m での初期性能を調べるために 600~1200 時間では運転ターゲットを固定して運転している。その間の放電頻度は通常のプロセッシング期間に比べて小さいことがわかる。正味の RF オン時間で  $\sim 1200$  時間かけて正規パラメータの 100MV/m、250ns を達成している。これに対して、右図 (TD18) では初期のパルス幅である 50ns のプロセッシングで非常に時間がかかり、相応の回数放電も発生経験している。しかし正味  $\sim 1200$  時間後には正規の運転レベルに達したことがわかる。但し、T18 では正規運転

状態に至るまでの総放電回数が 1000 回程度であるが、TD18 では 5000 回にも及んでいることに大きな違いがある。この差は図 5 に示した、 $\text{Pin} \times \sqrt{\text{Tp}}$  の上昇パターンにも顕著に現れている。この値はパルス温度上昇に関係する量であり、以前の我々の空洞では  $\sim 1200 \text{ MW} \cdot \sqrt{\text{ns}}$  に漸近したものである[9]。実際の表面温度上昇は図 1 に示したようにセル形状により 4 倍程度異なるので、直接の比較指標にはならないが、各加速管でのプロセッシングの進捗を評価することに対しては意味がある。

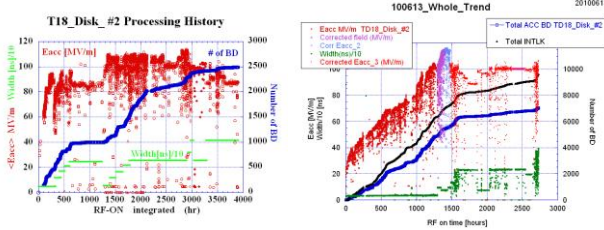


図 4：全運転履歴 加速電界と RF オン時間  
赤：Eacc 平均加速電界、緑：Tp/10 パルス幅（×10ns）、青：#BD 加速管由来の放電回数

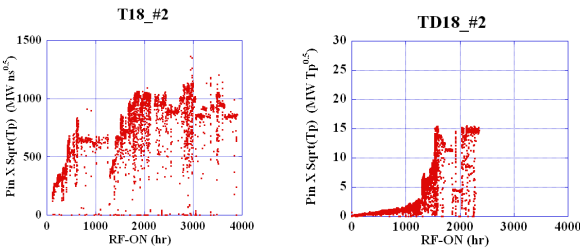


図 5：放電積算回数に対する  $\text{Pin} \times \sqrt{\text{Tp}}$

#### 4.2 放電頻度

図 6 に TD18 で計測した典型的な放電頻度を加速電界の関数としてプロットしてある。左図内の数字はプロセッシング開始からの積算運転時間であり、運転とともに減少してくるのは 100MV/m での数点を見ると明らかである。また、パルス幅依存性のある時期集中して計測した例を右図に示した。パルス幅の 5~6 乗であり、T18 の結果とほぼ同じ依存性を示した。

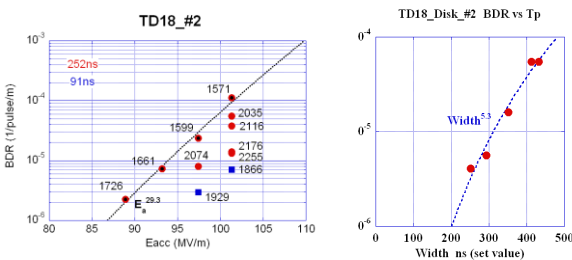


図 6：TD18における放電頻度：左図の数字は計測開始までのプロセッシング積算時間を示す。右図は 100MV/m でのパルス幅依存性の典型例。

また図 7 には TD18 で 100MV/m、250ns での放電頻度減少を時間の関数としてみた例を示した。この例では指数関数的な減少傾向が見られたが、この減少がこのまま継続したとしても CLIC で必要とする  $10^{-7}$  レベルまで減少するには 1500 時間が必要であり、おそらく運転しながら放電頻度の減少を待つ必要が生じるが、当然この傾向がこのまま継続する保証はないので、これを加速器設計に勘案することはできない。

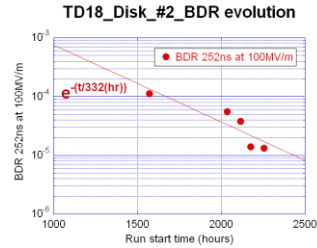


図 7：TD18 での放電頻度減少例

このような傾向が最近の TD18 加速管試験から得られたが、加速電界の関数として放電頻度を比較したものが図 8 である。上で述べたように TD18 では放電頻度はまだ減少中であるので単純な比較は困難であるが、正規運転状態に到達した直後（～1500hr 時点）の放電頻度を T18 のそれと比較した結果である。TD18 では 1000 時間程の運転を経て～1 桁頻度が減少したが、それでも T18 に比較するとまだ 1 桁程度大きいことがわかった。この比較には SLAC での評価を含めている[10]。

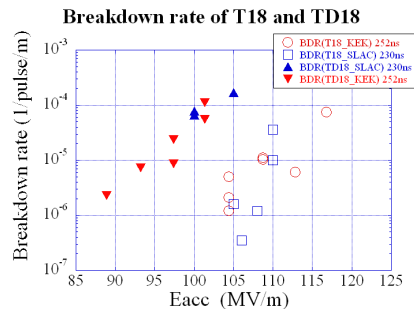


図 8：放電頻度の比較

白抜き○□は T18、▲▼は TD18 の結果であり、赤は KEK、青は SLAC での結果である。

#### 4.3 暗電流

電界放出電子が関連している暗電流は、加速管のプロセッシング度合いを表しているし、放電頻度にも関わっていると考えている。図 9 に加速管下流～50 cm に設置したファラデーカップで計測した暗電流の時間経過を電界の関数としてプロットした。左図は T18 でパルス幅 252ns、右図は TD18、パルス幅 50ns のデータであるが、共に総電荷量はパルス幅にほぼ比例することが確認されているので、各々のピーク電流値で比較できると考える。ピーク電流値  $10 \mu\text{A}$  となる加速電界を比較すると、T18 では 90MV/m、TD18 では 70MV/m であり、T18 の方が



高いことがわかる。但し後者はまだプロセシングが進行中である可能性があり、この後更に電流値は下がり、T18に近づく可能性があると考えている。

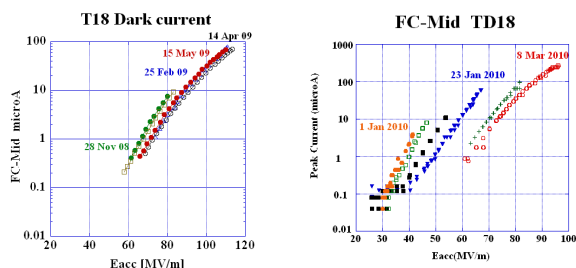


図8：暗電流比較：左図はT18、右図はTD18、両者パルス内のピーク電流値を表示

#### 4.4 真空圧力上昇

TD18 加速管では真空圧力の挙動が T18 と顕著に異なっていることがわかった[11]。数 MW から 10MW あたりで真空圧力が悪化する。この現象は、正規のパワーレベルで長期に運転していてパワーを下げた時にも現れ、また数時間以上運転しないとその後パワーを投入する時にも起こる。発生するパワーゾーンには再現性があるので、マルチパクタリングではないかと考えている。TD18 にはダンピングポートがあり、加速モードの電磁場は半径方向に進むに従い指数関数的に下がる訳だが、低い電場に起因していることが考えられ、マルチパクター発生条件を評価してみるべきである。

### 5. 議論

ダンピング無しの加速管 (T18) と同様の作り方、試験方法で、強減衰を実現するダンピング有りの加速管 (TD18) を製作し、高電界試験を行った。T18 に比較して、

1. 初期プロセシングに時間がかかったこと、
2. 2000~3000 時間で到達した放電頻度は 1 桁程度高いこと、
3. 放電頻度が減少する時間は現実ではない程長いこと、
4. 暗電流が多いこと、
5. 低パワーレベルでのマルチパクタリングを想定される真空悪化を生じる、

等の差異が観測された。

現在放電の原因を追及すべく放電時の波形解析改良を進めている。また、パルス長依存性のみでなく、ダブルパルス波形にして放電頻度や放電時間等の比較を通じて放電の特徴をつかむことを狙っている。例えば、放電により透過波の欠けが生ずるが、このタイミングを計ると放電場所が電界に曝されていた時間がわかるが、パルスの末尾に近づくに従って放電が多くなるように見える。しかし放電頻度のパルス幅依存性が 5~6 乗になるとしたときのパルス内放電時刻の分布として想定される末尾での放電頻度が大きい事と比べると、パルス内中央付近の放電頻度はかなり大きい[11]。この状況は狭導波管での高

電界試験にも見られる[12]。

T18 はセル内全てをダイヤモンド超精密旋盤加工で製作してあるが、TD18 はミリング部分がかなりのエリアを締め、高電界がかかる近傍まで存在する。しかし今回の製作では、エッチング条件を超精密ダイヤモンド旋盤加工の場合と同じにして進めてしまったことが、放電頻度や暗電流の多さにつながっている可能性があるため、今後エッチング条件を改善した実験を進めるべきと考えている。また、ダンピング導波管を挿入したために生じていると思われる真空悪化等に関連しているとか、パルス内温度上昇が大きいことに関連して放電頻度が高いことも考えられるので、原因を追及するためにパラメータを変更してパルス内温度上昇を抑えた加速管の試験を行うべきである。現在後者に関するパラメータ変更をした 24 セル加速管、T24 及び TD24 を SLAC で製作中であり、今年度内の試験を計画している。

### 謝辞

一連の加速管高電界試験は、CERN との共同研究のもとに進められています。J-P. Delahaye 氏を始め CLIC の方々には加速管の基礎設計や各種の議論、また解析等に尽力頂いており、感謝致します。また、同じ共同研究体制をとって、特に加速管製作と試験両面から KEK と相補的に試験を進めている SLAC の関係する方々の多大な努力が無ければこの試験事態が有意義なデータを取り出すことができず、S. Tantawi 氏以下 SLAC の方々には多大な貢献を頂いており、ここに大いに感謝の意を表します。最後に、ITRP 以降も高電界加速に関係して本稿につながる研究をサポートして頂いている KEK 首脳部に感謝致します。

### 参考文献

- [1] J.-P. Delahaye, "Towards CLIC Feasibility", FRXCMH01, IPAC10, Kyoto, May 2010.
- [2] C. Adolphsen et al., "Results from the CLIC X-Band Structure Test Program at NLCTA", PAC09, Vancouver, 2009 and SLAC-PUB-13697, 2009.
- [3] T. Higo, et al., "ADVANCES IN X-BAND TW ACCELERATOR STRUCTURES OPERATING IN THE 100 MV/m REGIME", THPEA013, IPAC10, Kyoto, May 2010.
- [4] S. Matsumoto et al., "THE STATUS OF Nextef; THE X-BAND TEST FACILITY IN KEK", THP053, LINAC08, Victoria, Canada, 2008.
- [5] T. Higo, et al., "STUDY OF 100MV/M ON X-BAND ACCELERATOR STRUCTURE", FPACA24, 第6回日本加速器学会, 東海, 2009
- [6] T. Higo, et al., "STATUS AND PERSPECTIVE OF X-BAND ACCELERATION RESEARCH AT KEK, WOOPF01, 第6回日本加速器学会, 東海, 2009
- [7] A. Grudiev, "Update on structure optimization procedure, input and results. CLIC reference structure", 2nd collaboration meeting on X-band structure, KEK, May 2008.
- [8] J. Wang, et al., "FABRICATION TECHNOLOGIES OF THE HIGH GRADIENT ACCELERATOR STRUCTURES AT 100MV/m RANGE", THPEA064, IPAC10, Kyoto,

May 2010.

- [9] T. Higo et al., “Normal Conducting High-Gradient Studied at KEK”, TPH038, LINAC06, Knoxville, USA, 2006.
- [10] F. Wang and C. Adolphsen, “TD18 High Power Test Results”, 4th Annual X-band Structure Collaboration Meeting, CERN, May 2010, <http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=75374>
- [11] T. Higo, et al., “VARIOUS OBSERVABLES OF TW ACCELERATOR STRUCTURES OPERATING IN 100MV/m OR HIGHER AT X-BAND FACILITY, NEXTEF OF KEK”, THPEA012, IPAC10, Kyoto, May 2010.
- [12] S. Matsumoto et al., “Study of RF breakdowns in X-band High Field Regime”, FPACA26, 第6回日本加速器学会, 東海, 2009