

# ADVANCEMENT OF HIGH GRADIENT STUDY AT 100MV/M RANGE

Toshiyasu Higo<sup>#</sup>, Tetsuo Abe, Shigeki Fukuda, Yasuo Higashi, Shuji Matsumoto, Toshikazu Takatomi, Kenji Ueno, Kazue Yokoyama

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

KEK has been studying in recent years the high-gradient performance of the CLIC prototype structures. As of today, four structures of 20cm scale were evaluated through more than 2000 hours or so operation period. All of them showed the feasibility of operation at a gradient of 100 MV/m. It was found that the breakdown rate of the damped structure was two order of magnitude larger than that of undamped structure. The final structure (T24#3) with parameters modified from the structure (T18) has been running at 120 MV/m till the earthquake on March 11, 2011, and its performance indicates the feasibility of this structure with meeting the breakdown-rate requirement for CLIC. The next is to realize this performance in that (TD24) with damping feature.

## 100MV/m 級高電界加速試験の進展

### 1. はじめに

LHC の実験結果が始め 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<sup>[1]</sup> を目指した試験加速管の高電界試験を行ってきている<sup>[2,3,4]</sup>。

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 において進めている試験について述べた<sup>[5]</sup>。CLIC を想定すると、加速勾配 100MV/m 超の運転で、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 を満たす必要がある。昨年の報告では、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 (T18) では十分その要求を満たすことがわかったが、それと等価な加速モードパラメータを持ちダンピング構造を有する加速管 (TD18) では二桁近く放電頻度が高く、CLIC としての適用には問題があり、また放電、特にそのトリガーのメカニズムに関して、我々の理解の浅いことを思い知らされた。

その後の一年で、加速モードパラメータを改善したダンピング無しの T24 加速管の試験を行ったので、本稿ではそれまでの加速管特性と比較してこれの特性を報告する。また、TD24 加速管の試験後の SEM 評価を CERN にて行っており、その状況も報告して、今後の試験・開発方針について議論する。

### 2. 加速管設計パラメータ

レギュラーセルの加速パラメータは図 1 に示す<sup>[6]</sup>。T18、T24 がダンピング無し、TD18、TD24 がダンピング有りの加速管である。ダンピング有りの加速管が最終目標であるが、昨年試験した TD18 加速管の表面磁場は下流に行くに従って最高 50℃まで高

くなる設計である。これまでのいくつかの実験の評価から、表面磁場強度、又はそれに伴うパルス温度上昇、が放電に寄与していると考えられることがあり、実際に昨年度の TD18 加速管の放電頻度は T18 のそれに比較して非常に大きい。これらを考えると、ダンピング有りの加速管で放電頻度を下げるとともに表面磁場を抑えることが重要かもしれないと考え、TD24 設計を行い、それに倣ったパラメータで T24 加速管の設計とした。これらを図 1 に示した。

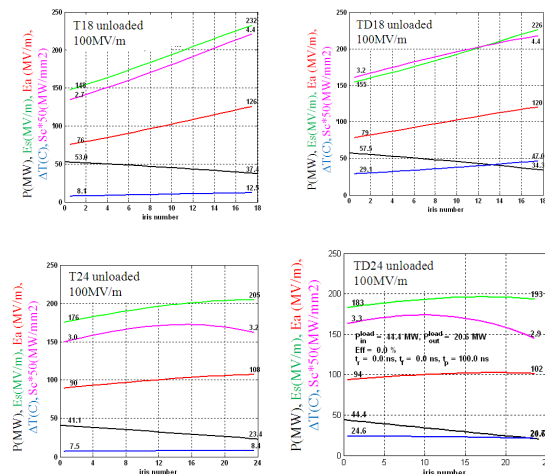


図 1 : 試験加速管パラメータ

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要因であるが、図 1 から読み取れるように、TD18 加速管で 50℃程度であったものが、加速モードパラメータをチューニングすること、及びミリングで形成するセル内径を決める場所に磁場を均一に分散

させることにより 25°C 近くまで抑えることができている。

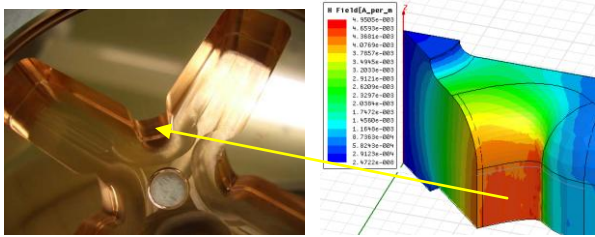


図 2 : TD24 加速管の表面磁場とセル

### 3. 加速管の製作と試験の実際

#### 3.1 製作・試験方法<sup>[5]</sup>

試験加速管の製作方法は、パーツ加工、組み立て、チューニング、ベークング通してこれまで同様に進めている。また、SLAC・KEK で各々ペアで製作した一台ずつを高電界試験に供しているのもこれまで通りである。試験方法もこれまでと基本的に同じである。

#### 3.2 プロセッシング及び試験方法

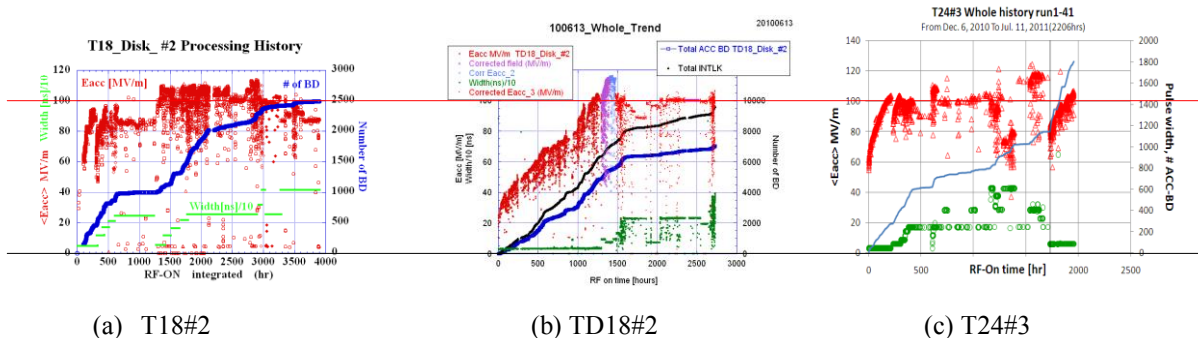
Nextef での試験方法は基本的にこれまでと同様である。プロセッシングはプログラムにより自動で進められる。繰り返しは通常 50Hz 固定とした。短パルス (50ns) から始め、100MV/m まで到達した後に適宜パルス幅を伸ばしていくこととした。加速管周辺の導波管に方向性結合器を設置し、入力波、反射波、透過波をモニターする。大きな反射波が発生したら次のパルスは止めて最後から 9 パルスまでさか

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の正常パルスでの値より多少上にセットする。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。これらの波形をオフライン解析して放電を調べる。

## 4. 実験結果

### 4.1 プロセッシング履歴

T18, TD18, T24 三台の加速管の全プロセッシング履歴を図 3 に示した。横軸はすべて 50Hz での RF オン運転時間である。T18 はこのシリーズの最初の試験加速管だったために多少プロセッシング速度が遅いことと、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た。実際に標準運転パラメータである 100MV/m、252nsec に到達した時間は T24 の ~ 400 時間に比べて長いようであるが、恐らく同じプロセッシング条件で立ち上げれば同等のスピードでの立ち上がりを示したのではないかと考えている。標準運転に到達するまでに経験した放電回数は T18 で 1000 回、T24 では 600 回であったが、これに対して 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、数千回もの放電も経ている。ダンピング有りの加速管の高電界特性、特に標準運転に至るまでの時間、放電回数ともから、ダンピング構造を付加したための加速管の問題を表している。



(a) T18#2

(b) TD18#2

(c) T24#3

図 3 : 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 : 加速管由来の放電回数  
赤線は 100MV/m を指し、比較用に用いる。

#### 4.2 放電頻度

図 4 には T24#3 で全プロセッシング期間内で何度か計測した放電頻度を加速電界の関数としてプロットしてある。点線でプロットした指数関数形はデータ点数が一点のみでも初期と同じ傾きを仮定してプロットした。図より放電頻度が時間と共に減少してくるのが明らかに見える。100MV/m での放電頻度をプロットすると、同図右になる。全プロセッシング

期間 1700 時間を通じて、減少し続けていることがわかる。時間の関数としての減少は、時間の関数として、累乗や指数関数で良く表されるが、後者の場合は (×1/e) となる時間は約 200 時間程度であった。

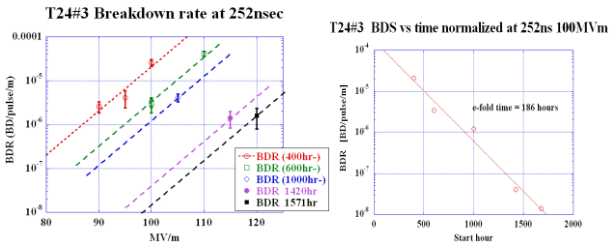


図4：T24 プロセッシング開始時からの積算運転時間5点で計測したT24の放電頻度。

この放電頻度を昨年までに得られたT18とTD18の加速管でのそれ<sup>[5]</sup>に乗せて比較すると、図5となる。この比較から、T24加速管の放電頻度はT18加速管より低いことがわかった、これはKEKでの計測結果であるが、SLACでの同一型加速管T24#2では、かなり高い放電頻度を呈している<sup>[7]</sup>。この違いは統計上のばらつきではなく、加速管自身の出来具合の違いや、インストール等での何らかの取り扱いの違い等から生じているかもしれないと考えており、今後その違いを生ぜしめるメカニズムを解明する必要があると考える。この特性がダンピング導入した場合の加速管TD24で如何に現れるかが今後注目されるところで有り、9月からの高電界試験の結果が待たれる。

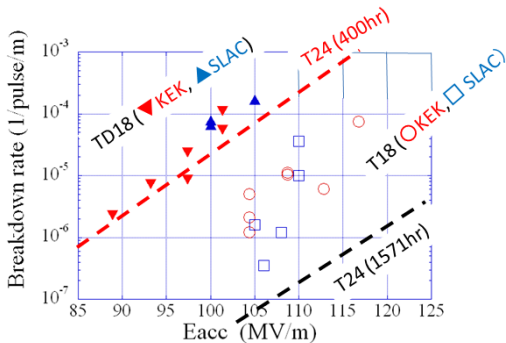


図5：放電頻度の比較：白抜き○□はT18、▲▼はTD18の結果であり、赤はKEK、青はSLACでの結果である。

### 4.3 放電場所

T24#3加速管の放電の場所をRFパルス波形から解析した例を、図6に示す。震災で一気圧まで空気でパージされたが、その前後で分布は変わらず、どちらも様な分布を示していた。但し、震災前のデータは252nsecデータであり、震災後はプロセッシングが進まないことにより、91nsecでのデータである。

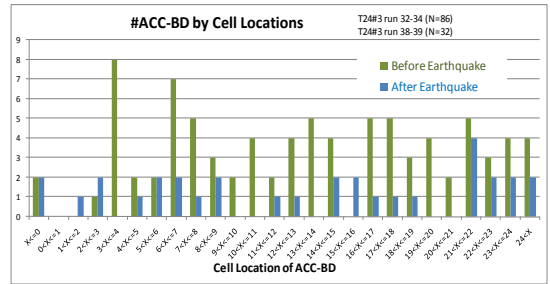


図6：T24#3加速管での放電場所のヒストグラム

### 4.4 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おり、昨年度の報告にも議論した<sup>[5]</sup>。図7に加速管下流～50cm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。ピーク電流値10μAとなる加速電界を比較すると、双方とも90MV/m弱であり、ほぼ同じで、以前計測したダンピング有りの加速管、TD18#2、での70MV/mに比べると同じ暗電流に到達する加速電界は共に高いことがわかる。但し、未だ暗電流量がそれ以外の高電界特性に如何に関わっているかはスペキュレーションの域をできていない。

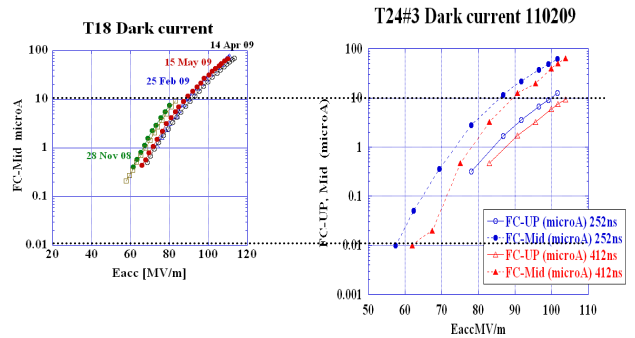


図7：T18とT24加速管での暗電流比較：左図はT18、右図はT24。両者パルス内のピーク電流値を表示してある。

### 4.5 SEMによる試験後加速管の表面観察

4.3節で議論したように、表面磁場の高いTD18加速管での放電頻度が多いことがわかった。この原因を追及するために、試験後の加速管のSEM観察を行い、ダンピング構造入り口で磁場極大部に、火山の硫黄ガス噴出部に見かける類いの構造を呈していることを確認した<sup>[8]</sup>。この構造は磁場や電場のフィールドが下流に向かうに従って高くなるが、それに従って下流に集中してかなりの確率で発生していることがわかった。

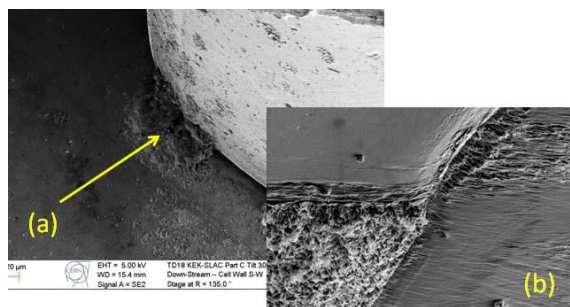


図 8 : (a): 高磁場部の微小孔の形成, (b) パルス加熱による結晶方位依存の表面の改質状況

## 5. 議論

今回、加速モード設計パラメータを調整して表面磁場を低く抑えられる構造とした T24 型加速管で、まずはダンピング構造無しの試験を実施したが、KEK での試験で得られた放電頻度は、以前の T18 加速管のそれよりも低い結果を得た。SLAC での試験結果は T18 加速管より悪化していたが、これを統計的ばらつきとみるか、積極的な原因が有るとみるかは現状不明である。が、CLIC の放電許容レベルに比べて十分低い加速管が可能であることは自明になった。

ダンピング構造を付加すると放電頻度が二桁上昇増加することが昨年度までの TD18 加速管の試験から得られたが、今後 TD24 加速管の試験を通じて今一度新しいパラメータの加速管での評価が待たれる。

今回の T24#3 加速管は、震災直前まで運転されていたが、3 月 11 日の震災時に導波管システムの転倒に引き摺られて恐らくフランジ面から空気リークでページされた。2 週間程度で窒素ページまで戻し、6 月から再度高電界試験を行った。ここでは 91nsec とかなり短いパルス幅でプロセッシングを継続したが、放電頻度が非常に高くなって、幅を広げてのプロセッシングは不可能であった。但し、放電の分布は震災前同様、図 7 に示したように、加速管の全体にわたり一様に生じているようである。

9 月から、ダンピング構造を持つ TD24 型加速管の試験を進める。T18→T24 での BDR 減少に対応して TD18→TD24 でも低い BDR を示すかを注目している

## 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を頂いており、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得ることはならず、S. Tantawi, J. Wang, F. Wang 氏等、SLAC の方々には諸方面の貢献を頂いており、ここに大いに感謝の意を表します。

## 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., “HIGH GRADIENT TEST AT NEXTEF AND HIGH-POWER LONG-TERM OPERATION OF DEVICES”, NIMA\_53664, 2011.
- [5] T. Higo et al., “強減衰構造に起因する高電界特性の変化”, THPS030, 第 7 回日本加速器学会, 姫路, 2010.
- [6] A. Grudiev, “Update on structure optimization procedure, input and results. CLIC reference structure”, 2nd collaboration meeting on X-band structure, KEK, May 2008.
- [7] F. Wang, private communication
- [8] M. Aicherer, CERN EDMS, “TD18 post-mortem SEM observation: Update,” presentation at CERN, 10 Nov. 2010.