

# CHARACTERISTICS OF VACUUM BREAKDOWNS UNDER HIGH GRADIENT PULSED OPERATION

Toshiyasu Higo<sup>#</sup>, Tetsuo Abe, Yoshio Arakida, Yasuo Higashi, Shuji Matsumoto, Tetsuo Shidara, Toshikazu Takatomi

<sup>A)</sup> KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 301-0801

## Abstract

We have been studying the feasibility of electron-positron linear collider using normal conducting X-band high gradient acceleration in its main linac. CERN compact linear collider, CLIC, has been aiming at a 100 MV/m acceleration with 2-beam acceleration scheme. In collaboration with CLIC, we have been studying the high gradient characteristics on the CLIC prototype accelerator structures. We proved that a CLIC damped structure prototype could be operated at such level with meeting the required breakdown rate for CLIC. Through the study on four types of prototype structures in the breakdown rate and associated damage to the accelerator structure, we have started studying the basic mechanism of the vacuum breakdowns under high gradient. We found that the breakdown rate keeps decreasing exponentially over several thousand hours of operation. The breakdowns show the statistically random appearance and governed by the parameters of the pulse. Some of these basic natures are described in this paper.

## 高電界パルス運転での真空放電現象の特性

### 1. はじめに

Higgs の可能性を示唆する実験データが LHC から発表されるに至り、電子陽電子リニアコライダの必要性が議論されている。500GeV 程度の低エネルギー衝突のみでなく、TeV を超える試験の必要性も次第に議論に上がってくると思われるが、その際重要な技術の一つに、100MV/m 級の加速勾配をもつ加速技術がある。KEK や SLAC では 2006 年より CERN との共同研究に一環として、CLIC<sup>[1]</sup>を目指したプロトタイプ加速管の高電界試験を行ってきている<sup>[2,3,4]</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、 $3 \times 10^{-7}$ /パルス/m を満たす必要がある、これが可能性を判断する目安になる。

昨年の本学会報告<sup>[2]</sup>では、これまでの 3 種類のプロトタイプ加速管の性能を調べた結果、最後に試験してきたダンピング無しの T24 型加速管が十分その要求値を満たす運転が実現できていることがわかったことを示した。同時に、HOM 抑制のためのダンピング構造を取り入れた加速管だとその性能が多少悪化するであろうことも洞察された。

本年は、その効果を調べるためにダンピング有りの TD24 型加速管を製作して高電界試験したので、その結果を、これまで試験したすべての加速管と比較して議論する。また、放電自身の発生メカニズムを追求する研究が多々進められている<sup>[6]</sup>が、本稿でも放電の特徴をいくつかの角度から調べることを通じて、高電界パルス運転に対する放電の発生に対する理解を深めることを試みた。

### 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 [7]。T は進行波型を表し、数字は加速セル数、D はダンピング構造であることを示す。TD24 が実際のプロトタイプにほぼ等価であるが、加速モードのパラメータがこれと同じでダンピング構造を持たないセルで構成する場合は T24 である。これに先だって試験した 18 セル設計加速管では、ビームローディングがかかった時にフラット近くなる設計であるが、初期のプロセッシングに起こる下流側での電界上昇や、表面磁場上昇が大きく、特にダンピング構造をもった TD18 ではダンピング無しの T18 加速管に比較して 2 桁ほどの放電レートの上昇を観測した。この例から、ダンピングを加えると放電レートが上昇するのであろうが、本来ビームローディングのあるときの放電レートをビーム無し状態で評価すること、またできるだけ表面磁場を低く抑えるセル形状最適化を行った加速管で評価すること、を目指したのが現在の CLIC プロトタイプとしての TD24 加速管である。この加速管は、図 1 から読み取れるように、磁場の二乗による表面温度上昇は、TD18 加速管で 50°C 程度であったものを 25°C 近くまで抑えている。

### 3. 加速管の製作と試験の実際

試験加速管は、パーツ加工は全て KEK が行うが、ここでは超硬バイトによるミリング後にダイヤモンド旋盤加工で行う。これらを SLAC にて標準の化学エッチングを施し、水素炉での組み立て、ディンブルチューニングを経て、最後に 650 度、1 週間以上のベーキングを施して製作完了する。常に SLAC・KEK での試験用に、各設計ごとペアで製作し、二ヶ所で高電界試験を行うことを旨としている。

試験手順もこれまでと基本的に同じである<sup>[2,4]</sup>。本論文では、特に KEK の Nextef での試験結果を用い

て議論する。

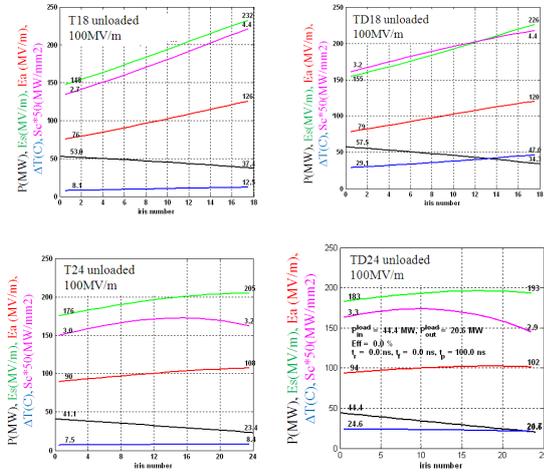


図 1：試験加速管パラメータ

### 3.2 新たな試験運転モード

本来のパルス波形では、マルチバンチの加速ゲインを揃えるために、加速管の充填時間とエネルギー調整用の時間を加えて 90ns のランピング時間がある。これを本稿では CLIC パルスと呼ぶ。これに対して通常は試験の簡便性やその評価を簡単にするために、フラットのパルスで試験を進めてきた。今回はフラットから CLIC パルスに変更した時に放電レートが如何に改善するかの評価を行った。CLIC パルスの例を図 2 の青パルスに示した。

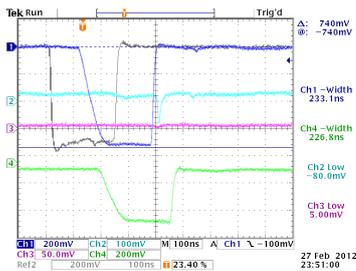


図 2：CLIC パルス波形：黒＝フラットパルス（参考）、青＝CLIC パルス、緑＝加速管からの透過波、水色＝加速管からの反射波

また、放電の統計特性を探るために、フラットパルスだが、パルス幅とパルス波高を数秒～10 秒程度の早い時間でスイッチングして放電レートの比較計測を試みた。図 3 に放電した時のパルスの分布の一例を示した。放電後には最小パルス幅にセットし、波高を多少低くして再開するが、図 3 の青点が示す第一パルス放電では、再開時に放電が頻発した時を示す低波高側への分布が見えている。本稿では、放電レートを運転再開直後の次の放電と位置づけており、赤で示した点群の解析を行った。一方、パルス波高も 3 点間でスイッチングしたが、今回はその

振り幅が小さく、三山が見えなかった。試験パラメータの選択又はシステムの改善点である。

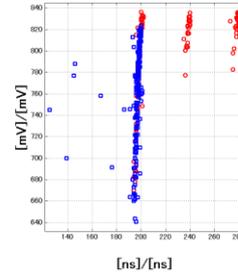


図 3：スイッチングモードで放電した時のパルス幅（横軸）とパルス波高（縦軸）の分布。赤は放電時、青は放電後の第一パルスから放電した時。

## 4. 実験結果

### 4.1 プロセッシング履歴

T18, TD18, T24, TD24、4 台の加速管のプロセッシング履歴を図 4 に示した。横軸は加速管由来の放電回数である。図よりわかることは、18 セル加速管より 24 セル加速管の方が同じ加速電界に到達する時間が早いこと、またダンピング構造を有する加速管はダンピング構造無しの加速管に比べて多くの放電を経て同じ加速電界に到達すること、である。

運転パラメータに到達するまでに要する放電は、おそらく安定な運転状態を実現するために必要な放電であろう。同様の製作方法をとった 4 台の加速管の比較から、設計に応じて必要なプロセッシング量の違いが大きいことが認識される。この放電数が多いと、場合によってはプロセッシング中の加速管劣化につながるの、我々は次には、この運転レベルまで到達するまでの放電回数を小さくする技術を開発する必要があると考えている。

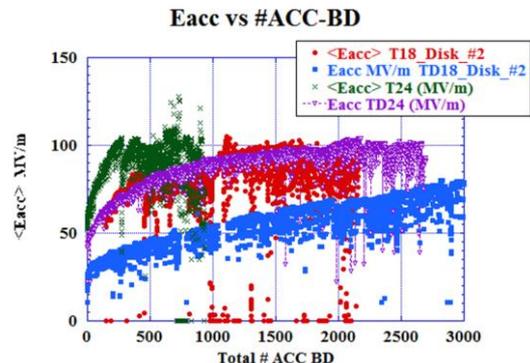


図 4：初期プロセッシングのスピード比較：縦軸＝到達加速電界、横軸＝積算放電回数

### 4.2 放電頻度

図 5 に TD24#4 の放電頻度計測結果を加速電界の関数として、プロセッシング開始からの時間で区別し

てまとめた。これからわかる点は、

- ・加速電界  $E_{acc}^{30-50}$  の鋭い依存性がある
- ・プロセッシングと共に、放電頻度は減少する
- ・ $E_{acc}$  に対する依存性はプロセッシングと共に勾配は急になる
- ・CLIC パルスでの放電頻度は増えることは無いが、むしろ減るようである

等である。

また、パルス幅依存性を調べるために、1150 時間時点の 252ns と 1400 時間時点の 412ns の放電頻度を計測した結果を図 6 に示した。通常放電頻度がプロセッシング時間と共に減少するので、412ns でのデータから、パルス幅が伸びると放電頻度は大きくなることがここでも現れていることがわかる。

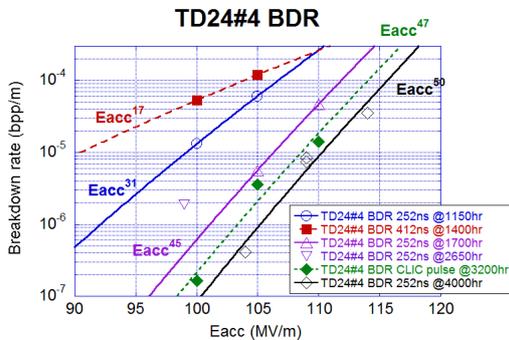


図 5：TD24 加速管の放電頻度と加速電界。図中にある時間は、プロセッシング開始から放電頻度計測までの運転時間を示す。

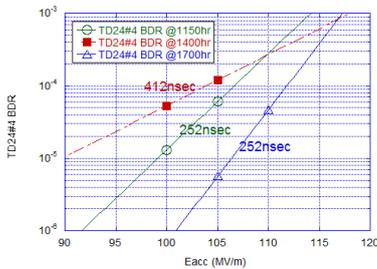


図 6：放電レートとパルス幅、加速電界との関係

### 4.3 放電場所

放電場所を入射、透過、反射の RF パルス波形計測より導出した。特別頻度の大きいセルは存在しないことがわかった。今回新たに、放電発生した後、次の放電場所の移動を調べてみたのが図 7 である。後続の放電セルは、同じ場所に発生するのが一番多いが、多少ずれる場合もあり、先の放電場所の上流に移る傾向が強いことがわかった。これは進行波管では放電セルから反射された RF は上流に逆流して上流側に大きな放電による損傷が生じるに関係していると考えられる。

### 4.4 放電頻度の統計性

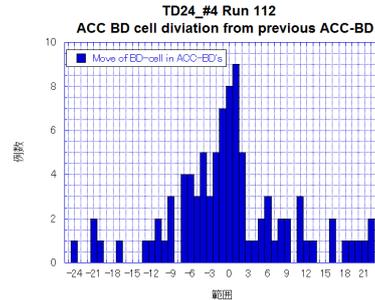


図 7：加速管放電後、次の放電の発生場所の動き

通常の放電レートの計測は、何時間にもわたって一定のパルスパラメータで計測する。放電頻度 (BDR) が

$$BDR = f(\text{Width}, E_{acc}) \cdot f(\text{long-term})$$

とかけるとすると、何百時間の運転を経由して BDR が減少してくるのは、上式の右辺第二項の寄与である。図 5 に示した  $E_{acc}$  のパワーでのフィッティングでは、測定期間中に上式の右辺第二項の変化は小さく、第一項の寄与が支配的だとしたときと考えられる。しかし、 $f(\text{Width}, E_{acc})$  は単純にそのパルスの Width と  $E_{acc}$  によるのであろうか？例えば直前のパルスの影響を受けないか？これを試験するためには、パルス毎に先のパルスとの関連を調べる必要がある。

さて、通常の BDR 計測では、(Width,  $E_{acc}$ ) を固定して数時間から数日かけて計測する。もしそのパラメータがパルス毎に変えることができれば、直前パルスのパラメータに対して BDR はどうなるか調べられる。しかし現在パルス毎に切り分けることができないので、とりあえず数秒おきに切り替えて計測することとし、3.2 節に述べたスイッチングモードでの計測を行った。加速電界で  $\sim 105\text{MV/m}$  近傍で、パルス幅 (210, 252, 293ns)  $\times$  パルス波高 (800, 810, 820mV) での運転例で 106 時間運転したが、この中で加速管由来の放電が 133 回発生し、これに続く第一パルス放電も 200 回程度発生した。この放電でのパルス幅とパルス波高の分布を図 8 に示した。

計測結果として図 8 の左図を見ると、パルス幅の 252ns と 293ns での放電数が同数であり、通常の計測から得られる幅依存性<sup>[5]</sup>を仮定した場合の  $\sim 2$  倍の差からしてと、この依存性が十分小さいように見えるが、イベント数は  $\sim 30$  しかなく、正確な判断には精度を上げた試験が必要である。一方パルス波高依存性は右図に示したように急峻であり、通常の依存性と定性的には矛盾しないと理解できる。パルス波高のみをスイッチングして計測した結果<sup>[5]</sup>からは、通常の BDR と矛盾しないという結果が得られ

ており、これらを総合すると、おそらく各々のパルスパラメータのみにより放電レートが決まっており、直前のパルス群の影響を受けて BDR が変化することはないと思われる。

今回のパルス波高は±1%程度の変化ではあり、変化させた波高の範囲が小さく、3段階での統計解析ができない。有意なデータを取り出すためには、パラメータの選択や波形制御精度を改良し、しかも長時間の運転が必要であることがわかった。また、1パルス毎にパラメータを変更できれば、著家全パルスに対する評価ができる。

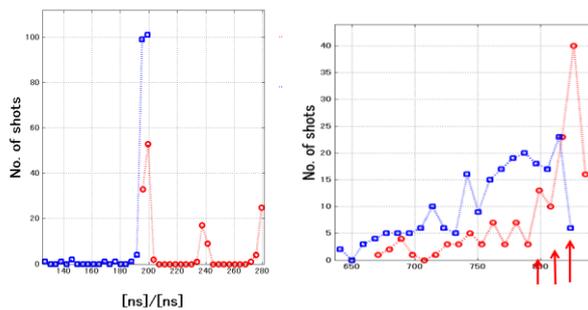


図8：スイッチングモードでの放電時パルス波形分布：左図＝パルス幅、右図＝パルス波高分布。赤＝通常の放電、青＝放電後の第一パルス放電。

#### 4.4 暗電流

暗電流はマイクロに見ると放電のトリガーに発展する可能性があるが、その効果はパルス内の電流上昇に見られるであろう。そこで、マイクロの電流計測はできないので、全暗電流をパルス幅を変化させて計測した。図9に下流へ放出される暗電流のパルス幅依存性を示した。このように、これまで他の加速管でもよく見られているような、線形性がみられた。多少のオフセットは、パルス幅の定義の問題であると考えている。全暗電流にはパルス内の増殖過程は見られないとの結論が得られた。

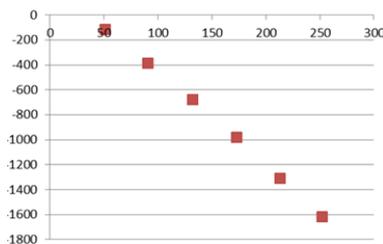


図9：下流への暗電流とパルス幅

## 5. 議論

CLIC プロトタイプのだンピング付き加速管、TD24の放電頻度は、100MV/mでのCLICの要求値

をクリアした。特に CLIC パルスでの放電頻度は、全パルス幅にわたってフラットな、これまで標準としてきているパルスに比較して低くなっていることも検証できた。この結果は、CLICのビームローディング有りの電磁界分布が今回と同じ加速管に関しては、運転時の放電頻度は十分低く抑えられると考えて良いことがわかった。但し、ビームの存在する場合のビームハローの衝突やウェーク場による放電トリガー等、別のメカニズムの効果を調べる必要があると考える。

長時間にわたる表面改質とその時点での放電頻度の関係や、パルス幅、パルス波高等に代表される、将来に放電発生したパルスや直前パルスの特性と放電頻度の関係、統計的性質、波形に関連した頻度関数への性質とを理解することは放電の起源をおさえ、頻度を低下させるための技術開発につながるはずで、今後基礎課程の性質を探る計画である。例えば、簡単な構造である単セル空洞での試験等を開始すべく準備している<sup>[8]</sup>。

## 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。W. Wuensch, A. Grudiev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] CLIC Conceptual Design Report, <http://clic-study.org/accelerator/CLIC-ConceptDesignRep.php>
- [2] T. Higo et al., "ADVANCEMENT OF HIGH GRADIENT STUDY AT 100MV/m RANGE," TUPS129, 第8回日本加速器学会, つくば, 2011.
- [3] C. Adolphsen et al., "Results from the CLIC X-Band Structure Test Program at NLCTA", PAC09, Vancouver, 2009 and SLAC-PUB-13697, 2009.
- [4] T. Higo, et al., "ADVANCES IN X-BAND TW ACCELERATOR STRUCTURES OPERATING IN THE 100 MV/m REGIME", THPEA013, IPAC10, Kyoto, May 2010.
- [5] S. Matsumoto et al., "HIGH GRADIENT TEST AT NEXTEF AND HIGH-POWER LONG-TERM OPERATION OF DEVICES", NIMA\_53664, 2011.
- [6] International Workshop on Breakdown Science and High Gradient Technology, Tsukuba, Japan, April 2011, <http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confid=165513>
- [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] T. Abe et al., "QUADRANT-TYPE X-BAND SINGLE-CELL STRUCTURE FOR HIGH GRADIENT TESTS," THPS095, 本学会発表