

100MV/m を目指す進行波型加速管の高電界特性

HIGH GRADIENT PERFORMANCE OF TRAVELLING-WAVE ACCELERATOR STRUCTURES TARGETING 100 MV/m

肥後寿泰 ^{#,A)}, 阿部哲郎 ^{A)}, 荒木田是夫 ^{A)}, 松本修二 ^{A)}, 高富俊和 ^{A)}

Toshiyasu Higo [#], Tetsuo Abe, Yoshio Arakida, Shuji Matsumoto, Toshikazu Takatomi

^{A)} KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 301-0801

Abstract

We have been studying the high-gradient performance of normal conducting X-band high gradient accelerator structures. In recent seven years, we have been focusing on the prototype structures for the CLIC (compact linear collider), targeting at a 100 MV/m acceleration. The CLIC allows for a structure to have 1 breakdown per 1 Giga pulses. An un-damped structure clearly met the requirement, though those with waveguide heavy damping are still at the edge. The difference may be due to the difference in the surface magnetic field. Since the last report in 2012, two structures, with one damped and the other un-damped, were tested. In this report, we discuss about the high gradient features of these two structures with illuminating a few new studies on their performance, such as the breakdown features after a big breakdown related to the recovery protocol. The study shows the statistical property of the breakdowns and indicates how to realize such a high field operation in a quick process in a robust manner.

1. はじめに

KEK や SLAC では 2006 年より CERN との共同研究に一環として、CLIC^[1]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^[2,3,4]。ここでは 3TeV までのエネルギーリーチを念頭に、100MV/m を標準加速電界と設定されている。50 km に及びリナックを形成した時の加速管に許される放電頻度、 3×10^{-7} /パルス/m を満たす必要があり、これが可能性を判断する目安になる。

前回の学会報告^[5]では、これまでのプロトタイプ加速管の性能を調べたダンピング無しの 24 セル加速管 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、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悪化する結果を示した。

本年の報告では、その後の 24 セル加速管試験（ダンピング有り加速管 2 台、及びダンピング無し加速管一台）の試験を行ったのでその結果を報告する。特に後者は、CERN/清華大学（中国）が共同で製作した加速管であり、製造方法はこれまで試験してきた加速管に採用してきた SLAC/KEK での標準的製造技術^[6]を基礎としているが、独自の製造であることに特長がある。今後製作技術の見極めに重要な過程となり、KEK でも今後独自に製作して重要な技術的ポイントを把握していく必要があると考えている。これらの加速管に対する Nextef での高電界試験の結果を、他の加速管群と比較して議論する。最近放電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が^[7]、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。

[#] toshiyasu.higo@kek.jp

2. 試験加速管パラメータ

最近のレギュラーセルの加速パラメータは Figure 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 が電力入力部近傍に加速に寄与しない TM モード伝搬部があることを除くと、CLIC 3 TeV 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。ダンピング構造は導波管結合を基本とするので、ダンピングポート間口で表面磁場の増大が避けられない。これまでの知見から表面磁場（又はその二乗に依存するパルス内温度上昇）に放電頻度が大きく影響を受けることが知られている。ビームローディング無しで比較すると、ダンピング無し（Figure 1 Up）で 8°C 程度に抑えられているのが、ダンピング構造を持つ（Figure 1 Middle）と、21°C まで上昇する。この値は 50°C 以下、できるだけ小さく抑えること、が重要であると認識しているが、ビームローディングが存在する時に、同じ加速電界（100MV/m）を確保するためには、（Figure 1 Bottom）にあるように温度上昇は 42°C まで上昇する。この場合は下流に行くに従ってローディングで電磁場は抑制され、パルス内温度上昇も抑えられるが、その分上流が厳しくなるので、実験的にその効果を評価することは重要である。しかし Nextef ではビーム源がなく、その直接的な検証はできない。意識的にこのビームローディングのある時のパラメータを再現できるビーム無しの構造を製作試験すればそれが可能になるので、実験の評価試験が確立した暁にはそれが可能になる。本報告段階では、ローディング無しでの比較になる。パルス温度上昇だけでなく、Sc パラメータで高電界性能が見極められることが議論されてきており^[8]、

Figure 1 にプロットしてある。この値もローディング有りだと上流から下流に向けて大きく変化するので、その効果を評価することは重要であるが、Nextef でのローディング無し試験ではそれが一定程度一定になるパラメータ分布を再現できており、その状態での高電界特性を試験することになっている。

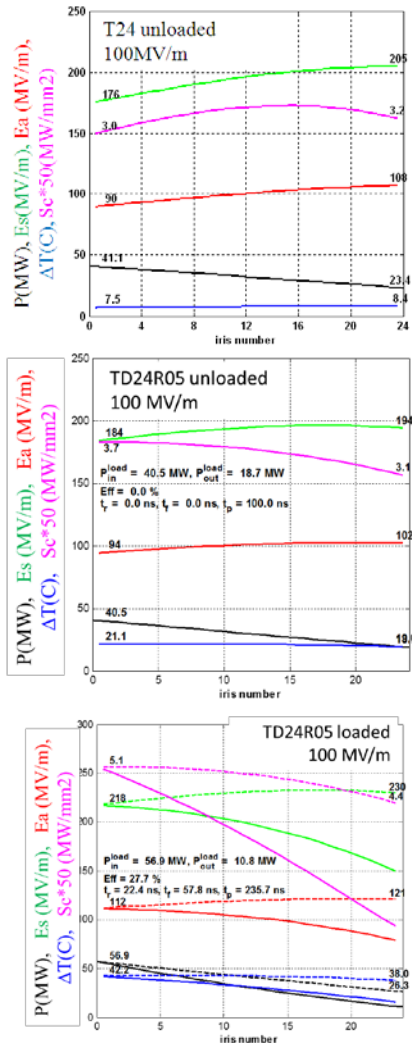


Figure 1: CLIC accelerator structure parameters.

3. 高電力試験の実際

3.1 標準試験フロー

試験加速管の標準製造工程としては、加速セルを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製作する。これらを化学エッチング (CP 処理) し、水素炉で組み立て、チューニングを経たあと最後に、650°C、1 週間以上のベーキングを施して完成となる。この工程をできるだけ共有し、共通の Protocol として複数の加速管を製造し、比較可能

な試験設備で高電界試験を行って、性能と設計や製造との関係についてのばらつきなどに関する情報も得たいと考えている。KEK では X バンド高電界試験設備、Nextef^[9]、にて試験を遂行した。

2009 年より実施してきたプロトタイプ加速管を Table 1 にリストアップした。

Table 1: Structures tested at Nextef

加速管名	構造	製作	試験
T18_#2	Un-damped	SLAC/KEK	2009
TD18_Quad	Damped	KEK	2009
TD18_#2	Damped	SLAC/KEK	2010
T24_#3	Un-damped	SLAC/KEK	2011
TD24_#4	Damped	SLAC/KEK	2012
TD24R05_#2	Damped	SLAC/KEK	2012
TD24R05_#4	Damped	SLAC/KEK	2014
T24_THU_#1	Un-damped	Tsinghua U.	2015

3.2 試験加速管の製作

前回報告^[2]までの試験加速管は、標準工程として、KEK でパーツを加工し、SLAC で水素炉組立、チューニング、の後に 650°C 真空ベーキングを経て完成し、窒素パージ又は真空保管で日本まで空輸した。それ以降の試験加速管製造では、それまでの標準製造工程で最後に TD24R05#3、#4 を製作し、その一台 (#4) を Nextef で試験した。

一報、最近の T24_THU_#1 では、これと異なる製造工程を採用した^[10]。まず超精密加工の経験豊富な VDL 社で製 BDR 作したパーツを、清華大学が組み立てた。組み立て前には、SLAC の CP 処理相当を施し、水素炉で拡散接合とロウ付けを経て、最後に 500°C 低度の真空ベーキングを実施した。これを Nextef で高電界試験し、現在完了したところである。これら最近の試験の中心として本稿で報告する。

3.3 プロセッシング要領

プロセッシングは、まず短パルスから行う。これは高周波パルスエネルギーが空洞に残すダメージを極力小さく抑えて徐々に表面を改質していくことを想定している。Nextef では 51ns で開始し、通常 91 → 132 → 173 → 213 → 252ns と進めている。各パルス幅で徐々にパワーを増大させていき、100MV/m 到達して次のパルス幅で繰り返すこととしている。51ns の初期の段階で真空ベースが多少悪化するが、その後は殆どベースのガス圧は上昇しないので、繰り返しはプロセッシングを通じて 50Hz 一定としている。空洞からの反射波はクリスタル検波器で常にモニターしており、この出力に数%以上増加が認められた時には放電の可能性があると判断し、次のパルスを止める。30 秒ほど待ち、ガス圧の回復を確認して多少低いパワーレベルから運転を再開する。殆どの場合、直前のパルスまで高周波波形に変化は認められず、放電のパルスで劇的に波形が変化するこ

とから、最後の放電パルスのみで大きな真空放電に発展していると認識している。

3.3 データ収集と解析

定常より大きな反射が観測された場合や、ビームラインの上流や下流に電流のフラッシュが観測された場合は放電と見なし、次のパルスを止めて波形を記録する。この際、RF 波形や電流波形は9パルスさかのぼって記録する。これらのパルスはオフライン解析を行ってプロセッシングの状況を把握する。

4. 実験結果と議論

4.1 プロセッシング

最近の TD24、及び T24 型加速管試験での全プロセッシング履歴を Figure 2 に示した。ここにこれまで試験してきた7加速管に共通する特徴を挙げることができよう。

1. 標準状態に到達するまでに Figure 3 に示した 1000 時間級の運転が必要であること、
2. そこに到達するまで放電の頻度は数千回を記録し、ほぼ同じレート、1 時間に 3 回、で繰り返してきていること、
3. その後の電界やパルス幅を一定にした標準状態運転では放電頻度は運転時間（印加パルス数）とともに減少し、1 時間に 1 回以下におさまってくること、

等である。運転時間 2000~2500 時間の期間を見ると、放電頻度の顕著な減少が明確に見えている。また、2500 時間~3000 時間での様子を見ると、パルス幅拡大時には放電頻度が上がるが、一定運転に入ると頻度は減少してくる。

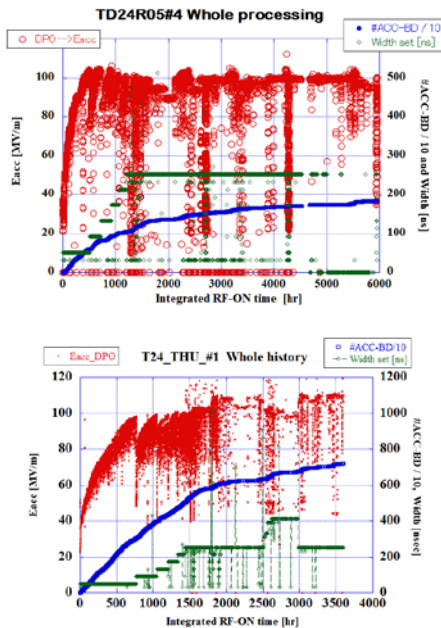


Figure 2: Whole history of structure processing. Up: TD24R05#4, Bottom: T24_THU#1

4.2 プロセッシング初期過程の比較

さて、これまで試験してきた7台の加速管のプロセッシング初期の履歴過程を Figure 3 に示そう。

ここでは、徐々に広げていくパルス幅の効果を取り入れ標準化した電界としてプロットしてある。具体的には、放電頻度がパルス幅の6乗に比例するとして、標準パルス幅 252ns とした時に同じ放電頻度となる加速電界を標準化された電界としてプロットした。同じ加速電界に到達する時間を比較すると、

- ・ 24セル加速管の方が18セル加速管より早い、
- ・ ダンピング構造無しの加速管はダンピング構造有りの加速管に比べて早い、

等がわかる。Figure 1 のパラメータ等から類推できるが、前者に関しては、18セルでの設計で、下流に行くに従って高くなる電磁界を24セル設計では平均化していることに関連しているかもしれない。一方後者は、表面磁場がダンピング有りだと無しに比べて大きくなることに関連していると考えている。

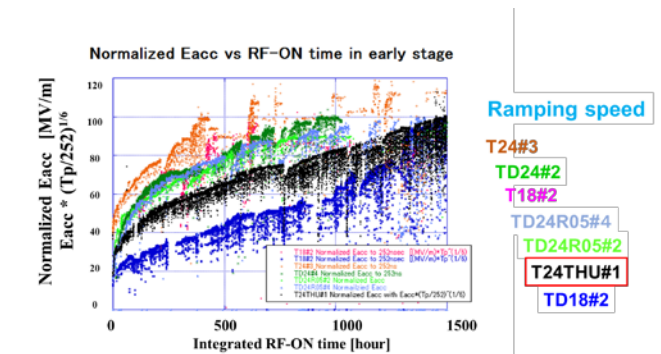


Figure 3: Early-stage processing of 7 structures.

4.3 標準化した加速電界の履歴

所要時間の違いは見かけ上実際のプロセッシング中の放電頻度の違いによるのではないかと考えられるので、放電頻度 (BDR) が

$$BDR \propto E_{acc}^{30} \times T_p^5$$

と仮定して、標準化した電界を

$$E_{acc}^* \propto [BDR / (2 \times 10^{-5})]^{-1/30} \times [T_p / 252]^{1/6}$$

としてプロットしてみたのが、Figure 4 である。これをみると、2500 時間あたりまで、順調にプロセッシングが進んできていることがわかる。パルス幅を広げた時の様子は先までの解析を待つて議論すべきであろう。

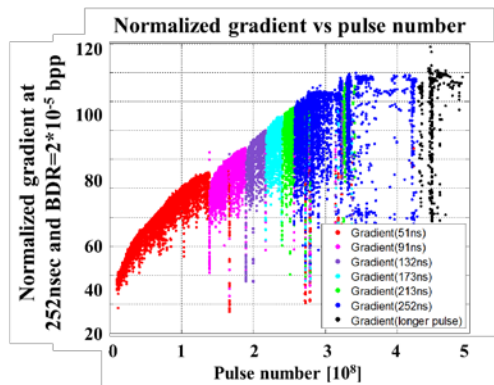


Figure 4: Processing of T24_THU_#1 Normalized accelerator field until 2800 hours.

4.4 放電頻度の時間経過

プロセッシングの中で、ある程度の時間一定条件下での運転された場合、その期間の放電頻度を評価することができる。放電発生時の時間経過の典型例を Figure 5 に示したが、一度放電が発生すると、連続して頻繁に放電を繰り返しながら次の安定な期間を迎えるといった特性が見られる。

放電頻度を放電回数/時間で定義するにしても、この時点での放電頻度の定義は曖昧にならざるをえない。次の3種類の放電頻度の評価が考えられる。

- ① 単純に総運転期間内
- ② 連続放電連発されている時間帯
- ③ 放電間隔が1時間以上の安定時間帯

どの評価を用いるべきかは、放電頻度の実用上の用い方による。

各一定パラメータ運転の時間帯での平均放電頻度を、①の場合を採用してしたのが Figure 6 である。これを見ると、運転時と共に放電頻度が減ってくるのが見てとれるが、②又は③の時間帯に特化すると、一桁オーダーの頻度評価値に差があり、注意を要するとともに、時間経過等、種々のパラメータに対する依存性を調べる場合に、どのモードにいた時の評価値であるかを踏まえた上で議論することが必要になる。因みに、運転時間 3600hr に対するデータポイントで安定時間帯の放電頻度をプロットすると、青四角となり、放電頻度の評価方による違いが見える。

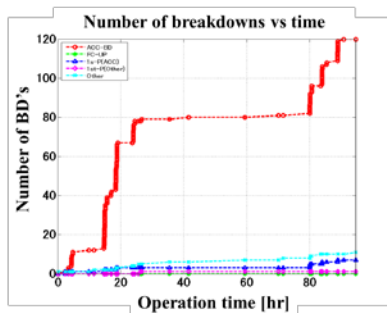


Figure 5: Breakdown appearance of T24_THU_# vs. time.

この状況は、長い時間にわたって、プロセッシング中の放電頻度を評価した Figure 7 にも現れている。この解析では、各放電に先立つ 10M パルス（約50時間）前からの経過時間内に生じた放電の平均発生頻度をプロットしたものである。放電頻度はアップダウンしながら、平均としては低下してくるところが見えている。

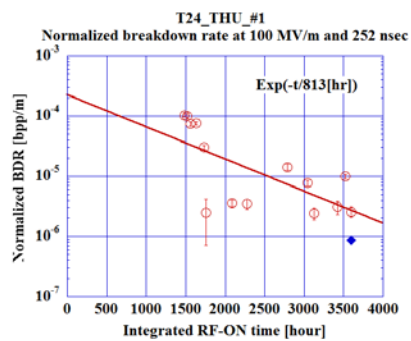


Figure 6: Evolution of breakdown rate of T24_THU_#1.

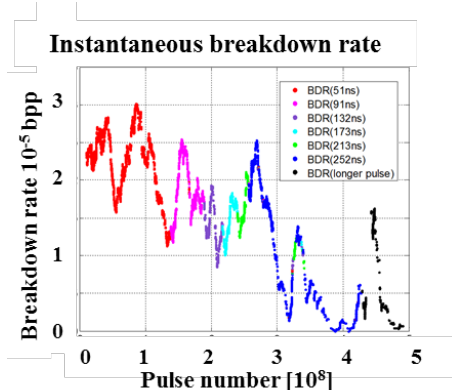


Figure 7: Average breakdown rate in 10M pulses.

4.5 放電頻度とリカバリー設定

最後に、放電後のリカバリー条件の違いにより、続くパルスでの放電の特長について述べる。通常、Nextef では放電の後に、パワーレベルを数%下げて次のパルスを打つが、その場合は多くの場合、最初のパルスから放電が発生してしまうことが多い。これに比べて 20%程度まで落とした場合を Figure 8 の Run70 に示した。この場合は放電後再開時に複数パルスを受け付けるが、完全にリカバリーするまでには、かなり低いパワーレベルでの多数回の放電を経ることがわかる。これは、リカバリープロセス中のパワー上昇の時間変化を示した Figure 9 で明瞭に違いがわかる。Up は通常運転時に採用している 5%減でのリカバリーで、最初のパルスから放電することも多く、図ではパワーレベルは0のままに見えている場所がある。Bottom のようにパワーを 20%まで下げた場合は適当なパワーレベルまで復帰

するが完全復帰までには放電でトリップすることを頻繁に繰り返している。

これらの違いが、加速管に与える影響はどうか、つまりそれがその後の放電特性にどのように関係するのか、またパルス幅を狭めてリカバリーする、等別のプロトコールをとった場合に、リカバリー特性やその後の放電特性がどのように影響されるかは、今後の研究課題である。特に、プロセッシングの早期の期間は、相当の時間が掛かるので、これを短縮できるのか、また短縮することにより最終的に行き着く放電特性が悪化しないか、最終的に要求される放電頻度まで到達できるか、等検討を要する。

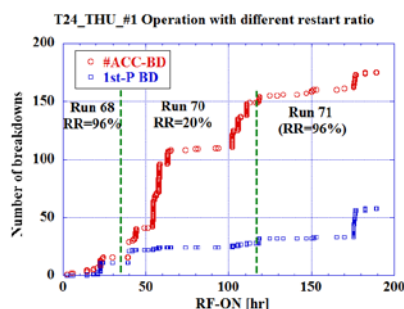


Figure 8: Appearance of breakdowns after big breakdowns in different recovery power levels.

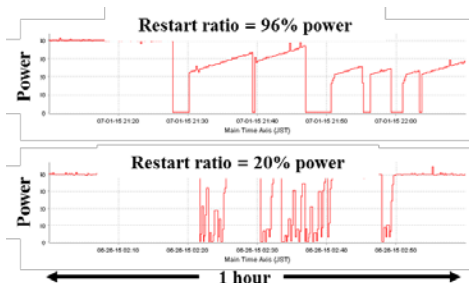


Figure 9: Recovery process in different recovery power levels.

5. まとめ

T24#3 加速管では 100MV/m 級での放電頻度の低い運転状態を実現できたが、今回清華大学で製作した加速管ではそこまで到達しなかった。原因は製造上の違いにあると考えているが、具体的にどのプロセスが必要なのかは特定できていない。水素炉での露点管理が不十分で高温炉処理で SUS フランジが緑色に変色したこと、また正規製造プロセスで 650°C部ベークキングに対して 500°Cとしたこと、等が考えられる。これら製造上の問題に関しては、今後特化した基礎研究が必要である。

そこで、Nextef では放電の基礎メカニズムの解明のため、定在波空洞で単一セルに電磁界を集中させる構造での試験を始める。これが実現すれば、安く

早い実験の計画を立てられ、特殊な観測系も可能とし易く、試験時間も短縮できるであろうと期待している^[11]。SLAC での先駆的な試験があるが、我々は 100MV/m 級の実現を念頭に置き、そのレベルまでの特性を慎重に調べることを考えている。

謝辞

一連の加速管高電界試験は、CERN との共同研究 (ICA-JP-0103, Appendix 2)のもとに進められています。S. Stapnes、W. Wuensch 両氏を始め 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 両氏をはじめ、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。また、長期間の試験を継続して進められるよう設備や人員のサポートを継続していただいている KEK 電子陽電子入射器の方々の日頃からの協力無くして実現不可能であります。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] CLIC Conceptual Design Report, <http://clic-study.org/accelerator/CLIC-ConceptDesignRep.php>
- [2] T. Higo et al., "CHARACTERISTICS OF VACUUM BREAKDOWNS UNDER HIGH GRADIENT PULSED OPERATION," THPS093, 第 9 回日本加速器学会, 大阪, 2012.
- [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] J. Wang and T. Higo, "Accelerator Structure Development for NLC/GLC," ICFA Beam Dynamics Newsletter 32, 27, 2003.
- [6] International Workshop on Breakdown Science and High Gradient Technology, HG2015, Tsinghua University, Beijing, China, June 2015, <https://indico.cern.ch/event/358352/overview>
- [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] A. Grudiev et al., "New local field quantity describing the high gradient limit of accelerating structures," PRST-AB 12, 102001, (2009)
- [9] S. Matsumoto et al., "HIGH GRADIENT TEST AT NEXTEF AND HIGH-POWER LONG-TERM OPERATION OF DEVICES", NIMA_53664, 2011.
- [10] J. Shi, "Recent X-band activities in Tsinghua University," presented at CLIC workshop, CLIC2015, CERN, 2015, <https://indico.cern.ch/event/336335/>
- [11] T. Abe et al., "BASIC STUDY ON HIGH-GRADIENT ACCELERATING STRUCTURES AT KEK / NEXTEF," WEP-060、本学会発表, 敦賀, 2015