

CLIC プロトタイプ加速管の高電界特性

HIGH-GRADIENT PERFORMANCE OF CLIC PROTOTYPE ACCELERATING STRUCTURES

肥後寿泰^{#, A)}, 阿部哲郎^{A)}, 松本修二^{A)}, 高富俊和^{A)}, 東保男^{A)}, 吴晓伟^{B)}

Toshiyasu Higo^{#, A)}, Tetsuo Abe^{A)}, Shuji Matsumoto^{A)}, Toshikazu Takatomi^{A)}, Yasuo Higashi^{A)}, Xiaowei Wu^{B)}

^{A)} KEK

^{B)} Tsinghua University, China

Abstract

From 2009 until now, ten CLIC prototype X-band accelerating structures have been tested at Nextef of KEK aiming at studying the feasibility of the operation at 100 MV/m in the TW one-foot-long structures. Each test has been conducted for typically more than a few thousand hours at 50 Hz, an order of 1 Giga pulses. In summarizing these tests, we observed the statistical nature of the vacuum breakdowns on top of the structure individuality and different conditioning reality. We observed and studied such physical properties as the dark current, breakdown rate, RF pulse shapes, and so on. By taking the advantage of the tests conducted in the same system for all of the structures, we compared among the tested structures to deduce the intrinsic features. In the present paper, we present the observed features, such as the reduction of breakdown rate, the relation of the dark current amount to the high-gradient performance and the statistical nature of the breakdown appearance, etc. to review the high-gradient characteristics in the TW high-gradient accelerating structures operated about 3 times higher than the gradient of today's usual linear accelerators.

1. はじめに

100MV/m 級を目標とするリニアコライダーの加速構造の開発研究は、1990 年代より既に 30 年近く継続されてきている[1]。2000 年初頭までは、1m 級の加速管で 50MV/m の加速電界を目指し、1TeV を目指すリニアコライダー-GLC としてはほぼその目標に到達した[2]が、加速管の製作は、円盤状に精密加工した数 10 を越えるディスクを精密にスタックして、これを 900~1000℃ の高温拡散接合とそれに続くロウ付け組立により実現した[3]。この開発は常温リニアコライダーとして推進してきた技術であるが、2004 年の ITRP 勧告[4]により、リニアコライダーとしては超電導技術を採用することになった時点で終演となった。常温高電界加速器の技術は、加速器の小型化などに重要な技術であり、基礎技術の把握と改善という目標を持って研究を継続した。その後 2006 年末に、常温リニアコライダーを開発してきていた CLIC が、主加速器の周波数を再度最適化し、12GHz を採用することになったため[5]、殆ど同じ技術を適用できると判断し、今では 10 年以上にわたり研究開発に参加した。マルチ TeV を目指す CLIC[6]では、到達エネルギーが高い分加速電界を上げる必要があった。そのため、ビーム口径を小さくし、30 セル程度のディスクで構成する 30 cm 程度の加速管を用いて、加速電界としては 100MV/m を目標に開発を進めてきた。製造方法としては GLC の技術を基本とし、CLIC の電気性能を満たすべく開発してきたが、その判断指標の一つに放電頻度がある。放電頻度とは、ビーム特性を乱し、次のパルスまでに回復を要する程の加速管内で生じる大きな放電現象が生じる頻度の平均値であるが、CLIC では 3×10^{-7} (bpp/m) が限度である。この放電現象は統計的な現象であることが、放電から次の放電発生までの時間が Poisson 分布型を示していることから理解できる[7]。その発生起源に関しては、種々のメ

カニズムが提案されており[8, 9, 10]、徐々に実験との比較も行われつつ、次第に理解が深まってきている。

放電頻度に材料の極表面の特性だけでなく、材料自身の金属物性や結晶状態などが深く関係していることが示唆されており、主製造技術として採用してきた方法が妥当であるかの検証を行うことが重要である。昨年度にその製造工程の一つにある、真空ベーキングによる脱水素の寄与を研究し報告した[11]が、本稿では脱水素を実施した加速管の継続試験結果を含めて議論する。

昨年度までの加速管での高周波電磁場の伝搬は、導波管結合のカプラーから円筒導波管内の TM01 モードで伝搬させ、更にマッチングセルを通してその先の高電界加速セル部分につなげている。この方式ではカプラー近傍の単純な回転対称電磁場のみで構成される高電界加速部分の純水な試験評価ができるが、円筒導波管部分は加速には殆ど寄与しないので、加速効率を落とすことになる。これまでの多数のプロトタイプ加速管試験を通じて、高電界加速部分では 80MV/m レベルは確実に安定に実現できることが分かっており、100MV/m 級の安定加速も十分視野に入ってきている[1]ので、スペースファクターを下げていく円筒導波管部分を無くした設計の TD26CC 型加速管を試験し、CLIC プロジェクトへの最終段階の検証を行うことにした。本稿ではこの加速管の高電界試験結果も示す。更に本稿では、これまでの Nextef での試験全体を総合して、1990 年代から継続してきた 100MV/m を目指す TW 加速管に関する、これまで基盤としてきた常伝導リニアコライダー用加速管製法で実現する加速管に対する高電界特性の総合評価を試みることにした。

2. 試験加速管

2.1 電気設計

高電界試験は、KEK CLIC の主線形加速器に用いるため、HOM の強減衰を基本とした加速構造である。Fig. 1 に加速セルの 8 分割を示し、その空洞内表面上の電磁界を示してある[12]。高い磁場が発生する面は空洞の内径を形成する部分であり、そこから外に通ずる経路は導波管型ダンピング構造と呼んでいる HOM 減衰チャンネルである。ビームホール部は当然電界が一番高いが、また電子の電界放出時の高周波エネルギーのつぎ込まれる量に関する複素ポインティングベクトルと呼ぶ S_c パラメータ[13]も大きいことが分かる。

本来はビーム負荷あり状態で 100MV/m 運転を目標とすべきであるが、高電界発生の可能性を研究する本稿への開発研究では、まずビーム無しで評価を行ってきている。各種パラメータ分布を Fig. 2 に示した[12]。

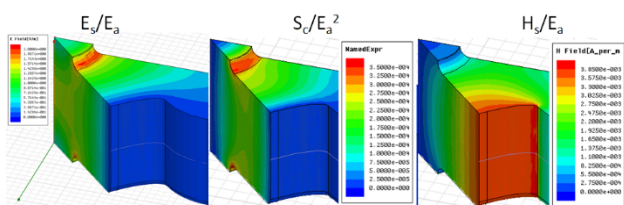


Figure 1: Typical surface field of wave-guide damped cell, left = E_s , center = S_c and right = H_s .

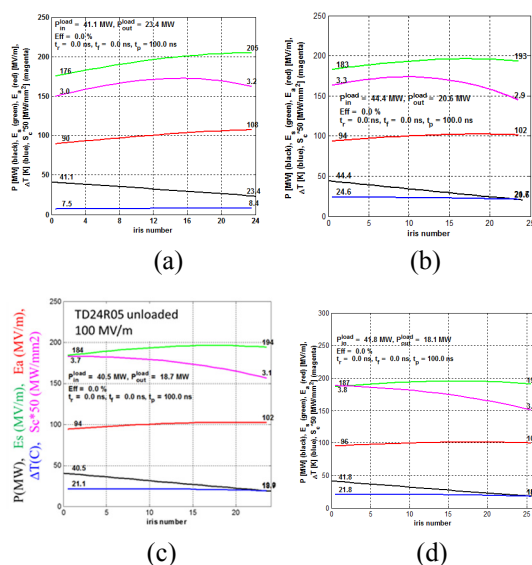


Figure 2: Structure unloaded electrical parameters, (a) T24, (b) TD24, (c) TD24R05 and (d) TD26CC. Colored lines are red = accelerating field, black = power flow, blue = surface temperature rise, pink = S_c and green = surface electric field.

2.2 機械設計と製作

加速管の機械設計は KEK にて行った。製作方法は全ての加速管に共通して、常伝導リアコライダーで築

いてきた正規の方法を採用した。メーカーで精密ミリングと超精密旋盤加工で仕上げたスライス状のディスクを積み上げて 1040°C の拡散接合をし、別途ロウ付けで組んだカプラー部を加えて全体をスタックし、ロウ付けで仕上げる[3]。セルのエッチング洗浄と組立・チューニングに関しては、最初は SLAC で実施してきたが、最近の 3 台の加速管は全ての製作工程を KEK で進めている。Fig. 3 にパーツの写真を示した。

最近の TD24R05 型の 2 台の加速管、K1, K2 の違いは、前者は水素炉で組立てたまま、後者は 750°C 一日の真空ベーキングを行って試験に入ったことにある[11]。また、TD26CC 型加速管は、現状では最後に試験した加速管である。この加速管も水素炉で組立てたあと、真空ベーキングは行わなかった。

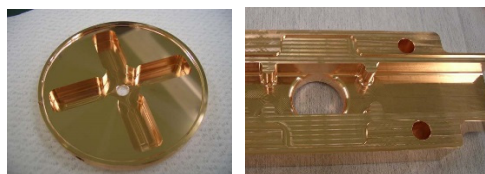


Figure 3: Typical damped cell (left) and coupler body (right).

3. 高電界試験

本稿では、最近の KEK で製作した 3 台の加速管、TD24R05 型の 2 台 (K1, K2) と TD26CC 型 1 台について試験結果詳細を述べる。

3.1 試験セットアップ

高電界試験は、KEK の Nextef 試験設備[14, 15]にて進めた。加速管のドレスアップはクラス 10000 のクリーンルームで行い、試験エリア (Nextef) での設置時は、Fig. 4 に示した様に、フィルターを通して窒素ガスを常にフローさせている。

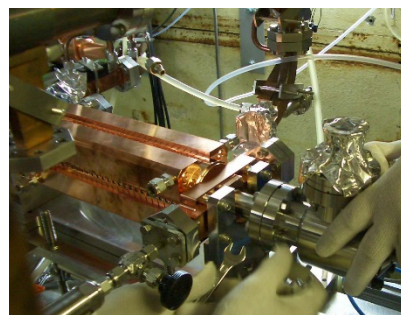


Figure 4: Typical installation at Nextef. Filtered N_2 gas is continuously flowed in during connection.

3.2 プロセッシング

標準的な運転パラメータは、パルス幅 252ns、繰り返し周波数は 50Hz で、正規の加速電界は 100MV/m である。CLIC パルス波形は、2 段階の立ち上げ、フラットトップで形成されるが、本稿での試験には、標準パラメータとしてその全パルス長をフラットパルスで駆動して評価す

る。

加速管の充填時間は加速管毎に異なるが、ほぼ 150ns 近辺であり、プロセッシングでは、まずそれより充分短いパルス幅(実際には 50ns)で高電力パワーを印加開始し、指標となる 100MV/m まで徐々にパワーレベルを上昇させる。この時、特に初期にはアウトガスが顕著にでる時間帯があるが、この時は充分時間をとってガス放出がおさまるのを待ってからパワー上昇させる。そのパルス幅で目標の電界に到達した後に、運転パラメータを変えずに 1 日程度の長期運転を行った後に、パルス幅を延ばして、最小のパワーレベルより再開する。

プロセッシングの途中では、RF 波形が大きく乱れたり、Faraday Cup への電流バーストがあり、これらを放電発生と見なして運転をとめ、30 秒ほどかけて波形のセーブや真空レベルの回復を確認した後に、数%程度パワーを下げたからパワーの投入を再開する。

3.3 TD24R05-K1 & K2 結果

Fig. 5 に、運転時間の関数として高電界に関連する各パラメータをプロットした。緑点はパルス幅/10 であり、青点は 252ns にスケールされた正規化加速電界である。これは、加速電界 E_{acc} とパルス幅 T_p から、

$$E_{acc}^{Norm} = E_{acc} (T_p/252)^{1/6}$$

で計算した[13, 15]。これは放電頻度が E_{acc} の 30 乗、 T_p の 5 乗に比例すると仮定により、同じパルス幅に換算し、同じ放電頻度に対応する加速電界として用いた。また、空色は放電の精算回数、ピンク色は放電後の立ち上げ仮定での最初のパルスで放電した場合の積算放電回数である。

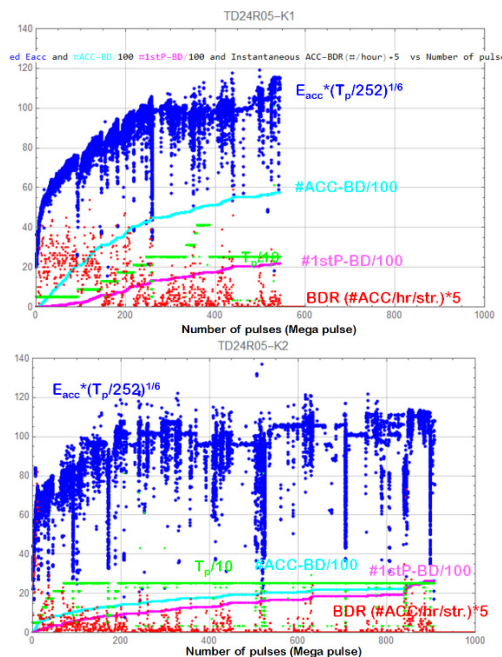


Figure 5: Operation history of two TD24R05 structures, top = K1 and bottom = K2.

K1, K2 の比較をすると、正規化加速電界 E_{acc}^{norm} は、K1 では 250 時間ほどかけてスムーズに上昇したのに対して、K2 では初期の 100 時間強の内に上昇し、しかもス

ムーズな上昇にはなっていないことが分かる。この違いを詳細に比較してみると、下記の様な違いが見いだせる。

1. 50ns での運転で目標加速電界に到達するまでの時間が K2 の方が K1 より数倍速く、各パルス幅での最大加速電界も 110MV/m 以上まで到達させていること、

2. K2 では、パルス幅 100ns 以降では到達加速電界が 90MV/m 程度しか確保せずに次のパルス幅に移行していったこと、

3. 結果として目標とするパルス幅、加速電界に到達する時間は K1 で 250 時間かかったのに対して、K2 では 120 時間程度で済んでいて、2 倍の差があること、

4. K1 運転時の放電総数が K2 と比較して 3 倍もあること、

5. 放電頻度の変遷をみると、K1 では当初 1 時間当たり 10 回以下で徐々にスムーズ減ってきているのに対して、K2 では最初の 20 時間程度の間 1 時間当たり 20 回に迫る高放電頻度を経験し、その後は 1 時間当たり 3~4 回の放電におさまってプロセッシングが進められたこと等が見られる。

一方 Fig. 6 には、TD26CC-K1 における同様のプロットを示したが、この運転には前出 K2 の例の様なスムーズにならないプロセッシングをさせ、なるべく一定のスピードで目標パワーを上昇させることを試みた。そのために、半自動でパワーを上昇させるプログラムを開発した。ここでは過去 1 時間程度の放電回数を常にモニターし、それが一定になるようにパワー上昇頻度を抑えることにした。TD26CC-K1 ではこれを、1 時間当たり 4 回以上の放電頻度の時にパワー上昇をストップさせることにより実現した。実際には 1 時間当たり 3~4 回におさまり、正規パラメータまで到達する間にもその減少が顕著であることが分かった。

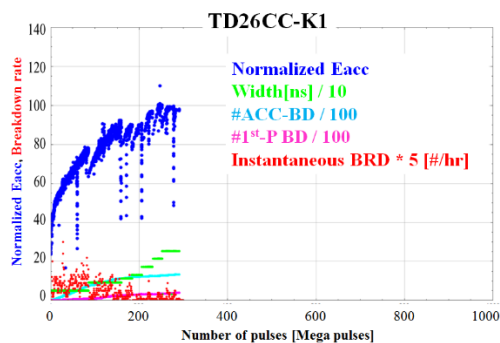


Figure 6: Whole operation history of TD26CC-K1.

3.4 放電セルの場所

放電が発生したセルではセル内に多くの電子やイオンの発生があり、電気的に見てショートの状態に近いため、RF 進行波はそこで反射される。結果として RF の反射と透過の波形に変化が生じ、RF 波の加速管中の群速度を考慮するとそのセルの場所を同定できる。Fig. 7 に TD26CC-K1 の全運転時間積算の放電セル分布を示した。これから、特に局所的に放電し易いセルが生じてはならず、ほぼ一様に加速管全体で放電が発生していることが分かった。この状態は TD24R05 型の 2 台の加速管でも同様であった。但し、TD26CC では、Fig. 7 に示した

青枠がセルの存在する位置であり、BD セルの導出における精密化とチューニングが必要だと考えられる。

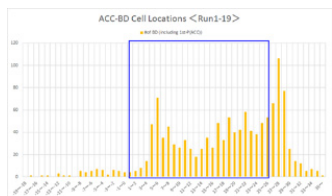


Figure 7: BD cell distribution.

3.5 放電頻度

Fig. 8 に、一定パラメータ運転で評価する放電頻度を、初期からの運転積算時間を横軸に、3 台の加速管に対してプロットした結果を示した。

フル 1 桁の放電頻度値誤差を許容すると、3 台の加速管全部に対して初期の 2500 時間程度までは顕著な差は見られず、指数関数的に減少してきていることが分かる。また、特に多くの測定点をもつ TD24R05-K2 を見ると、その後の放電頻度測定の際に大きな変動があることがわかる。3000 時間を越えてプロセッシングがかなり進んできた段階でもその変動は大きく、そもそも放電回数が少なく統計誤差が大きくなってきていることも関係しているが、それ以上の変動が見えている。

BDR of TD24R05-K1 & K2 and TD26CC

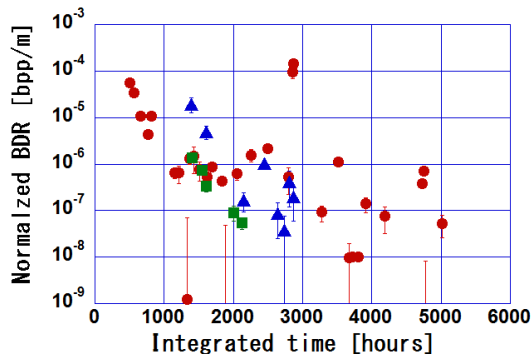


Figure 8: Evolution of breakdown rate of TD24R05-K1 (blue) and K2 (red) and TD26CC-K1 (yellow).

3.6 放電発生の詳細時間発展

Fig. 9 に TD26CC-K1 の終盤の 5 日程度の標準パラメータ近傍での運転での放電発生状況をプロットした。横軸は運転時間、縦軸は放電回数であるが、赤 (ACC-BD と呼ぶ) は正常運転パルスが 2 パルス以上続いた後に放電が発生した時、青 (1stP-BD と呼ぶ) は第一パルスから放電してしまった場合である。この図より分かることは、この段階で放電の発生は時間的に均一ではなく、おそらく一回の大きな放電の後に、この放電により受けた変化をクリアしていくべき運転パルスや連続放電が続いていると思われる。このリカバリと思われる期間をすぎると、全く安定な運転状態が現れるようだ。

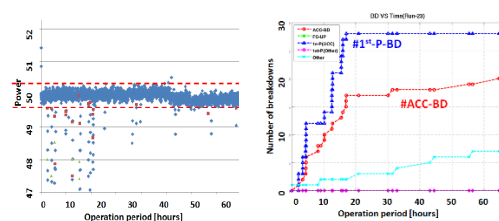


Figure 9: Breakdown appearance in time in TD26CC at nominal operation parameters. Left: power vs time and right: number of breakdowns vs time.

4. 議論

4.1 放電頻度の比較

Fig. 10 に、これまで Nextef でテストした CLIC プロトタイプ加速管の放電レートを運転時間の関数として示した。TD24R05-#2 以外の加速管では数千時間の運転によって徐々に放電頻度が指数関数的に下がってきていることが分かる。1/e に減少する特性時間は 100~1000 時間、50Hz 運転なので 20M~200M パルス、の広範囲にわたることがわかった。TD24R05-#2 では、放電の頻発するいわゆるホットセルが生じて放電レートが高いままであった。また放電頻度は、どの加速管でも 1 桁程度変動しており、これは 3.4 節で述べたように放電の発生する時間間隔が早まっている時間帯と安定に運転できる時間帯が混在していることに対応していると思われる。

CLIC の許容放電頻度は 3×10^{-7} [bpp/m] であり、殆どの加速管で数千時間を経れば到達することが分かった。但し、プロセッシングの初期のランピングのやり方に応じて、正規パラメータに到達するまでの放電回数が大きく変わることが見受けられ、放電レート以外の高電界特性に関して、初期の放電による加速管の劣化有無が問題になるかもしれない。また、なぜ数千時間、又は 1Giga パルスにも及ぶパルス運転経てようやく正規パラメータでの許容放電頻度に到達するのか、に関する理解を得ることが重要であると思われる。

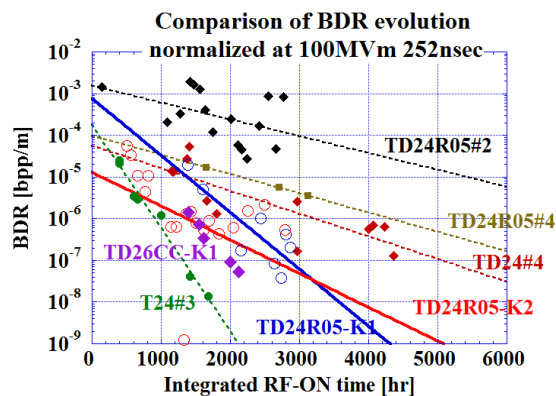


Figure 10: Evolution of normalized BDR in CLIC prototype structures tested at Nextef.

4.2 今後の課題

常伝導リニアコライダーの加速管として、高電界を得られるか試験を続けてきて、CLIC に用いる加速管としては、ビームローディング無しの状態では 100MV/m 級の加速が可能な事は実証されてきた。今後は、この一連の試験から得られた特徴を基盤に、基礎試験を通して、真空放電のメカニズムを理解し高電界特性の改善を検討することが、常伝導高電界によるコンパクトな高エネルギーリニアコライダーの実現[16, 17]や、その技術を元にする小型の加速器への応用展開[18]への道を開くことになる。そのためには、下に述べる課題を理解し改善していくことが望まれる。

- プロセッシング初期のランピングの仕方により、如何に以後の高電界特性や放電特性が変わるかを調べること。
- T24-#3 で得られた非常に早い放電頻度の減少特性の再現できるか、追試験するべきである。
- 早く正規パラメータに到達する方法を調べること。
- 電界放出暗電流の比較と放電レートなどとの関連があるかを調べること。
- 水素炉で製作した加速管に対する真空ベーキングの効果を検証すること。
- ディスクをスタックして組み立てる方式で、ギャップがある時の微少放電の問題がロウ付けで埋めることにより改善できるか、また加速管を縦方向に割った構造で電流を切らない構造にした時の特性改善が得られるか、を調べること。

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、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や三菱電機システムサービス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] T. Higo *et al.*, “High gradient performance of travelling-wave accelerator structures targeting 100 MV/m”, WEP-047, 第 12 回加速器学会, 敦賀, 2015.
- [2] C. Adolphsen, “Advances in Normal Conducting Accelerator Technology from the X-Band Linear Collider Program”, TOPE002, Proc. of PAC 05, Vancouver, Canada, 2005.
- [3] J. Wang and T. Higo, “Accelerator Structure Development for NLC/GLC”, ICFA Beam Dynamics Newsletter 32, 27, 2003.
- [4] International Technology Recommendation Panel, 2004; http://icfa.fnal.gov/wp-content/uploads/ITRP_Report_Final.pdf
- [5] J.-P. Delahaye, “Towards CLIC Feasibility”, Proceedings, IPAC10, FRXCMH01, Kyoto, Japan.
- [6] CLIC Conceptual Design Report, 2012; http://project-clic-cdr.web.cern.ch/project-CLIC-CDR/CDR_Volume1.pdf
- [7] W. Wuensch *et al.*, “Statistics of Vacuum Breakdown in the High-Gradient and Low-Rate Regime”, PRST-AB, 20, 011007, 2017.

- [8] K. Nordlund and F. Djurabekova, “Defect model for the dependence of breakdown rate on external electric fields”, PRST-AB, 15, 071002, 2012.
- [9] Z. Insepov and J. Norem, “Can surface cracks and unipolar arcs explain breakdown and gradient limits?”, Journal of Vacuum Science & Technology, A31, 011302, 2013.
- [10] V. Dolgashev, “Progress on high-gradient structures”, AIP Conference Proceedings 1507, 76 (2012); doi: 10.1063/1.4773679.
- [11] T. Higo *et al.*, “Effect of vacuum baking on high-gradient characteristics of accelerator structure made of oxygen-free copper”, TUP-050, 第 14 回加速器学会, 北海道, 2017.
- [12] A. Grudiev, archived in CERN EDMS.
- [13] A. Grudiev, *et al.*, “New local field quantity describing the high gradient limit of accelerating structures”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 102001 (2009).
- [14] S. Matsumoto *et al.*, “High gradient test at Nextef and high-power long-term operation of devices”, NIMA_53664, 2011.
- [15] X. Wu *et al.*, “High-gradient breakdown studies of an X-band Compact Linear Collider prototype structure”, PRST-AB, 20, 052001 (2017).
- [16] R. Belusevic and T. Higo, “A CLIC Prototype Higgs Factory”, KEK Pre-Print 2012-21.
- [17] “Updated Baseline for a Staged CLIC”, CERN-2016-004, August, 2016.
- [18] CLIC Workshop 2017, <https://indico.cern.ch/event/577810/>