

無酸素銅加速管の高電界特性に対する真空ベーキング処理の影響

EFFECT OF VACUUM BAKING ON HIGH-GRADIENT CHARACTERISTICS OF ACCELERATOR STRUCTURE MADE OF OXYGEN-FREE COPPER

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

Toshiyasu Higo^{#, A, B)}, Tetsuo Abe^{A, B)}, Shuji Matsumoto^{A, B)}, Yoshio Arakida^{A, B)}, Toshikazu Takatomi^{A)}

^{A)} KEK, High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} Sokendai, The Graduate University for Advanced Studies

Abstract

The accelerating gradient of 50 MV/m level in the normal conducting accelerating structures for linear collider main linac has been established by the beginning of 2000's. The basic technology for making those accelerator structures comprises of fine machining of cells, chemical etching, diffusion bonding, brazing to make full body, followed by vacuum baking at 650 degrees Celsius. Since 2006, the nominal target gradient was doubled to 100MV/m aiming at the application to CLIC, but the nominal manufacturing technology has been kept the same. However, the vacuum baking process has been omitted in many times by various reasons, but we have not observed any clear evidence of the poor performance due to the skipping of the vacuum baking process. To identify the actual meaning of vacuum baking, we made the two accelerator structures with the same design and the same technology, but one with baking and the other without, to compare the effect of the baking. The high gradient experiment was pursued at the same set up in Nextef of KEK. The processing of that with baking happened to proceed fast in pulse width but slow in peak power. The breakdown rate of that with baking showed the saturation feature in the BDR evolution. We suspect that this saturation of BDR evolution might be due to the too fast ramping at the initial processing stage. We conclude that the same processing protocol should be carefully realized to make such sophisticated comparison.

1. はじめに

100MV/m 級を目標とするリニアコライダ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-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°C 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。本稿では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することとした。真空ベーキングは 650°C で 1 週間程度行う[3]が、この工程には二つの効果、多くの場合水素炉で製作された加速管の母材に含まれる水素を抜く寄与、及び表面からの脱ガス効果がある。本稿の目標は前者の寄与を調べることである。この試験の重要性は、リニアコライダの様に多数の加速管を製造する必要がある場合に、1 週間もかかる処理は製造コストの大幅アップにつながるため、不要ならばスキップすべき工程であることが背景にある。

この工程が必須では無いことは、ある程度の高電界特性を目指した運転の場合には経験上分かっている。例えば、KEK の ATF で使用している RF ガン空洞[11]は水素ロウ付け炉で組み立てられているが、ベーキングは行わずに運転に入り、100MV/m 以上のカソード電界での運転が行われており、放電頻度値は計測が無いが、加速器運転上問題になるような放電頻度には至っていない。また、[10]に含まれる単セル空洞のいくつかは水素炉での組立られているがベーキングを行わずに高電

[#] toshiyasu.higo@kek.jp

界試験を行っているが、顕著な特性の違いの認識には至っていないことなどがある。ここに上げた例は定在波(SW)空洞であるが、CLICのように常伝導リニアコライダーでは進行波(TW)モードを用いており、その場合にもベーキング効果が重要であるか否かを理解することは重要であると考ええる。

本稿では水素炉ベースでCLICの標準プロトタイプ加速管を組立て、高温真空処理有無の一对の加速管として製作し、高電界試験を行った結果を報告する。この比較から、顕著な差が認められないことが見えてきているが、それ以上にプロセッシングの初期の立上方に依存したのではないかと判断すべき様相も見えており、今後の研究への糸口にもなっている。論文では比較実験の詳細と高電界特性の差に関する議論を行う。

2. 真空ベーキングと脱水素工程

2.1 製造工程

試験加速管は、CLICプロトタイプTD24R05型で、製作は下記のフローに添って行った。無酸素銅の精密ダイヤモンド加工によりディスクを製作する。組立直前にセルの化学洗浄を施し、インロウ構造でアライメントを取りながらスタックし、1040°Cの拡散接合を行う。一方カプラー部は、二枚板をリングで製作し、重ねて導波管構造を形成し金ロウ付けで組み立てる。セル部とカプラー部は最後に水素炉中でロウ付けする。その後、クリーンルーム空中にて、ビードプルによりRF特性を計測しながら、各セルに備えた押し引きできる構造でセルの周波数チューニングを行う。その後、一方は高電界試験へ、一方は真空ベーキングを施した後に高電界試験に進めた。製造工程の具体的履歴をTable 1に示した。

Table 1: Production History of Two Test Structures

| TD24R05 | K1 | K2 |
|---------|----------------|----------------|
| メーカー | K-PRO | MORIKAWA |
| セル製造 | 2011年5月 | 2013年3月 |
| 保管 | デシケータ | デシケータ |
| スタック計測 | 2011年12月 | 2015年11月 |
| 化学洗浄 | 2014年5月 | 2015年12月 |
| 組立 | 2014年6月 | 2016年1月 |
| チューニング | 2015年9月 | 2016年2月 |
| 真空バーク | 無 | 2016年2月 |
| 保管 | N ₂ | N ₂ |
| 設置 | 2015年9月 | 2016年9月 |
| 高電力 | 2015年10月~ | 2016年9月~ |

2.2 真空ベーキング

大気圧で運転する水素炉中では、無酸素銅内の水素含有量は、充分時間が経過した後であれば、1気圧の水素分圧と温度で決まる銅固体中の水素分圧の平衡状態

として決まる。水素の拡散距離をFigure 1に示したが、1040°Cで1時間の処理時間を経過する時20ミクロン程度であり、0.5ミクロン程度の表皮深さより充分深くまで浸透することが分かる。また、各種の放電に至る可能性をもったメカニズムがサブミクロン級であると考え、それよりも充分深くまで浸透することが分かる。

これを銅表面のミクロン級深さからはき出すためには、真空中で加熱することにより実現される。拡散距離は時間の平方根で増えるので、650°Cで1週間かけると2mm程度の距離を稼ぐことになり、充分すぎるほどに深くからの水素を抜くことになる。しかし加速器関係の処理をクリーンな環境で進めている炉で650°Cの二重排気炉を準備することができなかつたため、できるだけ拡散距離を大きくできる運転を確保すべく検討を進めた結果、750°Cで1日のパラメータを採用することにした。750°Cの選択は通常の運転温度より低い、敢えてこの多少低い温度を選んだ理由は、Figure 1にある真空中の熱処理に伴う昇華である。例えば850°Cを選ぶと数時間でも1ミクロンもの昇華が起こり、セルの周波数にも10⁻⁴オーダーの変化をきたす可能性があり、チューニングを崩す可能性が大であるためである。昇華量は時間に比例、拡散距離は時間の平方根に比例するため、高い温度ではあまり長い時間をとることができない。これらを考慮してパラメータを決めたが、このパラメータで拡散距離25ミクロン、昇華20nm程度とすることができる。

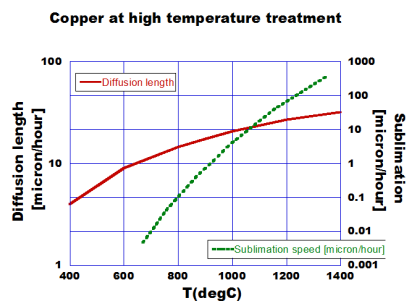


Figure 1: Hydrogen diffusion length in copper for 1 hour and copper sublimation depth in 1 hour.

2.3 真空ベーキングの実際

真空ベーキングは、Figure 2に示した様に、1日かけて実施した。750°Cに到達した時点ではすでに表面からの脱ガスはほぼ終わっており、その後は銅材料内部での過程が支配的になっている。

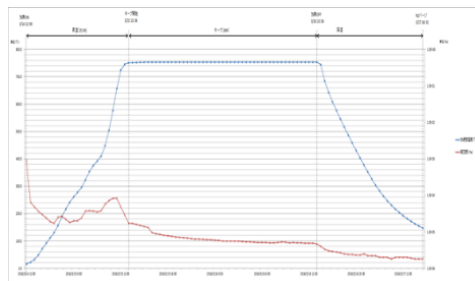


Figure 2: Temperature and vacuum level in baking.

内部への粒子状のゴミの流入を極力抑えるために、冷却過程では 100°C 以下になるまでガス導入を行わなかった。また、炉壁からの直接飛散物があった場合のシールドとして、Figure 3 に見えるような 50 ミクロンの無酸素銅フォイルで開放部分を覆った。



Figure 3: Copper foil shield in the vicinity of coupler wave guide opening during K2 vacuum baking.

3. 高電界試験

3.1 プロセッシング

高電界試験は、KEK の Nextef 試験設備[12, 13]にて進めた。目標とする標準運転パラメータは、パルス幅 252ns、加速電界 100MV/m であり、繰り返し周波数は 50Hz に固定した。プロセッシングの方法は、まず加速管の充填時間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り、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 日以上にわたって多少長期運転を行った後に、パルス幅を徐々に延ばして、最小のパワーレベルより再開する。パルス繰り返し周波数は 50Hz に固定して進めた。Figure 4 に、運転時間の関数として、赤:電界の値、緑:パルス幅、青:放電積算回数を、左図に K1、右図に K2 の結果を示す。

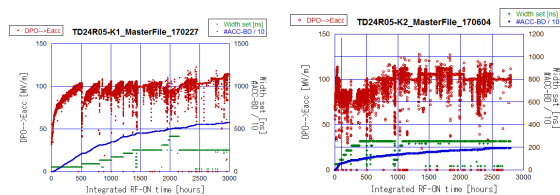


Figure 4: Initial processing of two structures.

プロセッシングの途中には、RF 波形の大きな乱れがあるか、又は電流モニターしている Faraday Cup への電流バーストを検知する時があり、これらを放電と見なして次のパルスをとめる。30 秒ほどかけて波形のセーブや真空レベルの回復を待った後に、数%程度パワーを下げてからパワーの投入を再開する。今回比較する 2 台の加速管、K1、K2 に対してこのプロトコールを念頭にした運転を実施した。これを見て分かることに、

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、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 程度しかなかったが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が K2 の方が K1 より4倍程速かったこと、
4. K1 運転時の放電数が K2 と比較して 3 倍程度であること、

等がある。このプロセッシングのスピード比較に対しては、放電頻度がパルス幅の 5 乗に比例することを仮定して、異なるパルス幅 T_p に対し放電頻度を指標とした規格化した加速電界 $E_{acc} \times (T_p/252)^{1/5}$ を用いるとわかり易い[14]。運転時間の関数、及び放電の回数関数として K1、K2 を比較したプロットを Figure 5 に示した。

左図より、K2 の方が K1 より 2 倍程度早いプロセッシングであったことが分かる。また右図より、目標に到達するまでの放電回数は K2 の方が 3 倍程度少ないことが分かる。

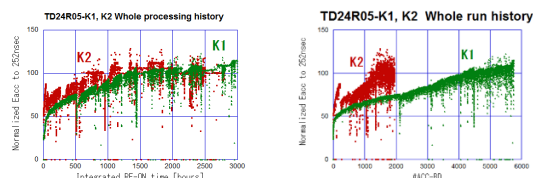


Figure 5: Comparison of processing in two structures.

3.2 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。Figure 6 に全運転時間の放電セル分布を示した。これから、特に局所的に放電しやすいセルが生じてはならず、ほぼ一律に加速管全体で放電が発生しているようであり、K1、K2 に差異はみられない。

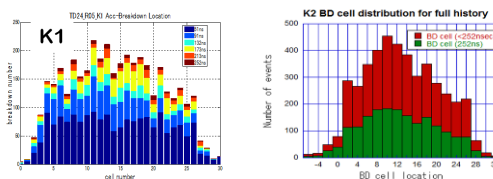


Figure 6: BD cell distribution in two structures.

3.3 放電頻度の比較

今回の実験の主要目的としていたのは、リニアコライダー等が必要とする充分低い放電頻度を實現できるか、である。放電頻度を規格化するとき、放電頻度が E_{acc} の 30 乗に比例することを用いて、

$$BDR_{normalized} = BDR_{raw} (100 / E_{acc})^{30} \times (252 / T_p)^5$$
として規格化する。これを用いると、プロセッシングの途中や異なる加速電界での運転時も含めて放電頻度の評価

ができる。K1、K2 加速管の全運転期間での放電頻度を、運転時間の関数として規格化放電頻度で比較したのが Figure 7 である。これから分かることは、K2 では放電頻度が初期に、目標パラメータまで到達するまでは K1 に比べて早く減少したが、1000 時間 (2×10^8 パルス) を越える運転となると BDR は減少しなくなり、 10^{-6} 程度で飽和してしまったのに対して、K1 では倍ほど運転時間がかかったがその後も BDR は減少し続けている様相を示している。

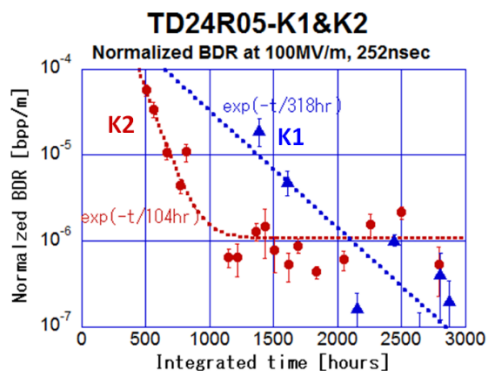


Figure 7: Evolution of breakdown rate.

3.4 放電発生の詳細時間発展

充分プロセッシングが進み、その運転状態より低い運転では BDR は低く抑えられ、放電発生後もすぐに大きな放電にはつながらない。しかし未だプロセッシングが不十分である運転領域では、しばしば放電の後のパワーを僅かに落としたパルスでは、1 パルス目から放電することが頻繁に起こる。今回の K1、K2 では、運転の最後までこの領域にとどまっていたと判断している。Figure 8 に K2 の終盤の 5 日程度の標準パラメータ近傍での運転状況例をプロットした。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。図より明らかなのは、ACC-BD も時間的にバンチしており、68 回の放電に対して 10 回程度の頻発時間帯が見える。また ACC-BD 以上に 1stP-BD が頻発し、しかも ACC-BD が頻発している時間帯で発生している。この状況から、放電後、正常運転を回復するまでには、多数回の関連した放電が生じていることが分かる。

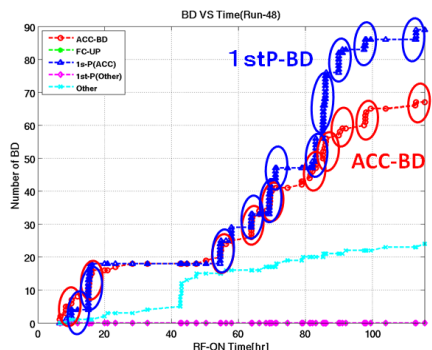


Figure 8: K2 breakdown appearance in time at later stage of operation.

3.5 暗電流

暗電流が多い加速管は高電界特性が悪い傾向があることが分かっている[15]。Figure 9 に、2 台の加速管について下流側に設置したファラデーカップへの暗電流をプロットした。数十~100MV/m にかけて、K2 の方が数倍~10 倍以上の暗電流を生じていることがわかる。また、電界増倍係数を $E_p/E_{acc}=2$ として求めると、K1 の方が 16 倍大きいことが分かった。

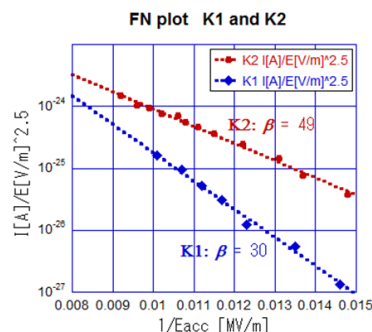


Figure 9: FN plot for downstream dark current.

4. 議論とまとめ

4.1 高電界特性の差異

高電界実験結果からいくつかの比較を Table 2 に表示した。初期性能は真空ベーク有の K2 の方が良い様に見えるが、標準運転状態に到達してからの特性は、K1 の方がどれをとっても良い。

Table 2: Comparison of High Gradient Performances

| 比較項目 | K1 | K2 |
|---------------------------------|-----------|-----------|
| 電気設計 TD24R05 | ← | ← |
| 真空ベーク 650°C、1 日 | 無 | 有 |
| * 到達までの時間 [hr] | 1500 | 700 |
| 総 ACC-BD 数 | 5500 | 2000 |
| 暗電流 10microA の E_{acc} [MV/m] | 95 | 80 |
| 電界増倍係数 | 30 | 49 |
| BDR 指数関数減少係数 [hr] | 318 | 104 |
| 3000 時間後の BDR [bpp/m] | 10^{-7} | 10^{-6} |

* 標準運転パラメータ

4.2 議論

まず述べるべきは、水素炉で組み立てたまま、真空ベーク無の加速管 K1 がこれまで試験してきた 24 セル加速管に匹敵する性能を示したことである。例えば BDR の時間と共に減少する様子をこれまで同じ施設で試験した同等の減衰構造をもつ加速構造と比較したプロット Figure 10 に示されている。つまり、高温水素炉工程で材料に固溶される水素は、TW 加速管でも大きな高電界特性の劣化は引き起こさないことがわかった。

更に今回の比較実験からは、最終性能に関しては真空ベークを施した K2 よりスキップした K1 が良かったことがあげられる。但し、プロセッシング初期のランピング

パターンを比べると、K1 ではスムーズに立ちあげているのに対して、K2 では比較して、充分プロセッシング時間をとらずにパラメータを上昇させており、また標準状態である 100MV/m に到達する前にパルス幅を延ばしていったことに、比較試験上の問題があった。真空ベークが高電界特性への寄与があるかどうかの判断をするには、プロセッシングのパラメータ変化とランピングスピードをそろえた実験を待つ必要がある。

一方、K2 の初期の BDR は減衰構造の無い T24#3 加速管と同等であり、今回の K2 製作に関わる工程にこれを実現させた要素を含んでいる可能性も否定できず、今後の研究で解明を期待する。

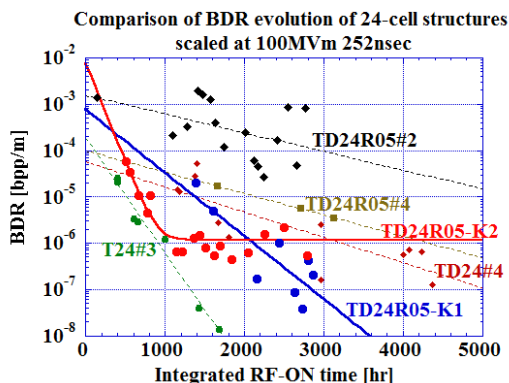


Figure 10: Evolution of normalized BDR in 24-cell structures tested at Nextef.

4.3 今後の方針

水素炉で組立した加速管 K1 とその後真空ベークをへた加速管 K2 に比較は、プロセッシングの標準化が不十分であり、詳細に比較するにはその点の改善が必要であろう。もう一步踏み込んだ意見としては、プロセッシングの進め方による高電界特性への影響を調べる事が重要であり、それを経て後に今回のような比較試験も可能になると考える。

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、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] N. Terunuma *et al.*, "Improvement of an S-band RF gun with a Cs₂Te photo cathode for the KEK-ATF," NIMA 613, pp.1-8. (2010).
- [12] S. Matsumoto *et al.*, "HIGH GRADIENT TEST AT NEXTEF AND HIGH-POWER LONG-TERM OPERATION OF DEVICES", NIMA_53664, 2011.
- [13] X. Wu *et al.*, "High-gradient breakdown studies of an X-band Compact Linear Collider prototype structure," PRST-AB, 20, 052001 (2017).
- [14] A. Grudiev *et al.*, New local field quantity describing the high gradient limit of accelerating structures, Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 102001 (2009).
- [15] T. Higo, "X-band development at KEK," X-band mini-workshop, SINAP, China, (2014).