

30年以上用いられてきた KEK 電子陽電子入射器 S バンド加速管の内面検査 INSPECTION OF INNER SURFACE OF S-BAND ACCELERATING STRUCTURES OF KEK ELECTRON-POSITRON INJECTOR LINAC USED FOR MORE THAN 30 YEARS

肥後寿泰^{#, A)}, 榎本嘉範^{A)}, 恵郷博文^{A)}, 牛本信二^{B)}

Toshiyasu Higo^{#, A)}, Yoshinori Enomoto^{A)}, Hiroyasu Ego^{A)}, Shinji Ushimoto^{B)}

^{A)} KEK

^{B)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

Abstract

The electron-positron injector linac of KEK has been operated for more than 30 years. It originally started with serving the 2.5 GeV photon factory ring and other missions were added requiring higher energy and higher charge. At present, it has been developing to inject to the SuperKEKB rings with more bunch charge (4 nC) and with much lower emittance (order of 20 μ m). However recently, the accelerating structures suffer from water leakage toward outside or sometimes into vacuum. They also show high field emission and frequent vacuum breakdowns. It is one of the urgent issues from now to identify such deteriorated accelerating structures and replace by good-behaving ones. In order to address to find the origin of such deteriorations and to search for the possible remedies, we have recently inspected some of the deteriorated accelerating structures. In this paper, we present the inspection results and discuss the weakness in design features and speculate possible mechanisms of deterioration.

1. はじめに

KEK の電子陽電子入射器では、S バンドの 2m 加速管を 30 年以上用いて運転を継続してきている[1]。最近これらの加速管には、電界放出電子の問題や真空放電頻発の問題、更に冷却水漏れの問題を抱えていることが認識されてきており、今後の SuperKEKB の安定運転に向けて喫緊の課題になっている[2]。これまでも内部の観察を非破壊で行ってきており、放電痕らしきパターンや、黒色に変色した部分などの存在を確認してきている[3]。運転履歴から劣化が生じていることが確認され、ラインオフされた加速管のうち 4 台を切断して、内部からサンプルを取り出して詳しい表面検査を行った。本稿では検査した加速管の高電力運転状況の把握と検査工程及び検査結果を報告する。この情報は、今後の SuperKEKB 入射器用加速管としての運転への反映や劣化加速管を代替するための新規製作加速管に対する仕様につながる事が期待される。

2. 加速管の劣化状況

KEK 入射器の加速管に生じている劣化要因は主に次の 3 項目である。

- 暗電流が多く、下流のスクリーンに顕著に見える。
- 真空放電の頻度が高く、次第に電界を下げざるを得ない状態にある。
- カプラー近傍で冷却水が、外部又は真空中に漏れる。

典型的な暗電流プロファイルを図 1 に示した。加速管のビームホール直径は 20mm であり、この穴を占める程の広がりをもつ暗電流であることが分かる。この暗電流は電界放出電子が主原因であり、RF パワーに対して指数関数的に増大することが分かっている。数年前までは

この暗電流がプロファイルモニターのビューポートをチャージアップし真空リークを招いていたが、現在ではチャージアップしないようコーティングで対処しており、暗電流自体での機器の破壊にはつながっていない。しかし現実には、プロファイルモニターで十分視認できない程度まで RF パワーを落として運転しているのが実状である。

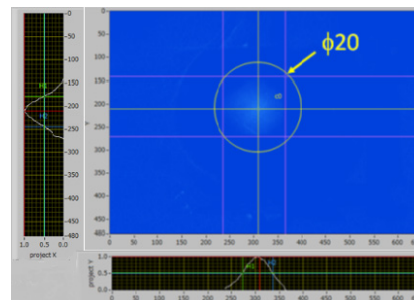


Figure 1: Profile of dark current.

入射器の RF システムは、クライストロン一台で 4 台の加速管をドライブしており、加速管での真空放電は、クライストロンまで大きな反射が帰ってくることで把握している。しかし、この方法ではシステム中 4 台ある 2m 加速管のどれが放電したのかを同定し難い。そこで各々の加速管の入力カプラーの導波管部分や RF 終端ロードに音響センサーを設置して、放電時には前者では音響信号がでること、後者では熱衝撃波形が小さくなることから、放電した加速管の同定をした[4]。

水漏れは全てカプラー周辺からである。外への水漏れは定期的に目視点検で確認しており Fig. 2 に示した様な場合に検知できる。内部への漏れは真空履歴の異常な振る舞いから検知できる[2]。

[#] toshiyasu.higo@kek.jp

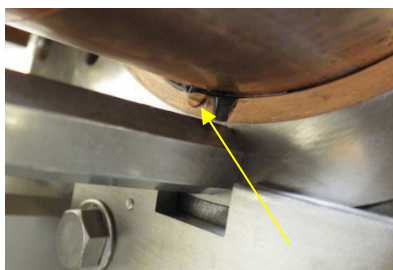


Figure 2: Water leakage to outside.

このように劣化を同定し今回評価した加速管 4 台を Table 1 に示した。#57、#63 は数年以上に前にラインオフされ、アルミオイルでポートを封止して保管してきたものである。また#119 も同様の保管状態を経て、最近 2m 管に変更したものであるが、運転前に水漏れが発覚した加速管である。#28 は最近まで運転に用いてきた加速管であり、真空放電多発を確認してラインオフした加速管である。

Table 1: Inspected Accelerating Structures

加速管番号	症状	コメント
#28 (E-24)	真空放電	AC_11_3 放電確認 2016年12月ラインオフ
#57 (D-22)	真空放電	AC_34_4 放電大 2011年以前ラインオフ
#63 (D-28)	暗電流	AT_32_2 FE 大 2011年以前ラインオフ
#119 (B-22)	水漏れ	2016年以前に外部へ漏れ 2017年 真空中へ漏れ

3. 加速管のサンプル切りだし

3.1 カプラー近傍の構造

加速管構造でカプラー近傍の機械構造を Fig. 3 に示した。銅でできた部分は茶色系統の色で表示、ステンレスは灰色、冷却水を水色で示した。

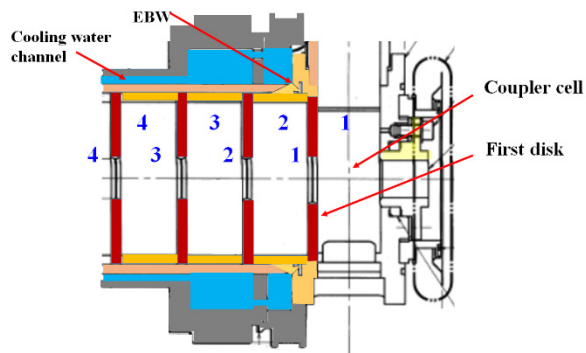


Figure 3: Schematic of structure near coupler.

3.2 放射化物の加工

加速管は $1\mu\text{Sv/h}$ 級の放射化をしているので、まずトンネル内でカプラー近傍を切断分離し Fig. 4(左)のような部分にする。続いて放射化物加工施設で外周ステンレスパイプを外し、Fig. 4(右)のように旋盤加工により外周 5mm の電鍍層を削り取って内部のディスク、シリンダーを分離した。ビームホールを通して加工時のゴミが流入ないように、内部に栓をしてから加工している。

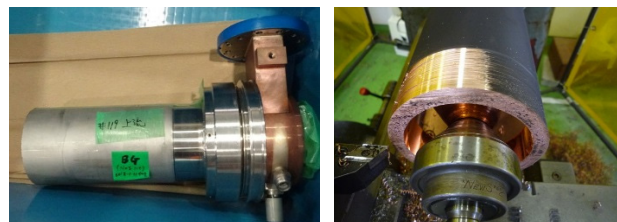


Figure 4: Left: Coupler and connecting several cells and right: peeling off the layer of outer electroplated copper.

3.3 ディスク、シリンダーの遊離

遊離させたディスクとシリンダーを Fig. 5 に示した。

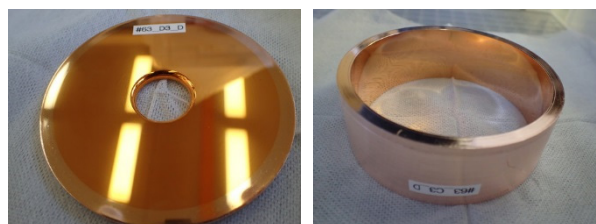


Figure 5: Separated disk and cylinder.

3.4 カプラー部

まず一番にカプラーに続くポート全てをシールして解体する。導波管への入口は Fig. 6(左)に薄紫色に見える紙細工でシールし、またビームパイプにも詰め物を入れて作業による異物の混入を抑制した。導波管は手ノコで切断し、旋盤加工を容易にしてから、第一ディスクの外周部を削り取って引き出すことにより外した。最外周にはステンレスのパーツがあり、その内側には冷却水による黒色に変色した銅の面、その内側に第一ディスクがはまっていた段差部、最後にその内側にカプラーセルが見える。Figure 6(右)には同様に切り出したカプラーで、導波管アイリス部と反対側にある電場対称化用のへこみ部が見えている例である。このカプラーではビームパイプを形成するパーツを外した後の例である。

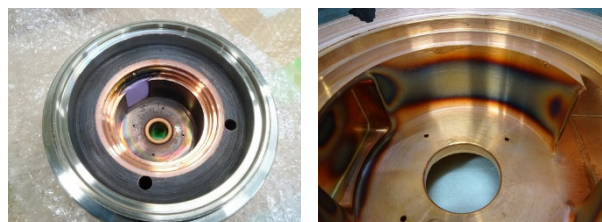


Figure 6: Coupler assembly.

4. 表面の光学的検査結果

4.1 標準的カップラーセル

4 加速管、8 カップラーを目視検査した。以前からカップラーセル内にグラファイト構造のカーボン付着による黒色化が指摘されてきている[5]が、今回も Fig. 7 に典型例を示したように、全てのカップラーで黒色に変色したエリアが観測された。導波管との間のアイリスの表、裏両側、及び電場対称のためのくぼみ部分に模様が付いている。また、Fig. 7(右)に見えるように、ディスクを外して露出するカップラーアイリス部に放電等による溶解を伴う痕跡は見えない。これは放電頻発していた加速管のカップラーも含めて全てのサンプルを通じて共通している。

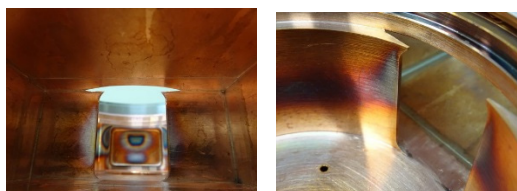


Figure 7: Typical coupler-to-wave guide iris.

4.2 黒変色カップラー(#57-U)

最も表面が変色し放電痕らしきパターンが見えたのが #57-U カップラーである。Figure 8(左)に第一ディスクを外す前のレギュラーセル側からカップラーセルを覗く方向に見た状態を示した。同図(右)には、第一ディスクを外した後のカップラーセル内状況を写した写真を示した。外周部に黒色の物質が付着していることが分かる。

4.3 #57-U カップラー近傍のディスク、シリンダー

最も変色が酷かった部分は#57 加速管の入力カップラー側である。Figure 8 にカップラーを取り出した時の写真を載せたが、外側に黒色物質が多量に存在していることが分かる。Figure 9(左)にカップラーを形成しているディスク面の光学写真を載せた。中心部は放電痕らしき構造をもった酷く変色した部分が多く、その周囲にはグラデーションが見え、何らかの厚さの連続的に変わるコーティングがなされていると考えられる。Figure 9(右)には、この裏面にビームホールを経由して侵入したと思われる黒色物質のパターンを示している。

Figure 10 には、左:導波管アイリスを形成する部分のディスクを除いた部分クローズアップ、中央:表面にフレーク状に軽く接合されており、簡単に削り落とせて、以後 SEM 分析に回したもの、及び、右:シリンダーの端面

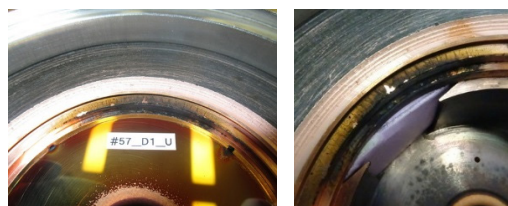


Figure 8: Coupler #57-U.

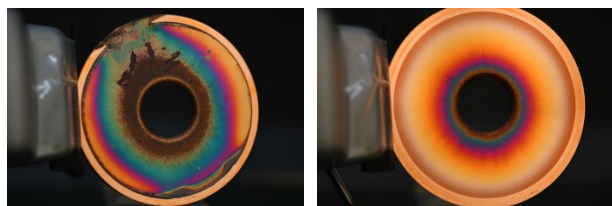


Figure 9: Disk surface in the coupler of #57-U.



Figure 10: Black flare-like material.

にエア抜きのために 90°おきに作られている三角断面の溝に付着している黒色物質と、次のセルを形成する部分(シリンダーの内面)への流入状況を示した写真を示した。

4.4 第一シリンダー

カップラーセルの次のセルを構成するシリンダー内面を目視観察すると、Fig. 11(右)に示した様に、内面は鏡面を形成する超精密加工面ではなく、回転加工でのツールマークが顕著にみえる。また、カップラーセル側には、Fig. 11(左)に見えるように表面に圧縮応力が加わったときに現れる歪みが観察された。殆どの加速管でこの表面劣化が見えるが、第二セル以降では鏡面加工に典型的な面が観察されており、第一セルでは製造時の EBW による歪みではないかと思われる。

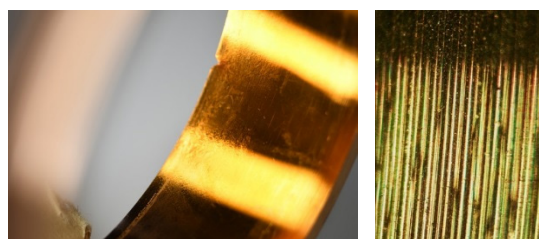


Figure 11: First cylinder following coupler cell.

5. 表面の詳細分析

5.1 #57 加速管上流カップラーのフレーク状物質

Figure 12(左)に SEM 反射電子像を、(右)に黄色の丸内の EDX 元素分析結果を示した。ミリメートル級のフレーク状で、C と O が主成分、微量の Cu が観測された。当初、冷却水と銅の化学反応により酸化銅系の物質ができていたのではないかと想像したがそうではないようだ。Al はアルミ資料台の影響と思われる。Figure 13 に示した X 線回折パターンをとると、Cu₂O が微量に観測されたものもある以外は銅の典型的なパターンのみが良くみえており、銅酸化物が主ではないことが分かった。

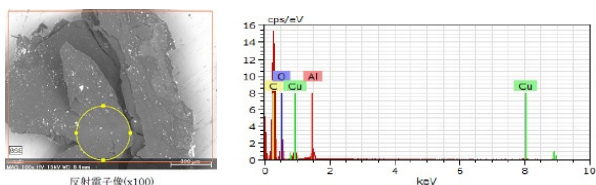


Figure 12: SEM on black flare-like material.

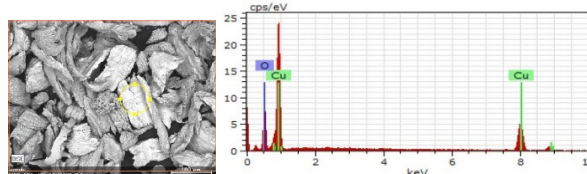


Figure 15: SEM and EDX on the black material covering the copper forming cooling-water channel.

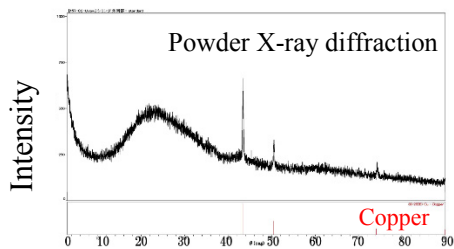


Figure 13: X-ray diffraction on the black flare-like material.

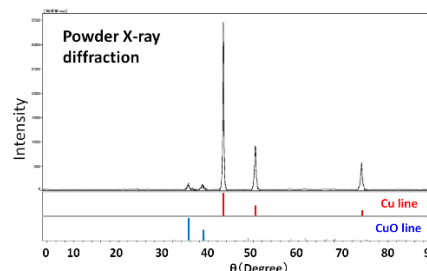


Figure 16: X-ray diffraction on the black material covering the copper forming cooling water channel.

フレーク状の剥離物質のうち、割に薄い黄色のものは、Fig. 14 に赤外吸収計測結果を示したが、 1400cm^{-1} や 2900cm^{-1} 近傍のラインが、最下段に示した鉱物油に典型的にでるラインに合致し、CH 結合由来のものであることが分かった。

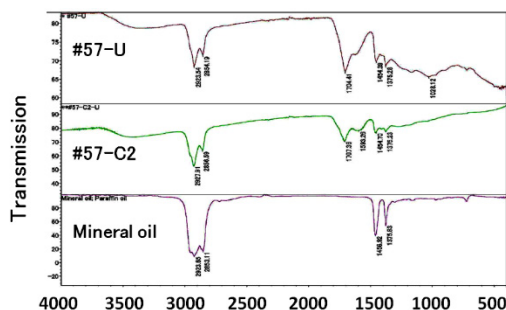


Figure 14: Infrared absorption spectra.

5.2 冷却水チャンネルの銅表面黒色物質

胴体部分の冷却水路は、電鍍された加速管本体胴体部分の外側とその周りを囲うシリンダースパイプからなる。この部分の銅表面には Fig. 4(右)に見えるように黒に変色しており、緻密な物質で覆われている。これを掻き取って SEM、X 線の分析を行った。Figure 15(左)に SEM 像を示したが、数十～100 ミクロン級の粉状物質であることがわかった。Figure 15(右)には SEM-EDX スペクトルを示したが、これから元素は銅と酸素がメインであり、炭素由来ではないことが分かった。更に Fig. 16 に X 線回折分析結果を示したが、銅の他に、黒色由来と考えられる酸化銅 (CuO) のピークが顕著に見えている。

5.3 #57 上流カプラーのディスク

Figure 9(左)の面の詳細分析を行った。まず光学顕微鏡でビームホール位置から半径方向に観察し、Fig. 17(左)にあるような、変色、表面凹凸を残す痕跡、等の全体像を得た。図から分かるように、ビームホールから遠ざかるとともに、変色具合が軽微になり、放電痕らしき円形の模様が減ってきて、変色エリアの割合が増える。Figure 17(右)には、拡大写真を示したが、半径方向に次第に変化していく様子が見える。

Figure 18 に SEM 反射電子像を示した。左は元素の違いが分かるように、右には凹凸を顕著に観察できる角度からの像である。Figure 19 には同じ場所の元素のマッピング像を示した。これらからも凹凸の少ないエリアは炭素リッチなエリアであり、酸素も多いことが分かったが、同時に銅の分布が視野全体に一樣であることも分かり、炭素や酸素層の厚さが SEM 観察深さより十分薄いことを示していることもわかる。

放電痕を示している典型例と思われる 0.5mm^2 エリアを SEM 分析した結果を Fig. 20 に示した。放電痕と思われるスポットは 100 ミクロン級のサイズであり、そのエリアは銅リッチである。それ以外のエリアは炭素と酸素が主に見えている。このエリアの凹凸を強調した SEM 像を Fig. 21(右)に載せたが、放電で銅リッチになっている部分は凹凸が大きく、表面の構造的な変化がみえるが、炭素、酸素リッチのエリアは凹凸が少ないことが分かる。

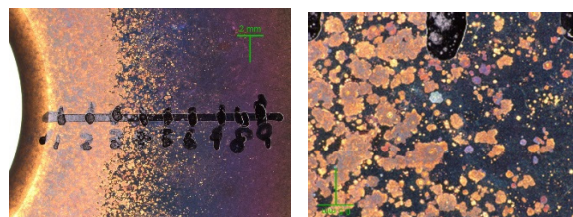


Figure 17: Optical microscope view.

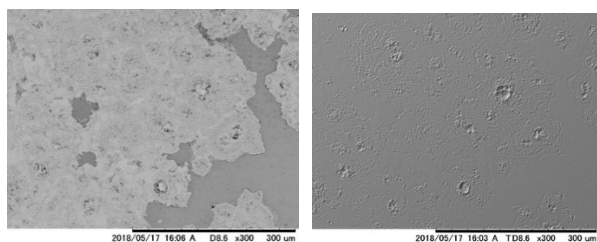


Figure 18: SEM in reflection view and up/down contrasted view. Horizontal bar indicates 300 μm.

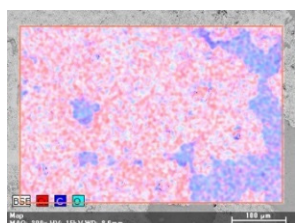


Figure 19: EDX mapping. Red=Cu, blue=C and sky blue=O.

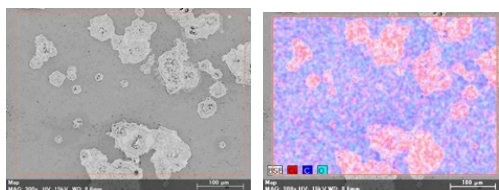


Figure 20: SEM and EDX view. Bar show 100 μm.

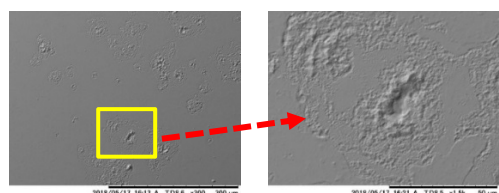


Figure 21: SEM view. Bar show 300 μm and 50 μm, respectively.

6. 議論

最も変色が酷かった部分は#57 加速管の入力カプラー側である。カプラーセル外周の、高周波的には電磁場のないはずの場所に多くの黒色物質が出現し、冷却水に関連した物質との化学反応が生成せしめた物質がおおい。またこれはカプラーセルのみでなく、ビームホールや外側のエア抜き用溝を通して下流のセルに流れ込み、黒色の変色を起こしているが、カプラーに近いほど放電痕が多数、また黒色が濃いように見うけられた。これらは、カプラーに挿入される導波管の接続設計に起因する機械的脆弱性によって、EBW やロウ付けで隔離されているはずの外界や冷却水経路から異物が侵入し、蓄積して、高電力での劣化に起因したと思われる。

上記(#57-U カプラー)以外のカプラーや周辺のディスクでは、真空放電の頻発していた加速管や暗電流が大

きくラインオフした加速管、また近年放電していることを同定して素早くラインオフしてすぐに取り出した加速管、等であるが、#57-U に見られたような強烈な変色や大多数の放電痕は見られなかった。

今回の観測を総合して、下記の点が把握でき、今後検討されるべき課題である。

- 導波管アイリススリップの表裏、電界対称性補償のためのへこみ部などが黒色に変色している。
- カプラーセルの機械設計的構造の脆弱性に起因する冷却水の外部や真空中への漏れが生じている。
- 冷却水路の銅表面には CuO が析出している。
- カプラー周辺のディスクの外部で、セル真空とつなげてある場所に黒色物質が析出している。CH 結合をもつ物質が同定された。
- 黒色物質はビームホールやシリンダーの端面の溝を通じて隣のセルに同様の変色をもたらしている。
- セル内の黒変色エリアは C リッチである。放電痕のある場所では C が少なく、Cu がメインである。
- ビームヒットに関連するディスクの上流側、下流側の違いを示唆する兆候は見えなかった。

以上の理解が得られたが、特にカプラー近傍の真空表面には炭素起源の黒色系物質がセル内に拡散して表面層を形成しており、放電痕のある部分ではその量が少ないことが分かった。黒色物質と真空放電の関連は不明であるが、残留ガス成分としての炭素を減らすようオイルフリーの真空システムを採用すべきこと、また冷却水の真空中への漏れを起源とする黒色物質の発現も疑われ、長期運転にわたり冷却水から真空へのシールを確実にする設計、製造技術が望まれる。冷却水の外部、内部、双方への漏れに関しては、導波管の挿入構造に伴い、EBW 接合部の円周上の均一性がそこなわれたことにより、漏れやすくなっていると思われる。特に EBW 接合に不具合がでると真空中に漏れることになり、多くのカプラー近傍で生じている黒色の変色につながり、酷い時には放電の頻発にもつながることになるので、今後設計変更が望まれる。

謝辞

KEK 共通基盤研究施設・放射線科学センターの平雅文氏には、SEM、X線、赤外線分析などの検査を遂行して頂き、感謝致します。

参考文献

- [1] I. Sato *et al.*, “放射光入射器増強計画—KEKB に向けて”, KEK Report 95-18, 1996.
- [2] H. Ego, “Accelerating Structure”, 22nd KEKB Accelerator Review Committee, KEK, March 2018; <http://www-kekb.kek.jp/MAC/2018/>
- [3] T. Higo *et al.*, “KEK の電子陽電子入射器に 30 年以上用いられてきた加速管の内面検査と高電界特性”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016, TUP016, p.853.
- [4] Y. Arakida *et al.*, “音響センサによる加速管の放電検出”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, TUP048, p433.
- [5] Y. Igarashi *et al.*, “高電界加速のためのリニアック加速管に関する研究”, KEK Report 2003-9, pp. 103-107, Jan. 2004.