

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

SURFACE INSPECTION AND HIGH GRADIENT PERFORMANCE OF S-BAND ACCELERATOR TUBES USED FOR MORE THAN 30 YEARS AT KEK

肥後寿泰^{#, A)}, 鈴木和彦^{B)}, 牛本信二^{B)}, 峠暢一^{A)}, 矢野喜治^{A)}

Toshiyasu Higo^{#, A)}, Kazuhiko Suzuki^{B)}, Shinji Ushimoto^{B)}, Nobukazu Toge^{A)}, Yoshiharu Yano^{A)}

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

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

Abstract

The electron/positron injector linac of KEK has been serving for multiple rings, photon factory, PF-AR ring, low and high energy KEKB rings for more than 30 years. The field emission and frequent vacuum breakdowns are observed in many of the accelerating structures. These prevent us from full-gradient accelerating and stable injection. To make this injector reliable and stable in long-term at its full capacity, the causes of these degradations should be identified and removed. In order to address this issue more in detail, some of the structures are taken off from the beam line and visually inspected. In this paper, we discuss these inspections in relation to the high-power performance.

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]。最近ではこれらの加速管は、電界放出電子の問題や放電頻発の問題を抱えていることが認識されてきている。現在これらの加速管の内面検査を始めて高電界特性との関連を調査し、今後の安定運転への知見を得る必要があると考えている。ある放電頻発していた加速管の内部は、製造当初の金属光沢は全くなく暗灰色を呈していた。また殆ど全ての加速管に関して、そのカプラーセルの電界均一性回復用のへこみ構造にこれまでも認識されてきた黒色の焼けのパターンがプリントされていることもわかる。更に、アイリスに顕著なスクラッチ様の傷があるもの、放電痕のあるもの、等が見つけられる。調査対象と調査方法は限られているが、本稿ではその結果を基に、これまでの入射器の運転での履歴をふまえて、加速管内部の状況と高電界特性を比較検討する。

この線形加速器は、1982 年に 2.5GeV Photon Factory (PF) への入射器として建設されたが、その後、1990 年代後半に KEKB への入射器として大改造され、SLED 導入によってユニット当たりのエネルギーゲインを 2 倍にし、更に A-C に渡る 3 セクターを追加してエネルギーを確保した。現在では SuperKEKB[2]への各種改造を行いつつ、当初からの PF への入射も含めてビームを供給している。その間、ビームチャージは、当初のサブ nC から KEKB 用の電子 1nC、陽電子発生用の 10nC まで増加してきている。今後 SuperKEKB では、陽電子発生用には同等のチャージ、またメインのバンチは 5nC まで増加させる必要がある。この SuperKEKB ではリングの寿命が数分であることから常時安定な入射を必要とされており、ダウンタイムは極力小さく、1 分以下とする必要がある。

2m 加速管は現在通常 20MV/m で運転される。この加速管の高電界特性を調べるため、五十嵐ら[3]は 3 台

の加速管に対して 40MV/m までの特性を調べた。これによると、放電を繰り返して通常の 2 倍の電界まで到達するが、その到達速度は内面純水洗浄を行ったものでは 2 倍早められること、暗電流が観測され、Fowler-Nordheim 型の電界依存性を示すこと、またカプラーセルの奥のくぼみ周辺に黒色の変色が見つけられ、それらがグラファイト構造をもつ炭素であること等がわかった。この試験では高電界に到達後の運転による変遷は不明であるが、そもそも通常の 2 倍までの高電界運転がある程度の安定性をもって実現されていることから、通常の電界 (20MV/m) では充分安定な構造、製造方法であることが分かった。

しかし、次章に述べる実際に使用している加速管の近年の顕著な劣化を見ると、試験だけでは見えてこないメカニズムや長期のしかもビーム運転に起因するメカニズムを通して劣化が進んできていると思われる。本稿では、この問題を明らかにする一段階として、内部の目視調査を行うことにしたので、その現状を報告する。

2. 運転状況

2.1 運転電圧

Figure 1 には、2015 年 10 月の運転時のモジュレータへの印加電圧をプロットした例である。正常運転値は 42kV であるが、様々な高電力運転時の特性を反映して低い電圧で運転しているユニットが多い。クライストロン出力パワーは印加電圧の 2.5 乗に添うはずであるが、実用上は 2 乗にのるとして良く、ビーム加速電圧だと E_s にリニアに関係する。入射リナックの最大電圧はかなり抑えられ、実用的にはスタンバイのユニットの数が充分とれず、安定な運転を確保できないことにつながっている。

Figure 1 には、 E_s を落としている理由を記している。赤○の場所では近傍のプロファイルモニターでビームに関係なく多くの発光がみられ、また紫○の場所では反射波が定常的に大きかったり、頻繁に大きくなったりするため

[#] toshiyasu.higo@kek.jp

である。

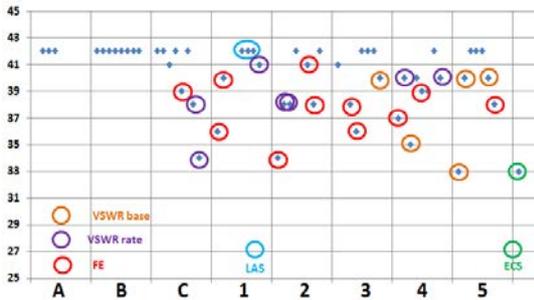


Figure 1: Es, voltage to drive modulator, in operation.

また同図で一目瞭然なのは、A と B の 2 セクターでは全て定格で運転しているのに対し、C セクター以降は多数が Es 低下を余儀なくされていることである。C セクター以降が 180 ベンドを経た下流に位置するため、ビームエネルギー分散やエネルギージッター等に関連しているのではないかと疑っている。また、セクター最上流にコリメータが挿入されており、セクター最上流の不安定性はそれからのシャワーが関係しているかもしれないと思われるが、試験的にコリメータを抜いても明瞭な改善が得られず、直接的な検証には至っていない。

2.2 フィールドエミッション (FE)

Figure 2 には、2011 年時点の AC_32_2 (3 セクターの 2 ユニット目、4 台中 2 台目の加速管) に起因すると考えられる暗電流が加速されて線形加速器の最終端に設置したロスモニター [4] でとらえた波形である。AC_32 ユニットの Es に従って大きく変化することがわかる。また、前後の Steering 磁石をふるることにより、下流への電流通過状況が変化し、延いては入射器エンドでのロス計測が変化することがわかった。

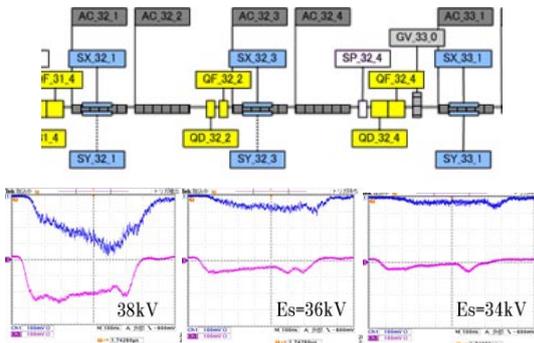


Figure 2: Top is the accelerator configuration near AC_32_2. Bottom are the fiber loss monitor shapes at the end of linac (sector 5) with varying the Es of AC_32_2 located at the upstream end of sector 3. From left to right, those with Es at 38, 36 and 34kV, respectively.

また、2011 年 6 月に調べた 3 セクター以降の FE の状況を Figure 3 に示した。青丸○は、運転の Es 値である。

赤ダイヤモンド◆はユニット内にあるスクリーンモニター (SC) に発光が見られる Es 値であり、赤紫三角▼印は下流の SC が発光する場合である。後者では常に Es を下げていることが分かるが、前者ではそれ程気にせず、又は気付かずに運転していることが分かる。多くのユニットが FE が原因でパワーを抑制していることが明白である。

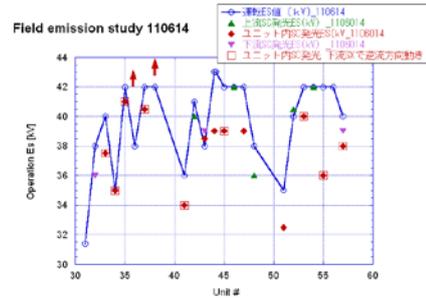


Figure 3: Es in operation (blue circle) in June 2011 and the field emission evaluation near each accelerator structure.

2.3 真空放電

2011 年時点の AC_34_4 (3 セクター、4 番目のユニットの 4 台目の加速管) では、真空放電が頻発していた。これを確認するために、音響信号を用いた。通常用いられる RF シグナルを入射器で用いることができなかったのは、入射器の RF ユニットの正規システム構成によるもので、加速管の直前直後に RF モニターを配置できないためである。具体的には、トーナメント方式で 4 分配されたパワーが 4 台の加速管に導かれ、そのどこかで放電が発生した時の反射波はその構成をさかのぼって 2 台の 3dB 分配器を通った後に SLED 直後の方向性結合器でモニターが可能であるが、加速管からの単純な反射波になっていないため、解読が難しいためである。そこで放電時の熱衝撃が加速管の導体を伝わって伝搬する音響信号をとらえて、どの加速管であるか、又その加速管内の位置同定を試みた。Figure 4 がその例である。当時問題になっていた AC_34_4 にマウントされた音響センサーからは放電と同期してシグナルがえられた。常に Ch1 と Ch2 が早く速い立ち上がりを示し、出力カプラー付近では 1ms 程度遅れて信号が現れる。これにより、この加速管の入力カプラーでの放電が予想された。

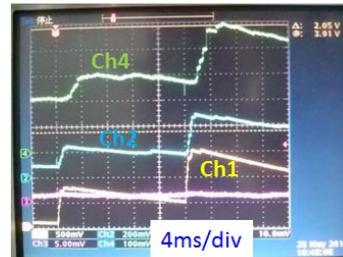


Figure 4: Acoustic signals from AC_34_4. The sensor locations are Ch1=input coupler, Ch2=input wave guide and Ch3=output coupler.

3. 加速管の構造

3.1 加速管構造

入射器で用いられている加速管は長さが 2m あり、電気、真空部分は無酸素銅を超精密加工後スタックされ、外面を銅メッキされて製作されている。レギュラーセル部分は超精密ダイヤモンド加工で仕上げられており、鏡面であるが、カプラーセルや特にビームパイプに連結されていく部分は超精密加工が施されておらず、旋盤の引き目が顕著に見える。また導波管との間を仕切る長方形の間口は、リング加工で成形され、エッジ様の仕上げが見える。さらに、カプラーセルの導波管から覗き込んで最も奥に、電界の対称性を上げるための直方体状のくぼみを有している。内視はこれらの構造や表面を念頭に行うことになる。Figure 5 にカットモデルと断面図を示した。

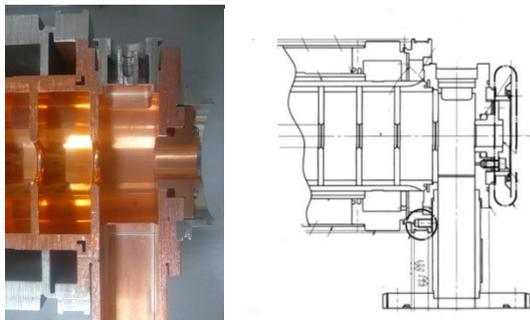


Figure 5: Left picture is cut model of 2m accelerator tube, while right is its cross section near coupler.

外部から直接又は清浄なスコープを挿入して内部を調べるに当たり、そのポートは二つ、ビームポートと導波管ポートである。加速管に接触しないよう、アライメントは正確に行うことが必要であるが、ビーム軸からの内視には加速管支持に用いる基準の場所、導波管からは導波管フランジ自身が精度良く組み立てられているので、それらを基準にしてマウントする。

4. 加速管内視

4.1 ビーム軸から覗いた内視

Figure 6 に、顕著な FE の観測されていた加速管#63 (AC_32_2) と、頻繁に放電が発生していた加速管#57 (AC_34_4) のビーム軸から覗いたカメラ写真を示した。双方とも、第一アイリスに金属光沢をなくす程の変色が見られた。特に#57 では、セル内部にも広がり、奥のセルまで広がっている事が観測された。この例のように、かなり進行してからの状態は、ビーム軸方向からの観察で顕著に分かると考えられる。

4.2 導波管から覗く内視治具

前節の観察はビーム軸方向からであり、ビームラインに設置されたままの運転状態にある加速管に対してはビームラインを空ける必要があつて、現実には観察はラインオフした時などに限られ、多数の加速管に対して行う

のは難しい。そこで、導波管からカプラーセルに硬性鏡を挿入して観察することを試みた。

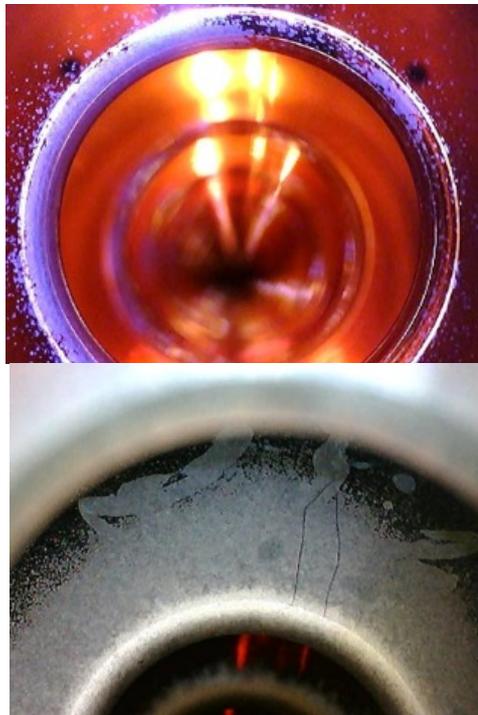


Figure 6: First iris seen by a camera set on beam axis. Upper is #63 (AC_32_2) and lower #57 (AC_34_4).

Figure 7 に硬性鏡挿入セットアップを示す。入射器で用いている導波管フランジは、SLAC の Merdian 型と丸形フランジがあり、双方に設置できるよう設計されている。フランジの中心を通る直線導入機構をもち、それにスウィングプリズム型 $\phi 8$ mm の硬性鏡をセットしてある。このアイピースに C マウントを設置し、CCD 型カメラを装着して撮影した。

Table 1: 硬性鏡挿入セットアップ

ストローク	80 mm
硬性鏡	オリンパス
形式	R080-024-045SW115-50ZM25
外径、有効長	$\phi 8$ mm、340 mm
視野方向、視野角	45~115 度、25~50 度
焦点深度	5 mm~ ∞
カメラ	Lumenera LW570C
画素数	500 万画素
ピクセル	2.2 μ m \times 2.2 μ m

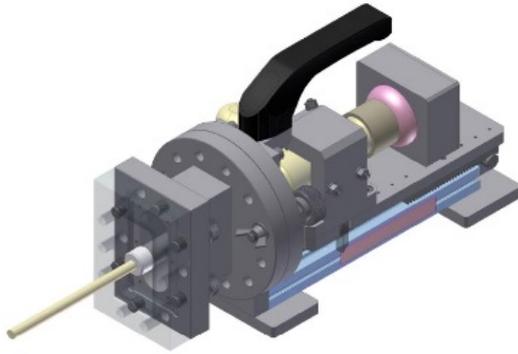


Figure 7: Inspection device seen from wave guide port.

4.3 導波管から覗く観察

導波管との結合孔を通して硬性鏡をカプラーセル内に挿入し、硬性鏡軸周りの回転と Tilt(あおり)を組み合わせることで、カプラーセル内部を詳細に観察できるが、次のセルの遠い側のアイリスもある程度の観察が可能である。典型的な4つの視野を、前章で取り上げた#63 (AC_32_2)と#57 (AC_34_4)の2台の加速管について観察した結果を以下に示す。

4.3.1 #63 加速管

FE の顕著だった加速管#63 (AC_32_2)の導波管から硬性鏡を導入して観察した例を Figure 8 に示す。左が入力カプラー側、右が出力カプラー側インพุットカプラー側で、上から下に掛けて、カプラーセルからレギュラーセル側を覗いた第一アイリス、第二アイリス、ビームパイプに向かうアイリス、及びカプラーセルの奥のへこみ部である。ビームホールアイリスには多くの放電ピット様の模様が見え、FE の起源になっているようである。但しこれは入力カプラー側に顕著で、出力側は金属光沢が良く残っているのが分かる。また、二番目のアイリスにもその兆候があり、手前に部分的に見える第一アイリスと比べて放電痕の様子は薄くなっていることも分かる。ビームパイプへつながるアイリス部は、ダイヤモンド精密加工でない面が見える。第一アイリスに相応して入力側は多くの放電ピットが見えるのに対して、出力側は製造時の面であると考えられる梨地に近い面が観察された。導波管アイリス部は、製造当時の機械加工がうかがえて、これ自身には問題が無いように見えている。

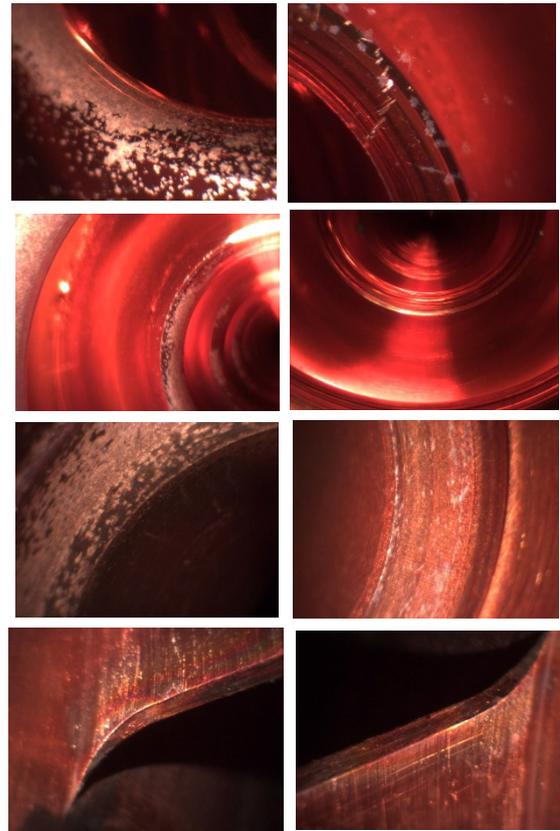


Figure 8: Observations of #63 seen by a borescope inserted from the wave guide into a coupler cell and viewing four directions from the coupler cell. Lined up from top to bottom are first iris, second iris, beam pipe iris and wave guide iris lip. Left figures are those of input coupler side and right of output coupler side.

4.3.2 #57 加速管の導波管から覗く観察

真空放電の顕著だった加速管#57 (AC_34_4)を、導波管側からカプラーセルを通して覗いた観察例を Figure 9 に示す。リストアップした写真群の配列順序は Figure 8 と同じにしてある。入力カプラー側の第一アイリスは全く光沢がなく、Figure 6 の右図と同等の様相を示している。また第二アイリスもかなりの変色が見られる。ビームパイプへのアイリスもひどい梨地が形成させていることが分かる。一方出力カプラー側は、第一、第二アイリスとも金属光沢があり、健全に見え、ビームパイプ側アイリスには機械加工の痕跡が見える。

#57 加速管に特徴的なのは、導波管アイリスリップである。垂鉛系の色で液状の流れを想像させる変色があることで、これは出力カプラー側には見られない。

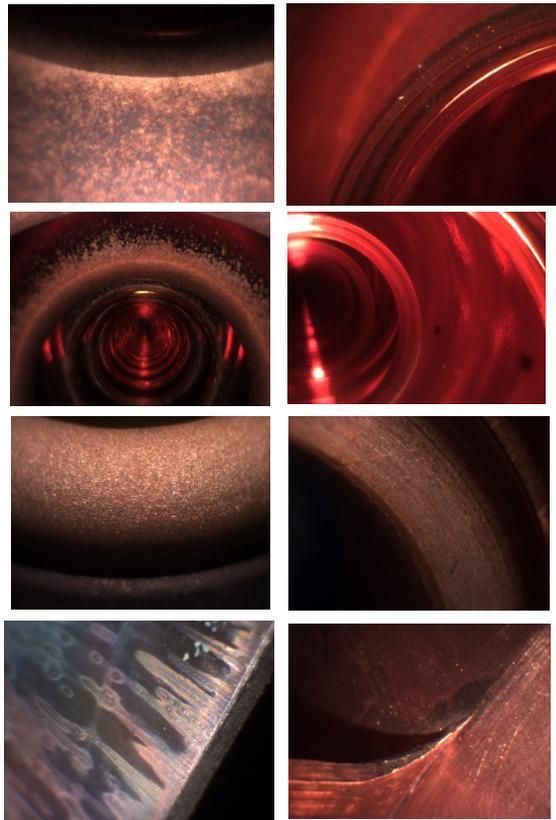


Figure 9: Observations of #57 seen by a borescope. The shown figures are appeared in the same manner as Figure 8.

5. 議論と今後の方針

運転当初に問題視されていた FE の多い加速管や真空放電の多い加速管において加速管の内視を行い、これらにおいては内面の金属光沢が失われ、放電の痕跡や変色が顕著であることを確認した。これらの内視には、ビーム軸方向からアイリスを覗くことが一般的に行われていたが、今回導波管側から硬性鏡を挿入することにより、カプラーセル内から観察できる第一アイリスや第二アイリス、またカプラーセル内の特徴的な部分全体をくまなく確認することができるようにした。これにより、ビームラインから外すこと無く内部の重要な場所の内視が可能になり、加速管の特性評価への判断に用いることができることが分かった。

今後疑いのある加速管に関しては、内視の調査をへて、ラインオフしたり、再プロセッシングに回したり、場合によっては内面の洗浄等の措置を加えて高電界特性の改善を狙うことができるかもしれない。KEK ではこれらの加速管に対する高電界特性評価のためのテストスタンドを構築しており、そこでの評価を通して SuperKEKB に対する要求に最大限応えることにつなげる予定である。

5. 謝辞

KEK の電子陽電子入射器運転には多くの方々に関

与されて実現できている。これには主に著者以外の三菱電機システムサービスの方々が多く関与されており、この場を借りて感謝を表明致します。

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] T. Miura *et al.*, “Progress of SuperKEB”, IPAC2015, 2015, USA;
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2015/papers/tuyb1.pdf>
- [3] Igarashi et al., “High-Gradient Tests on S-band 2m-long Accelerating Structures for KEKB Injector Linac”, Particle Accelerator Conference, 2003, USA;
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/p03/PAPERS/RPA B050.PDF>
- [4] Y. Yano et al, “Development of Optical-Fiber Beam-Loss Monitor”;
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj8/proceedings/poster/MOPS075.pdf