

教育加速器(KETA)の現状と課題

CURRENT STATUS AND CHALLENGES IN THE KEK EDUCATION AND TRAINING ACCELERATOR(KETA)

福田将史[#], 森川祐, 濁川和幸, 竹内保直, 肥後壽泰, 福田茂樹
Masafumi Fukuda[#], Yu Morikawa, Kazuyuki Nigorikawa, Yasunao Takeuchi,
Toshiyasu Higo, Shigeki Fukuda
High Energy Accelerator Research Organization: KEK

Abstract

The KEK education and training accelerator(KETA) is a small electron linear accelerator aimed at developing human resources who can contribute to accelerator science. In this accelerator, the electrons emitted by a thermal-electron gun are bunched by an S-band standing wave buncher and then accelerated up to 25 MeV by a 2 m S-band traveling wave accelerating tube. In order to ensure more stable beam operation, the problems around the electron gun were addressed, and modifications were made, such as the addition of a monitor. The KETA is used for accelerator seminars, SOKENDAI classes in order to provide accelerator practicing for graduate students, university engineers and company people involved in accelerators, and young researchers. In the seminars and classes, in addition to basic lectures on accelerators, practical training using electron beams is provided to allow students to experience accelerator operation.

1. はじめに

教育加速器(KEK Education and Training Accelerator: KETA) [1]は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の ERL 開発棟内にある教育的利用を主目的とした加速器である。この加速器は、加速器科学に貢献できる人材の育成を目的として、2018年から始まった大学加速器連携ネットワークによる人材育成等のプログラム(IINAS)により進められた。昨年度からは加速器科学国際育成事業(IINAS-NX)[2]にて継続されている。

この加速器では、授業やセミナーにおいて、加速器の基礎の講義の他、電子ビームを用いた実習を行い、実際の加速器運転を体験してもらっている。対象は、総研大などの大学院生、加速器に携わる大学などの技術系職員、企業の方、国内外の若い研究者を想定している。現在は、総研大の授業、KEK インターンシップ、IINAS-NXの加速器セミナーなどに利用されている。

もう一つの目的として材料照射試験もあり、ビームラインに照射部を設けている。こちらは、放射化をさせない低いエネルギー電子ビームでの材料改質試験や材料劣化・放射線分解評価などを想定している。

この教育加速器には、主ダンプモード、副ダンプモード、照射モードの3つの運転モードがあり、目的に合わせた最大定格が定められている。最大エネルギーは25 MeVで、照射材料の放射化を避けるため、照射モード時のみ11 MeVとなる。また、最大出力は、主ダンプモード、副ダンプモード、照射モードで、それぞれ、2500 MeV・nA、25 MeV・nA、1100 MeV・nAで、ビーム電流としては、副ダンプモードの時のみ1 nA、他は100 nAとなっている。典型的には、パルス幅0.5 μs、パルス繰り返し10 ppsで運転している。

2022年9月に施設検査を受けて合格し、現在は授業やセミナーでの利用が始まっている。また、利用に当

たって加速器をより安定に運転できるようにするため、検査を優先して先延ばしにしていた問題への対処や改修も行っている。本稿では、教育加速器について説明した後、これらについて報告する。

2. 教育加速器(KETA)

教育加速器は、Fig. 1のような小型の線形電子加速器であり、75 cm厚のコンクリートシールドで覆ったビームライン、RFシステム、制御系の機器がおよそ10 m×10 mの中に収まっている。

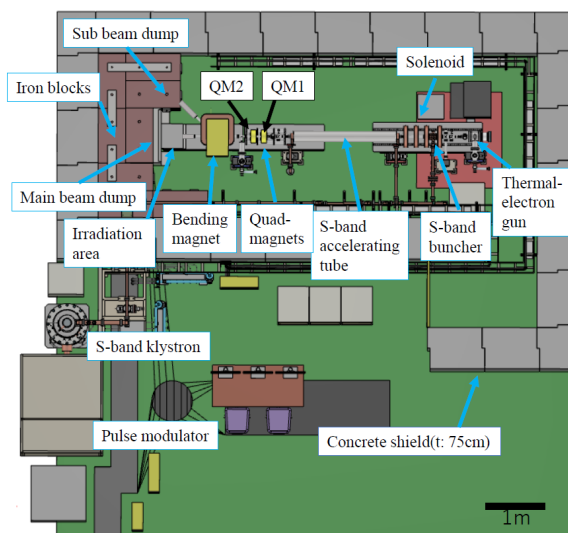


Figure 1: Beam line layout of the KETA.

電子源である熱電子銃で生成した連続ビームは、S-band 定在波型バンチャーでバンチングし、さらに S-band 2 m 進行波型加速管で最大 25 MeV まで加速する。その後、電子ビームは主ダンプへ行くが、エネルギー測定時は、偏向電磁石の磁場をかけて、副ダンプへビームを曲

[#]mfukuda@post.kek.jp

げる。また、照射試験時は、エネルギーを 11 MeV 以下に下げて使用する。照射材料を設置する照射部は、主ダンプのすぐ上流となっている。

熱電子銃のカソードは、Ba を含侵させた グリッド付き BI カソード (NJRC:NJK2221A) で直径は 8 mmφ であり引き出し電圧は 50 kV で運転している。また、バイアス電圧やグリッドパルス電圧で電子ビームのエミッションを制御できるようになっている。Figure 2 にカソード部と全体の写真を示す。左がカソード部で右写真の碍子の中に設置されている。

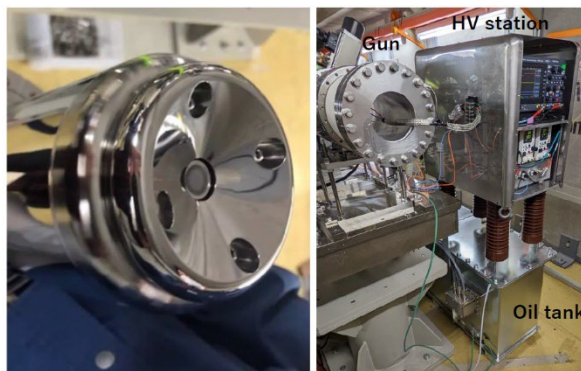


Figure 2: Pictures of the cathode part (Left) and the thermionic electron gun (Right).

隣には、1:12 の昇圧トランスを収めたオイルタンクがあり、この上に碍子を介して、電子銃と同じ引き出し電圧がかかる高圧ステーションがある。ここにグリッドバイアス、ヒーター、グリッドパルス電源、信号モニタのためのオシロスコープ、および、これらの制御用通信機器を設置している。この高電圧部はノイズ対策のため、金属ケースで覆っている。

ヒーター電流やグリッドバイアスおよびグリッドパルスは Fig. 3 にあるような配線で熱電子銃へと接続している。高圧ステーションから電子銃へのラインはノイズ対策のため編組線で覆っている。リモート制御のための高圧ステーションと外部との通信線は、光ファイバーで接続している。

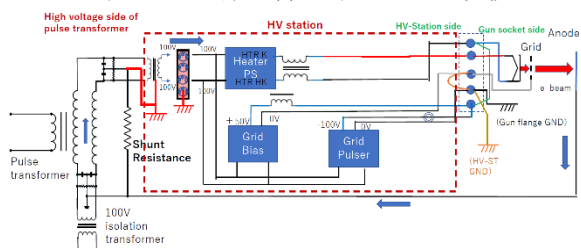


Figure 3: Circuit around an electron gun.

熱電子銃からの連続ビームを高周波で加速できるよう、下流に設けた周波数 2856 MHz、 $\pi/2$ モードの定在波型バンチャー (Fig. 4) でバンチングする。また、上下に取り付けた小型ヒートシンクに流した 26 度の冷却水で温調し、共振周波数がずれないように保持している。

バンチ化した電子ビームは、2856 MHz、 $2\pi/3$ モードの 2 m 準定電界進行波型加速管 [3] で最大 2.5 MeV まで加速する。これは 30 度の冷却水で温調している。2.5 MeV 運転時には、12.8 MW、2.5 μ s の RF パルスを入力する。

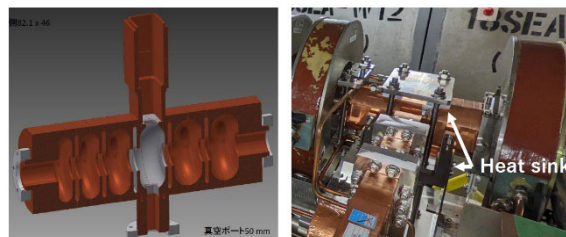


Figure 4: The cross section and the picture of the S-band SW buncher.

最後にビームを受け止めるビームダンプは主ビームダンプと副ビームダンプの 2 つがある。ダンプ直前に電子ビームはアルミ 2 mm の真空窓から大気に出て、アルミ合金のブロック (主: 15 cm、副: 約 10 cm) でダンプされる。その周りには遮蔽用の鉄ブロックを多数配置している (Fig. 1)。また、真空窓と主ビームダンプの間が照射部で、ここに照射試料を設置できる。

ビームライン上には、ビーム制御用に電磁石を配置している。電子銃から加速管入口までは低エネルギーでビームが広がりやすいため、ソレノイドコイルを配置し、約 0.07 T のソレノイド磁場で収束しながらビームを輸送する。加速管下流には、磁極長 100 mm、ボア径 35 mmφ の四極電磁石を 2 台設置しており、その下流にはエネルギー測定のため、45 度偏向電磁石を設けている。その他には、ビーム軌道を補正するステアリング電磁石が電子銃下流、バンチャー下流、加速管上流にある。

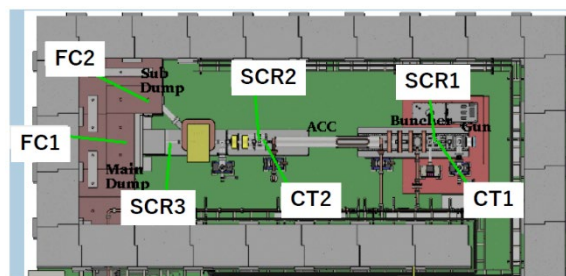


Figure 5: Placement of beam monitors.

ビームモニタとしては、ビーム電流をモニタする Current Transformer (CT) を 2 台、および、ビーム位置やサイズを計測するスクリーンモニタ (SCR) を 3 台設けた。SCR1、2 はアルミナ蛍光板、SCR3 は Ce:YAG をターゲットに用いている。このスクリーンモニタは、圧縮空気で動作する導入機で、ビームラインに出し入れできるようになっている。また、ビームダンプのアルミブロックを電気的に浮かせて Faraday cup (FC) とし、ビーム電流をモニタできるようにしている。Figure 5 に配置を示す。

高周波源は 1 台の S-band 2856 MHz のクライストロン (三菱電機 PV-3030A2) で、出力した RF 電力 (最大 14.2 MW) を 10 dB 分配器でバンチャーと加速管へそれぞれ 1:9 の割合で分配して供給する。分岐後の電子銃側にバンチャーと加速管の相対的な RF 位相を調整するための S-band 移相器がある。Figure 6 に、この RF システムのレイアウトを示す。この加速器では、典型的にはパルス幅 2.5 μ s、繰り返し 10 pps で使用する。

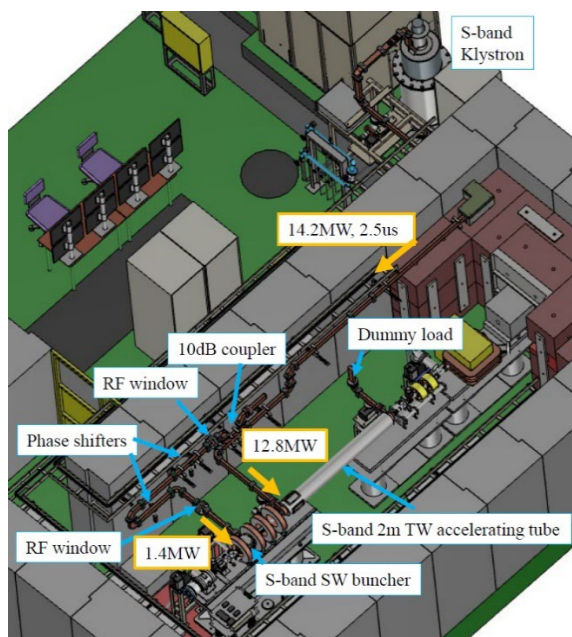


Figure 6: RF system.

3. 問題への対処および改修について

3.1 チャージアップ対策

電子銃からバンチャーの区間では電流モニタ用のセラミック部やスクリーンモニタ用のアルミナ蛍光板でチャージアップが起きており[4]、この区間はエネルギーが 50 keV と低いため、ビーム軌道がチャージアップによる電界で変わり、ビーム輸送効率が時間で変化していた。

これを解消するため、ビームパイプ内部に CT のセラミック部直前まで SUS パイプを挿入し、セラミック部に電子ビームを当たりにくくした。また、アルミナ蛍光板の表面には SUS の網を取り付けた。

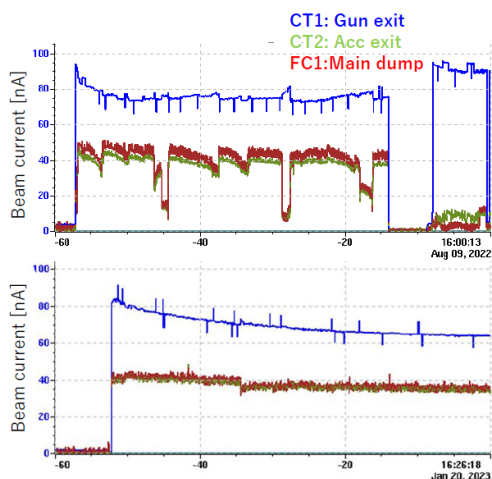


Figure 7: Trend of the beam current. The upper and lower graphs show the before and after installing the SUS pipe and the mesh respectively.

Figure 7 は、ビーム電流のトレンドで、チャージアップ問題への対処前(Fig. 7 上)は、上流での軌道変化で、加速管以降のビーム電流が下がり、放電して戻るを繰り返

しており、不安定であった。対処後(Fig. 7 下)は、それが消え安定に運転できるようになっているのが分かる。現在は、80~90 nA での運転が可能になり、ほぼ最大定格どおりの電子ビームを輸送できている。

3.2 バンチャー用のチラー導入

当初、バンチャーの冷却水は加速管と同様、ERL 棟全体の冷却システムの冷却水を使用しているため、水温は 30 度に固定であり、外気温の変化の影響を受けてしまった共振周波数は、マスターオシレーターの周波数を 2856 MHz から変更することで対処していた。例えば夏には 2855.8 MHz と 200 kHz ずれた状態だった。

バンチャーの空洞構造は、バンチング時に加速されて変化するβに合わせてビーム進行方向の長さが増減している (Fig. 4)ため、周波数が設計からずれてしまうとバンチングにも影響はあると思われた。

特に入力 RF 電力を下げて 10 MeV にて運転する照射モードにおいては影響が出やすいと思われた。これは、RF 電力が下がることで電界が設計値より低くなるため、バンチャー内のβの変化量も変わり、ビームが乗る位相がずれ、バンチングが悪い状態となっているからである。

そこで専用のチラーを用意して独自に温度制御できるようにし、共振周波数を常に 2856 MHz に合わせられるようにした。温度調整は、反射 RF の波形を見ながら最小になるように行い、その時の温度はバンチャー表面で 26.0 度となった。

チラー導入後、10 MeV 運転において、バンチャー入口から加速管出口の区間でのビーム輸送効率に少し改善が見られ、26 %から 30 %となった。22 MeV 運転では、バンチャーに十分な電界が立っているためか、輸送効率は約 50%と、特に変化は無かった。

3.3 グリッドパルスに乗るノイズへの対処

電子銃のグリッドパルスには、電子銃の高圧パルスに伴って、Fig. 8 左のようなノイズが乗っていた。このノイズが高電圧パルスの立ち上がり立ち下りのタイミングにあるため、グリッドバイアス電圧を高くして電子ビームが出ないように対処していた。高圧ステーション部をステンレスの板で覆っているが、このノイズに効果は無かった。

そこで、電子銃の高電圧と同電位になる高圧ステーション部にある機器に AC 100 V を供給するための 3 線のラインのうち、シャント抵抗がつながっている中線を高圧ステーションまで上げて、そのグランド(GND)に接続した(Fig. 3)。これにより、ノイズはきれいに消えた(Fig. 8 右)。接続前は、高圧ステーションの GND があいまいになっており、それが良くなかったと思われる。

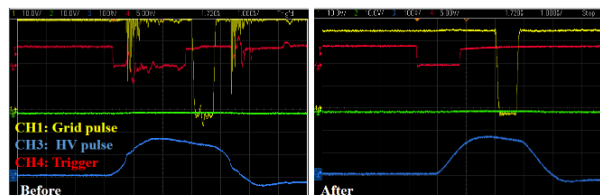


Figure 8: Signals of the grid pulse and the HV pulse for the gun.

3.4 電子銃高圧パルスの過電流問題

Figure 3 にあるように電子銃の高圧電源から供給されたパルス電圧は、パルストランスで 12 倍に昇圧する。定格は、1 次側で最大 5 kV、300 A、2 次側で最大 60 kV、25 A である。パルス幅は半値幅で 2.5 μ s、繰り返しは最大 50 Hz となっている。シャント抵抗は、設計値 29 k Ω のセラミック抵抗器(東海高熱のエレマー抵抗)を 12 本並列に接続したもので、合成抵抗は 2.4 k Ω となる。電子銃カソードの抵抗の方がずっと大きいので、パルス電流のほぼ全ては、シャント抵抗に流れることになる。

ただ、運転時の高圧電源の出力電圧は、本来設定したい 4.0 kV より低い 3.8 kV であった。これは、それ以上設定すると電源がエラーで停止してしまうためである。

この問題の調査を行ったところ、パルス電流が想定約 1.7 倍流れていることが分かった。このため、過電流で電源がトリップし電圧が上げられない状態だった。

電流がシャント抵抗以外にも流れている可能性があったため、パルストランスから外部につながっている、電子銃への高圧供給、通信、AC 100 V のラインを外してみたが、状況は変わらなかった。よって抵抗に原因があると思われたため、これを調査した。

抵抗調査の結果、東海高熱のエレマー抵抗は高電圧がかかると抵抗値が下がるという特性を持っていることが分かった。抵抗の本数を 12 本から 6 本や 4 本にして、いろいろ組み合わせを変えてやってみたが、抵抗値が高電圧で下がるのは変わらなかった。また、本数が同じ場合は、抵抗の減少量も同じで、個体差は無いようであった。テストで測定すると、12 本並列の合成抵抗は 2.1 k Ω で、定格の 2.4 k Ω (=29/12)とだいたい同じ値となった。

Figure 9 は、高電圧パルスの電圧を変えた時の電圧と電流のパルス波形、および抵抗値の変化である。抵抗値は、パルスのフラットトップの部分での電圧と電流から計算した。ただし、0 V の時の抵抗値はテストで測定したものである。

抵抗値は、電圧の上昇に伴い減少し、高圧側では減少量が一定値に漸近していくような変化をしている。

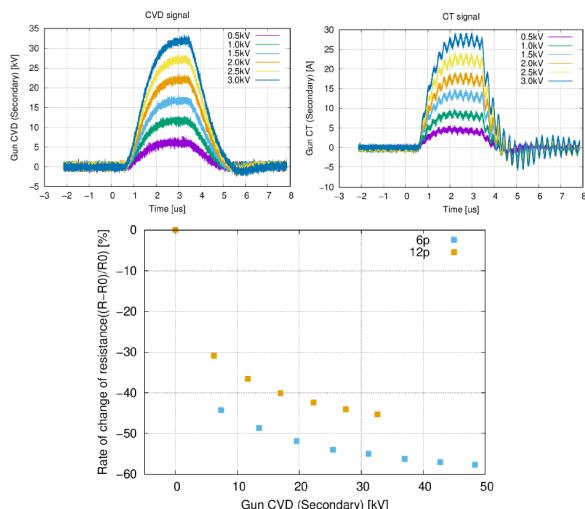


Figure 9: Pulse shapes of the voltage and the current of the HV pulse for the gun(upper graphs) and the rate of change of resistance as a function of the voltage.

使用する 50 kV の電圧では、抵抗が約半分になってしまうことが分かったので、抵抗の本数を半分にする事で対処した。元々 3 倍の余裕を見て設計していたため、半分にしても問題ないと判断した。

以上から東海高熱のエレマー抵抗を使用する際は定格電圧での抵抗値を確認することが大事である。

本数変更後、抵抗の変化でマッチングがずれ、パルス波形が変わってしまったため、インダクタンスを調整してマッチングを行った。電源側からの高電圧出力ポートは 3 つあり、取り口を変えることでインダクタンスを変更できるので、波形を見ながら取り口を選択した。

以上の対処後は、電子銃に定格の 50kV をかけられるようになった。フラットトップは改修前より若干短くなったが、ビームを載せる 1 μ s の幅はあるので、これで使用することにした。

3.5 スクリーンモニタの追加とエミッタンス測定

Q スキャンによるエミッタンス測定をできるようにするため、四極電磁石の約 1 m 下流にスクリーンモニタを新たに導入した(Fig. 5 の SCR3)。ターゲットの蛍光板は、ビーム軸に対して 45 度傾けて取り付けられ、ビーム進行方向と垂直な方向の真空窓から、カメラで撮影できるようにしている(Fig. 10 左)。

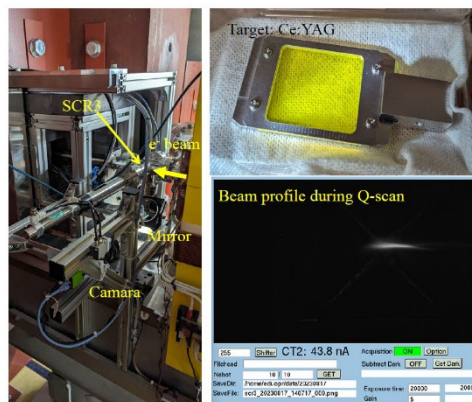


Figure 10: Pictures of the SCR3, the target and measured beam profile by the SCR3.

ビームサイズを正確に測定したいため、ターゲットは梁の少ない Ce:YAG を選択した。大きさは約 30 mm 角で厚さ 100 μ m となっている(Fig. 10 右上)。

Ce:YAG は黄色みがかかった透明な板なので、電子ビームが通過する部分の光は透けて見える。そのため、傾けた Vertical 方向では厚さ 100 μ m 分滲むが、四極電磁石で収束させた際に予想されるビームサイズは 1 mm 程度なので、この滲みは無視できる。

ターゲットマウントには目盛りがあり、これを使用してピクセルあたりの長さを校正できるようになっている。校正値は 24 μ m/pixel となっている。

四極電磁石の下流にビームプロファイルモニタを導入したので、Q スキャンによるエミッタンス測定を行った。四極電磁石は 2 台あり(Fig. 1)、上流側の QM1 が QF、下流側の QM2 が QD で、それぞれ Horizontal 方向および Vertical 方向のエミッタンスを測定するのに使用した。

四極電磁石の Effective length を考慮した磁極長は 121 mm であり、四極電磁石とビームプロファイルモニタ

の距離は約 1 m となっているので、薄レンズ近似でエミッタンスを計算した。

Figure 11 は、エミッタンス測定の結果である。測定された規格化エミッタンスは、Horizontal 方向で、 134.3 ± 1.1 mm mrad、Vertical 方向で 58.6 ± 1.4 mm mrad となった。シミュレーションにより予想した規格化エミッタンスは 50 mm mrad 程度であり、Vertical 方向の測定値は、これと同程度となっているが、Horizontal 方向は 3 倍くらいになっている。電子銃出口では、Horizontal 方向のビームサイズがシミュレーションより大きく楕円になっており、それが原因の一つと思われる。この測定はビームエネルギー 21.2 MeV、バンチ電荷 2.9 pC、1428 バンチの電子ビームで行った。

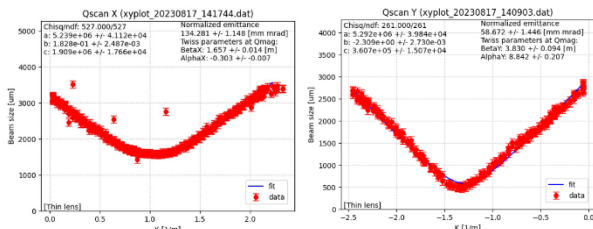


Figure 11: Results of the Q-scan.

4. ビーム利用

4.1 リヒテンベルク像の製作

教育加速器には照射モードがあり、10 MeV の電子ビームを試料に照射することができる。この照射のテストとして、リヒテンベルク像の製作を行った。

10 MeV、80 nA の電子ビームを 5 cm 角のアクリルキューブに 5 分間照射して製作したリヒテンベルク像の写真が Fig. 12 となる。キューブに電子ビーム照射後、アースに接続した杭を打ち込むと放電が起これ、このようなリヒテンベルク模様ができる。

10 MeV の電子ビームをアクリルに入射した場合、電磁シャワーは約 4 cm まで起きるとシミュレーションで予想されており、実際に製作したリヒテンベルク模様もおおよそ 4 cm の深さになっている。

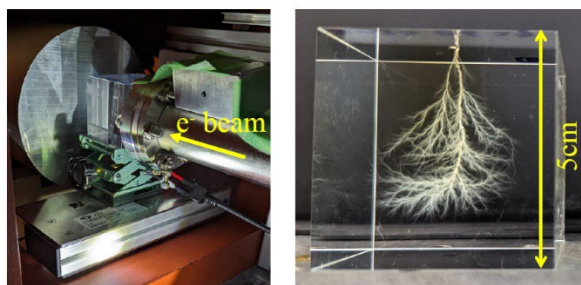


Figure 12: Lichtenberg figure.

4.2 総研大の授業やセミナーでの利用

2016 年より、教育加速器では、初心者向けに加速器の知識を前提としない加速器セミナー(連続 5 日間)を行っている[5]。ここでは、加速器の基礎についての講義、電子銃のピアス式設計法のシミュレーションや、S-band の 6 セル基準空洞についてシミュレーションと実物の空

洞の RF 測定を行い、分散カーブの比較をするなどを行ってきた。加速器建設時は、装置を見せて説明する見学のみだったが、2022 年 9 月に施設検査に合格してからは、これらに加えて、電子ビームを使った実習を行うことが可能になった。

2023 年の 3 月と 7 月に行ったセミナーでは、教育加速器の使ったビーム実習を行い、実際に受講生に加速器の運転を体験してもらっている。なお、放射線管理区域で電子ビームを扱うため、受講生には放射線従事者資格が必須となっている。セミナーではこの資格の取得に関しての支援も行っている。

現在、ビーム実習はセミナー最終日の半日を使って行っているが、実際にやってみると全員にビーム操作をしてみようとする、用意したメニューを全て消化するには時間が足りなかった。次回からは、最終日一日をビーム実習に充てるように変更する予定である。ビーム実習は始めたばかりであり、時間配分や内容は、受講生の反応を見ながら改善していきたいと考えている。

また、ビーム実習は大人数で行うことができないことや、受講者が開催時期に都合を合わせやすくするために、今年度からセミナー回数を 1 回から 3 回に増やしている。

5. まとめと今後

これまで見てきたように加速器としての問題に対して対処が進み、安定してビーム運転できるようになってきた。また、加速器利用したビーム実習が可能となり、総研大の授業や年 3 回の加速器セミナーでのビーム実習に加えて、KEK の加速器科学インターンシップ[6]にも使用される予定であるなど、利用が広がっている。利用増加に伴い、これに対応できるマンパワーが不足してきており、増員を行い対応できる人を増やす準備をしている。

参考文献

- [1] S. Fukuda *et al.*, "Introduction for KEK Education and Training Accelerator(KETA)", J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol.20, No. 2, 2023 (82-89).
- [2] <https://www2.kek.jp/kokusai/iinas-nx/ja/>
- [3] I. Sato *et al.*, "Design Report on PF Injector Linac Upgrade for KEKB", KEK Report 95-18, March 1996 A.
- [4] M. Fukuda *et al.*, "Beam Commissioning in the KEK Education and Training Accelerator(KETA)", Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, October 18 - 21, 2022, Online(Kyushu University), Japan, pp. 872-876.
- [5] <https://conference-indico.kek.jp/event/232/>
- [6] <https://www2.kek.jp/uskek/acc-internship/index.html>