

教育加速器(KETA)におけるビームコミッショニング BEAM COMMISSIONING IN THE KEK EDUCATION AND TRAINING ACCELERATOR(KETA)

福田将史^{#,A)}, 森川祐^{A)}, 濁川和幸^{A)}, 竹内保直^{A)}, 肥後壽泰^{A)}, 福田茂樹^{A)}
Masafumi Fukuda^{#,A)}, Yu Morikawa^{A)}, Kazuyuki Nigorikawa^{A)}, Yasunao Takeuchi^{A)},
Toshiyasu Higo^{A)}, Shigeki Fukuda^{A)}

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

Abstract

The KEK education and training accelerator(KETA) at KEK is a small electron linear accelerator aimed at developing human resources who can contribute to accelerator science. We are planning to provide accelerator practicing for graduate students such as SOKENDAI, university engineers and company people involved in accelerators, and young researchers. 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. The beam commissioning began in this March and the beam tuning have continued to pass the factory inspection. After beam commissioning, an electron beam of 22 MeV energy and 50 nA current was successfully transported to the main dump. This accelerator passed the inspection in this September. We will report the results of this beam commissioning.

1. 教育加速器について

現在、高エネルギー加速器研究機構(KEK)のERL開発棟内に教育的利用を目的とした教育加速器を建設した[1]。この加速器は、小型の電子加速器であり、この建設は、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。今年度からは加速器科学国際育成事業(IINAS-NX)にて継続されている。

この加速器では、加速器科学に貢献できる人材の育成を目的としている。授業やセミナーにおいて、この加速器を使った実習を行い、実際の加速器の運転を体験してもらう。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の加速器セミナーでの利用を予定している。

一方、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。放射化をさせない低いエネルギー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。

この教育加速器の運転モードは、主ダンプモード、副ダンプモード、照射モードの3つである。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、平均電流100 nA運転時に、パルス幅1 μs、パルス内ピーク電流10 mA、パルス繰り返し10 ppsで運転している。

今年9月に施設検査を受けて合格したので、現在は授業などへの利用運転が可能となっている。この施設検

査に向けて、原子力規制庁による変更許可申請の承認が下りた今年3月下旬から試運転を行っており、本稿では、この試運転時のビームコミッショニングについて報告する。

2. ビームライン

教育加速器は、小型の線形電子加速器で、その全体図は、Fig. 1のようになっており、全体の大きさは、およそ10 m × 10 mである。その中に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。

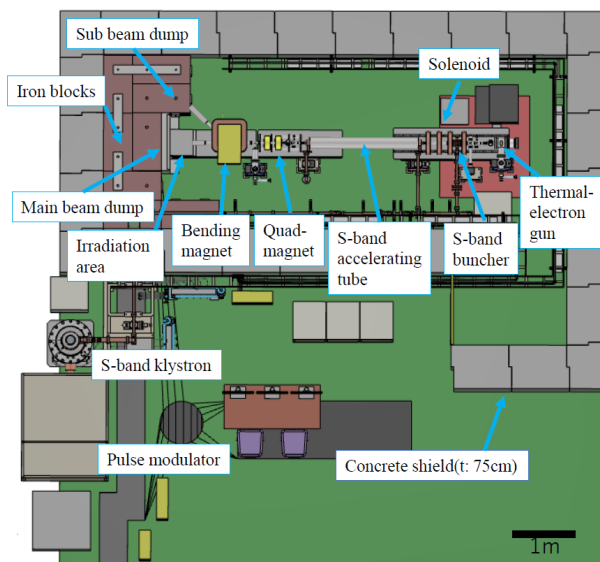


Figure 1: Beam line layout of the KETA.

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

[#] mfukuda@post.kek.jp

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。

熱電子銃では、Ba を含侵させた グリッド付き BI カソード (NJRC: NJK2221A) を用いている。カソード直径は 8 mm ϕ であり 最大引き出し電圧は 50 kV となっている。Figure 2 にカソード部と全体の写真を示す。左がカソード部で中央にカソード表面が見える。カソードはグリッド付きで、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。これが右写真の碍子の中に設置されている。電子銃部分のビームシミュレーションは DGUN コード[2]を用い、それで電極の形状設計とビームサイズを決めた。

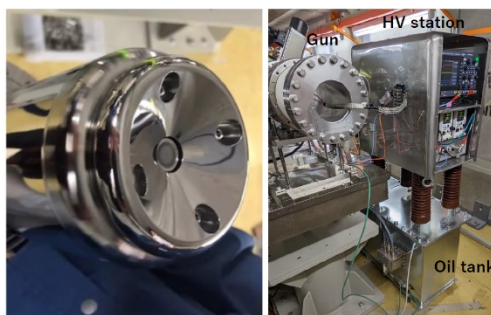


Figure 2: Pictures of the cathode part (Left) and the thermionic electron gun (Right).

隣には、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載っている。ここにグリッドバイアス、ヒーター、グリッドパルスの電源、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されている。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。図からもわかるように高圧ステーションに光通信で行い、RS232C 等を用い制御卓から PC で制御している。ここにはオシロスコープも配置され高圧化で動く信号もモニタしている。

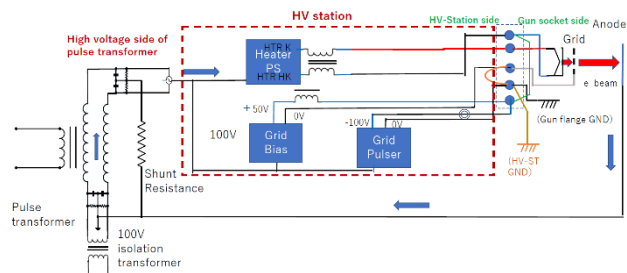


Figure 3: Circuit around electron gun.

熱電子銃から出てくる連続的な電子ビームを高周波で加速できるようにするため、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。入力 RF パワー 0.7 MW の時、1.7 MeV

バンチビームが生成できる。また、小型ヒートシンクを上下に取り付け 30 度の冷却水で温調しており、この温度で $\pi/2$ モードが 2856 MHz の共振周波数になるようにチューニングしている。このバンチャーは KEK の夏井拓也氏により製作された。

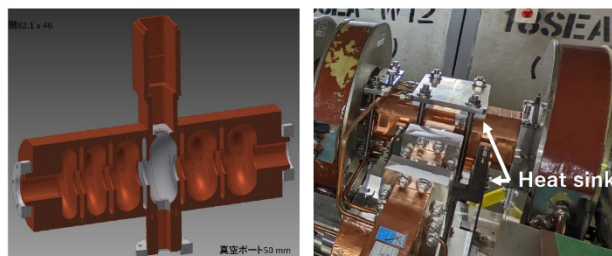


Figure 4: The cross section and the picture of the S-band SW buncher.

バンチ化した電子ビームは、周波数 2856 MHz、 $2/3 \pi$ モードの 2 m 準定電界進行波型加速管 [3] で最大 25 MeV まで加速する。こちらも冷却水温は 30 度である。25 MeV 運転で、12.8 MW の RF パルスを入力する。

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、ダンプのアルミ合金ブロックは電氣的に浮かせてあり、ファラデーカップとしてダンプに来たビーム電流を測定できるようにしている。主ビームダンプの直前の照射部は鉛 5 cm で囲われており、照射実験時はここに試料を設置する。

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 m、ボア径 35 mm Φ の四極電磁石を 2 台設置している。その他にビーム軌道を補正するステアリング電磁石を電子銃下流、バンチャー下流、加速管上流に設置している。

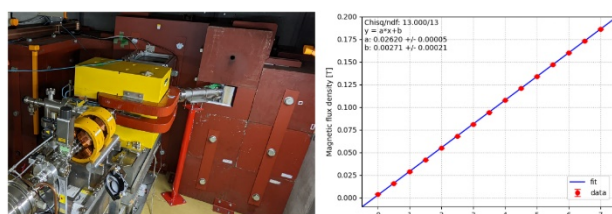


Figure 5: The picture and the result of the magnetic field measurement of the bending magnet.

エネルギー測定のため、下流に 45 度偏向電磁石を設けている。ギャップは 38 mm、磁極長はビーム軸方向、ビーム軸垂直方向とも有効長で 394 mm となっている。45 度にビームを曲げた時の磁場からビームの運動量 P は計算でき、 $P [\text{GeV}/c] = 0.3B \rho = 0.3 * B [\text{T}] * 0.5572 [\text{m}]$ となる。例えば、25 MeV の時の磁場は $B = 0.153 \text{ T}$ となる。磁場測定の結果は Fig. 5 になり、実際には流している電流量から磁場を計算し、エネルギーを算出している。

偏向電磁石には残留磁場が約 30 Gauss あり、補助コイルに 1.6 A 流すことで、これをキャンセルしている。この残留磁場があると、電子ビームが主ダンプに行くまでに約 1 cm ずれる計算になる。実際に残留磁場がある状態で電子ビームを通す場合、加速管出口で 1 cm ずらさないと主ダンプまでの間でビームロスが起きていた。

ビームモニタとしては、ビーム電流をモニタする Current Transformer(CT)、および、ビーム位置やサイズを計測するアルミナ蛍光板を用いたスクリーンモニタ(SCR)を電子銃下流と加速管下流の 2 か所にそれぞれ設けた。また、ビームダンプのブロックを電氣的に浮かせて 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 6 にそれらの配置を示す。

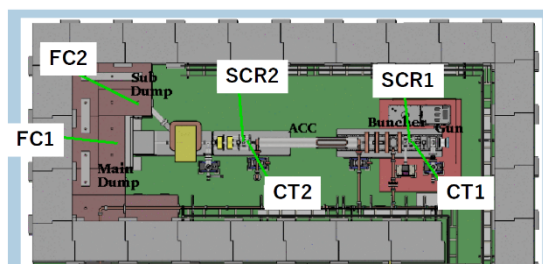


Figure 6: Placement of beam monitors.

3. RF システム

教育加速器では、1 台の S-band 2586 MHz のクライストロン(三菱電機 PV-3030A2)から出力した 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。Figure 7 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。

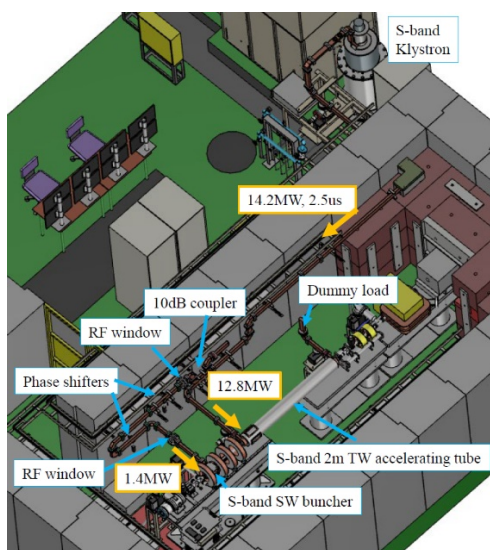


Figure 7: RF system.

バンチャーへと向かう立体回路には、移相器が 2 台ある。この移相器は大気中で使用するため、その両側には真空との区切りのため、高周波窓がある。一方、進行波型加速管へ入力した RF パルスは、加速管を通過して下流側から出力され、最後はダミーロードへダンプする。バン

チャーからの反射した RF を吸収するため、10 dB 分配器の上流側のクライストロンとは接続していないポートにもダミーロードがある。

バンチャーと加速管の相対的な RF 位相を調整するため設置した 2 台の S-band 移相器は、Kazakov 氏によって考案されたペイン型移相器[4]をベースにしたもので、挿入物を板から丸棒に改良されたものである。教育加速器で使用するため S-band 用に丸棒の形状などを最適化したもので、KEK 松本利広氏により、設計、製作された。

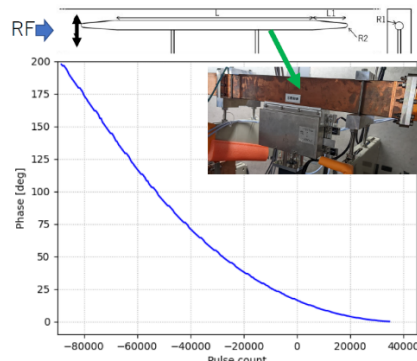


Figure 8: The structure of the fin in the phase shifter and the phase shift as a function of an insertion position of an Aluminum rod.

移相器の断面は Fig. 8 上のようにになっている。H 面に立てられた 2 本の棒で支えられたアルミの丸棒が導波管内部に入っており、外部のモーター丸棒の挿入量を変えて RF 位相をシフトさせる。製作したものは $L = 350$ mm, $L1 = 58$ mm, $R1 = 8.2$ mm, $R2 = 4.0$ mm のものになる。製作後にネットワークアナライザーを用いて測定した挿入量と位相の関係が Fig. 8 下で、移相量は 180 deg 以上となっている。2 台導入することで 360 deg 位相を調整できるようにしている。

また、クライストロン出力や、バンチャーおよび加速管への入力パワーを確認するために、方向性結合器付きの導波管があり、ピックアップされた RF 電力をパワーメーターや検波器で測定し、それぞれの RF 電力やパルス波形をモニタしている。RF 電力分配系のもう一つの特徴としては、真空用導波管角フランジにオス-メスの違いが無い ADESY フランジを採用したことである。

4. ビームコミッショニング

4.1 ビームコミッショニングの目標

ビーム調整は、施設検査において最大定格の 20%以上のビーム出力を確保する必要があるため、ビーム輸送調整を中心に行った。まず、熱電子銃のエミッション調整、その後、バンチャーや加速管を通して主ダンプまでビームを通すビーム輸送調整を行った。主にビーム出力の一番高い主ダンプモードで調整を行い、その後エネルギー測定用の副ダンプモード、および照射試験用のエネルギーの低い照射モードについてもビーム輸送調整を行った。

4.2 熱電子銃のエミッション調整

熱電子銃のエミッション調整として、ヒーター電流、グ

リッドバイアス電圧、グリッドパルスの調整を行った。また、チャージアップによる影響に対処するため、ソレノイド磁場による電子ビームのサイズ補正も行った。

電子銃に印加する引き出し電圧は 48 kV で、高圧電源側から 4 kV、4 μ s のパルスを出し、昇圧トランスにより 12 倍に電圧を引き上げている。昇圧後の高電圧パルスのフラットトップの幅は約 2 μ s となっている。

熱電子銃カソード(NJK2221)の定格では、ヒーター電流 1.6 A、ヒーター電圧 6.7 V で抵抗は 4.2 Ω となっている。新品なので活性化のため定格より少し高めめの 1.7 A まで電流を上げてテストした。その時のヒーター電圧は 9.2 V で、抵抗は 5.4 Ω と少し高めになっている。実際の運転ではヒーター電流 1.15 A で電子ビームを出している。この電流値は、運転時の引き出し電圧、グリッドバイアスの条件で、ヒーター電流で温度を上げた時のビーム電流の変化を測定し、ビーム電流が一定になる始まりのところとして決定した。その測定結果を Fig. 9 に載せる。3 種類のグリッドパルスの波高で電流量を測定している。

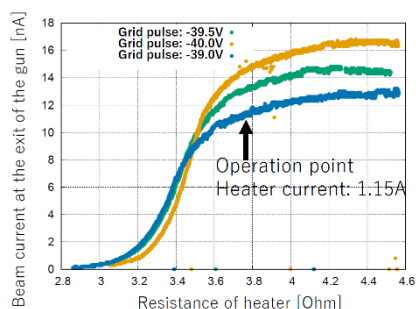


Figure 9: Emission current versus resistance of a heater.

高電圧パルス印加時にカソードから出る電子ビームを抑制するためのバイアス電圧は、-35.0 V に設定している。この電子銃では 48 kV の高電圧パルスがかかっても、ほぼビームは出なかったが、グリッドには、Fig. 10 のように高電圧パルス由来と推測されるノイズがビームを引き出す負側の電圧としてかかっていた。そのため、このノイズによるビーム放出を抑制できる電圧に設定している。

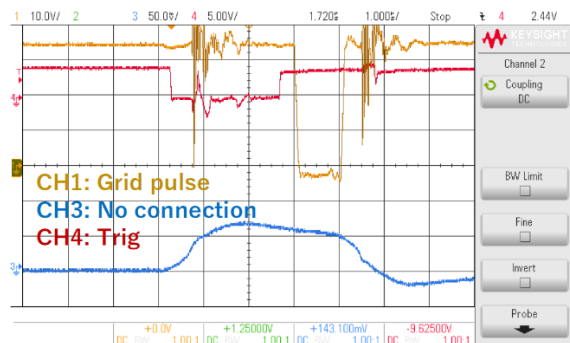


Figure 10: Grid pulse and noise signals.

電子ビームを出すためのグリッドパルスの波高は -39.5 V で、典型的なパルス幅は 1 μ s である(Fig. 10)。グリッドパルスの前後に、高電圧パルスの立ち上がり立ち下りのタイミングで、-30 V 以上のノイズが乗っており、バイアス電圧+35 V により、そこでのビーム放出を抑制している。

電子銃出口にスクリーンモニタ SCR1 があり、そこでの電子ビームサイズは最初 10 mm Φ 程度とシミュレーションにより予想された 8 mm Φ に近いサイズだったが、その後ビームサイズは縦長に増大し、さらに右下が欠けるようになってしまった(Fig. 11 左)。SCR1 のすぐ上流にある CT のセラミック部のチャージアップによるものと推測している。チャージアップは SCR1 のアルミナ蛍光板でも起きており、電子ビームを見ていると、たまに一部が明るく光り、その際に真空も跳ねているため、帯電後放電していると思われる。

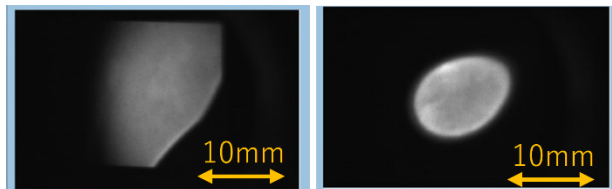


Figure 11: Beam profiles at the exit of the gun without solenoid(left) and with solenoid(right).

このビームサイズ増大の影響でバンチャーや加速管でのビームロスが大きくなるため、下流へのビーム輸送効率が上がらなかった。そこで、電子銃出口にソレノイドコイルを追加し、これで収束し、元々のビームサイズに近づけた(Fig. 11 右)ことでビーム輸送効率を改善した。

現在、このチャージアップ対策として、セラミック部に電子ビームが衝突するのを防ぐための SUS パイプ、および帯電防止のためアルミナ蛍光板を覆う SUS メッシュを導入する準備をしている。

4.3 ビーム輸送調整

熱電子銃でのエミッション調整後は、主ダンプまでのビーム輸送調整のため、RF パルスとビームのタイミング調整、バンチャーと加速管の RF の相対位相調整、ソレノイド磁場によるビームサイズ調整、ステアリング電磁石によるビーム軌道調整を行った。

ビーム加速のための RF パルスと電子ビームのタイミングは、それぞれのトリガー信号を使って事前に合わせておき、ビームがある程度通ったところで、改めて RF のパルス幅、および、RF とビームのタイミングを再調整した。RF パルス幅は、フリリングタイムの長いバンチャーにおいて最大の電界が得られる幅である 2.5 μ s にしている。バンチャーでの電界が低いとバンチングが不十分になり、下流への輸送効率が落ちてしまうため、一番電界が高い場所に電子ビームが来るように合わせた。

ビーム輸送に関して、最初に加速管を通す調整を行った。バンチャーでバンチ化した電子が加速管で加速位相に乗らないと加速されず加速管を通過できないため、加速管出口のスクリーンモニタ SCR2 で電子ビームが見えるように RF 位相を調整した。加速されれば、加速管の方向にビームが進むので、入口の位置が合っていれば、角度のずれ少々あっても、ビームはある程度通ってくるため、位相調整を先に行った。

電子ビームが加速管を通過してきたところで、RF 位相のスキャンを行い、加速管出口での電流が最大となる位相に合わせて。Figure 12 右がその位相スキャン結果の一例であり、左はシミュレーションの結果である。実際には、

この後のエネルギー測定でエネルギーが最大の位相、つまりオンクレスト加速の場所に微調整している。事前のシミュレーションでも、オンクレスト加速の位相でビーム電流は最大となっている。

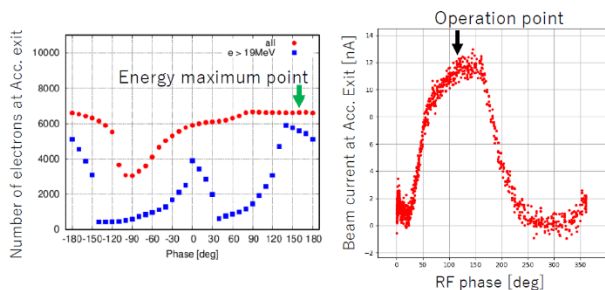


Figure 12: Simulation(left) and the experimental result(right) of phase scan.

位相調整後、ソレノイドやステアリング電磁石でビームサイズや位置を調整して、加速管を通ってくるビーム電流が増えるように調整を繰り返した。

Figure 13 が、主ダンプモードにおいて、ビームを通した時のカレントの時間変化のグラフで、CT1 が電子銃出口、CT2が加速管出口、FC1が主ダンプでのビーム電流である。CT1 からCT2 への透過率は約 50%となっており、シミュレーションの 60%に近い値まで達成できた。加速管後は、ダンプまでロスなく通せている。

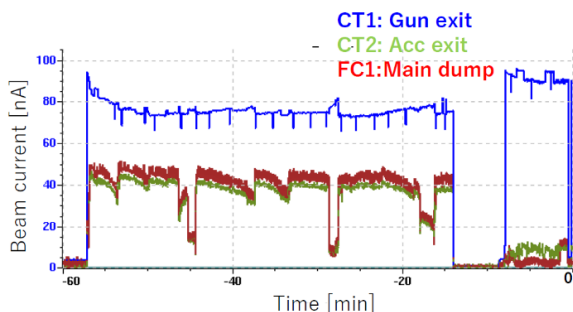


Figure 13: Trends of beam currents.

時々CT2 以降のビーム電流が徐々に下がり、急に回復しているが、これは CT1 のセラミック部がチャージアップによる影響と推測される。帯電していくとその電場によりビーム軌道がずれて行き、放電すると、その電場が解消され軌道も戻っていると思われる。ただ、完全には戻らないので、現在は、適宜ステアリング電磁石による軌道調整して対処している。安定化のためには、先に述べたチャージアップ対策が必要である。

4.4 ビームエネルギー測定

ビーム輸送調整が進んだ後は、偏向電磁石で副ダンプへ電子ビームを曲げる副ダンプモードでエネルギー測定を行った。副ダンプの直前の 60 mm Φ のアルミ窓に受光面 4 mm 角の Photo diode(PD)を設置し、電子ビームが来た時に信号を得られるようにした。あとは偏向電磁石の磁場をスキャンしながらPDの信号強度を測定し、信号がピークの時の磁場から、エネルギーを計算する。

このスキャン結果が、Fig 14 左であり、3 つあるピークの内、中央が PD に電子ビームが当たった時のピークで

ある。両脇のピークは、電子ビームがパイプに衝突してできたシャワーによる信号である。このピーク時の磁場から算出されたエネルギーは 17.0 MeV である。また、オンクレスト加速を前提にして入力RF電力から予想されるエネルギーも 17.3 MeV とほぼ同じ結果が得られ、うまく加速で来ていると推測される。

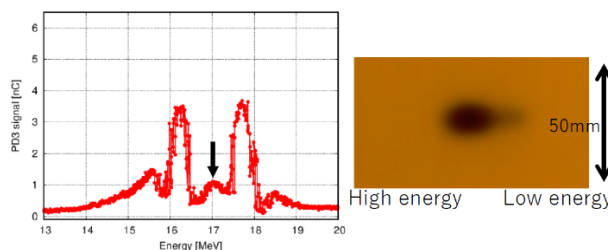


Figure 14: Result of the energy measurement and the beam profile at the sub dump.

さらに、このPDの場所に GAFCHROMIC film を入れてビームプロファイルを測定した結果が、Fig. 14 右である。右側が低エネルギー側で、多少エネルギーテイルはあるが、ビームはきれいにまとまっているのが分かる。副ダンプでの Dispersion は 0.69 m なので、ビームサイズから、エネルギー広がり率は 1.7%(1 σ)となる。

5. 今後

利用運転が可能となったので、今後行われる総研大の授業、IINAS-NX による加速器セミナー、KEK インターンシップなどで、教育加速器の電子ビームを使った実習を行う予定である。また、このビームコミッショニングで判明したチャージアップなどの問題に対する対策や実習で測定できるものを増やすため、モニタ系を追加していく予定である。

謝辞

教育加速器の建設にあたり、KEK 入射器グループ、KEK cERL グループ、STF グループ、三菱電機サービスの方々から多くのご協力を頂いております。ここに感謝いたします。特に非常に厳しい教育加速器の予算下で建設したために、高価な装置—クライスロンアセンブリー、モジュレータ、インバータ電源、加速管、Q 磁石と分析磁石などは KEK 入射器グループから使用可能なものを提供していただき感謝いたします。

参考文献

- [1] M. Fukuda *et al.*, "Design and construction of the education-oriented accelerator", Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9 - 12, 2021, QST-Takasaki Online, Japan, pp. 499-503.
- [2] A. Larionov, K. Ouglekov, "DGUN- code for simulation of intensive axial-symmetric electron beams", 6th International Computational Accelerator Physics Conference, TU Darmstadt, Germany, 2000, p 172.
- [3] I. Sato *et al.*, "Design Report on PF Injector Linac Upgrade for KEKB", KEK Report 95-18, March 1996 A.
- [4] S. Kazakov, *et al.*, "L-BAND WAVEGUIDE ELEMENTS FOR SRF APPLICATION", Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009, JAEA, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, Japan.