

教育加速器の設計と建設

DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE EDUCATION-ORIENTED ACCELERATOR

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 education-oriented accelerator under construction 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 overseas researchers. In this accelerator, the electrons emitted by a thermal-electron gun are bunched by an S-band standing wave buncher and then accelerated to 25 MeV by a 2 m S-band traveling wave accelerating tube. We will report the accelerator design and the status of the construction.

1. 教育加速器の目的

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ている。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ことを画策している。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、海外の若い研究者を想定している。現在は、総研大の授業や IINAS 教育用小型加速器を用いた加速器セミナーでの利用が予定されている。

一方で、材料照射試験もできるように準備しており、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具体的な試験を検討している。

この加速器は、原子力規制庁へ申請中であり、許可が得られ、さらに規制庁による施設検査に合格した後に、授業などにおいて、加速器実習を行う予定である。

2. ビームライン

Figure 1 に、このビームラインのレイアウトを示す。教育加速器は、小型の線形電子加速器で、熱電子銃で生成した電子ビームを S-band 定在波型バンチャーでバンチングし、さらに 2 m の S-band 進行波型加速管で最大 25 MeV まで加速する。その後は主ダンプへ捨てる。また、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。さらに照射試験時は、エネルギーを 10 MeV まで下げて運転する。照射部は、主ダンプのすぐ上流にある。放射線シールドや RF システムを含めたこの加速器の全体の大きさは約 10 m × 10 m となっている。ビームラインで発生する放射線を遮蔽するために天井も含めて厚さ 75 cm のコンクリートシールドで

覆われており、入口は、ビームラインが直接見えない場所に設けている。

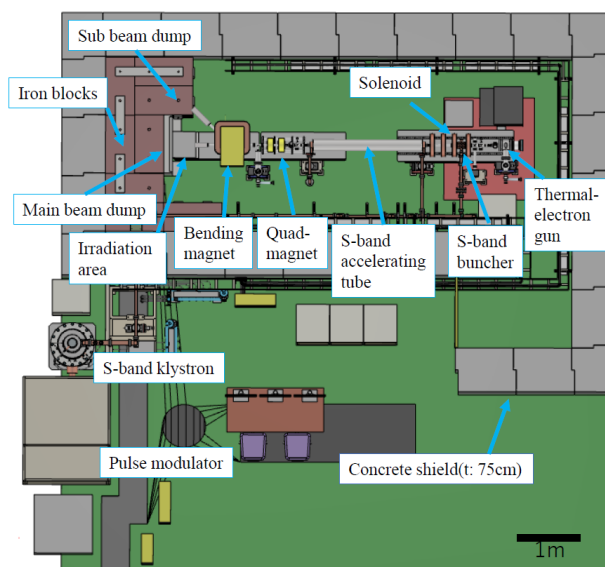


Figure 1: Beam line layout of the education-oriented accelerator.

Table 1: Maximum Energy and Power

	Maximum energy [MeV]	Maximum beam power [MeV·nA]
Main dump mode	25	2500
Sub dump mode	25	25
Irradiation mode	11	1100

教育加速器の最大定格を Table 1 に示す。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 つがある。最大エネルギーは、25 MeV で、照射モードの時だけ、照射材料の放射化を避けるために 11 MeV になっている。また、最大出力は、主ダンプモード、副ダン

[#]mfukuda@post.kek.jp

ブモード、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 で、あとは 100 nA になっている。100 nA での運転では、典型的にはパルス幅 1 μ s、パルス内ピーク電流 10 mA、パルス繰り返し 10 pps を想定している。

電子源は、熱電子銃となる。カソードは、新日本無線製の NJK2221A を用いている。これは多孔質のタングステンベースに BaO・CaO・Al₂O₃ などの Ba 源を含浸させた BI カソードで、仕事関数を下げたため表面に Ir コートを施している。また、カソード径は、直径 8 mm で、有効面積は 0.5 cm² となっている。カソードの劣化を防ぐため、真空度は 1e-6 Pa 以下に保持している。Figure 2 にカソード部と全体の写真を示す。左がカソード部の写真で、中央にカソードをセットしている。これを右図にある碍子の中に設置している。引き出し電圧は 50 kV で、パルス高電圧電源出力 5 kV を電子銃の横の高電圧生成部、オイルタンク内のパルストランスで昇圧して印加する。



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

電子は、熱電子銃から連続的に出てくるため、高周波で加速できるように下流に設けたバンチャーでバンチングする。このバンチャーは、周波数 2856 MHz(S-band)の $\pi/2$ モード定在波型バンチャーで、Fig. 3 に空洞の断面図を載せている。このバンチャーは KEK の夏井拓也氏により製作された。熱電子銃から来た 50 keV の電子は、0.7 MW の RF パワーを入力したとき、バンチング後に 1.7 MeV となる設計になっている。

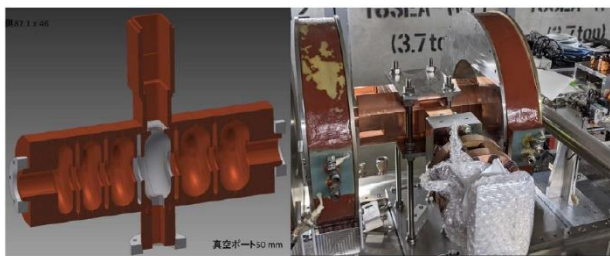


Figure 3: The cross section and the picture of an S-band standing wave buncher.

バンチャーの冷却は、小型のヒートシンクを本体に取り付けて 30 度の水を流して温調する。最終的な共振周波数調整の際に取り付ける予定である。

また、低エネルギーでビームが広がりやすいため、バンチャーの部分にはソレノイドコイルを配置し、ソレノイド磁場で収束しながらビームを輸送する。磁場強度は、

ビーム軸方向で最大 0.07 T である。

バンチングされた電子ビームは、2 m の準定電界進行波型加速管[1]で最大 25 MeV まで加速する。この加速管のパラメーターは、周波数 2856 MHz、2/3 π モード、加速長 1.889 m、ホール径(2a) 24.3 - 20.3 mm となっている。2.5 MeV 運転では、この加速管へ 12.8 MW、1 μ s 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。ダンプ手前で、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、さらに遮蔽用の鉄ブロックが多数配置されている(Fig. 1)。入射ビームパワーは最大 2.5 W と低いため、空冷になっている。

主ビームダンプの直前には照射部がある。この部分は鉛 5cm で囲われており、ここに試料を置いて照射実験ができるようになっている。

ビームライン上には、ビーム制御用に電磁石をいくつか配置している。加速管下流には、磁極長 100 mm、ボア径 35 mm Φ の四極電磁石を 2 台設置している。また、その下流にエネルギーを測定するための 45° 偏向電磁石があり、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 350 mm となっている。磁場強度は 25 MeV の時にエネルギーを測定する場合で 1.55 kG となる。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。

ビームモニタとしては、電流をモニタする Current Transformer(CT)、およびアルミナ蛍光板を用いたスクリーンモニタ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)として電流をモニタする。

3. RF システム

教育加速器では、1 台のクライストロンから出力した RF パワーを 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 4 に、この RF システムのレイアウトを示す。

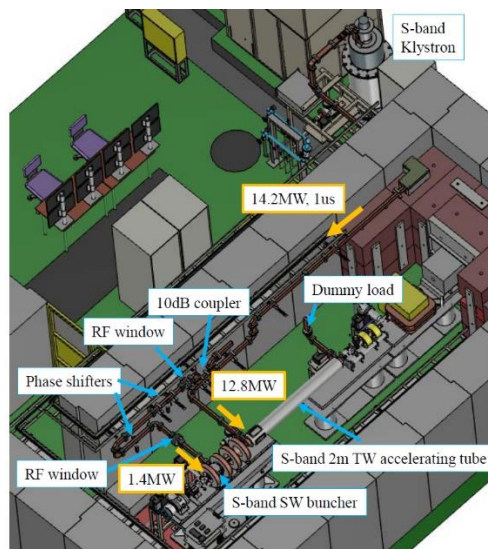


Figure 4: RF system.

クライストロンは、三菱電機製の PV-3030A2 で、周波数 2856 MHz(S-band)、最大パルス幅 4 μ s、最大繰り返し 50 pps となっている。この加速器では、パルス幅 1 μ s、繰り返し 10 pps で使用する。25 MeV 運転時の出力パワーは 14.2 MW となる。

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、International linear collider(ILC)の Power distribution system (PDS)用にコンパクトな移相器が必要ということで開発された L-band の移相器で、現在 KEK の STF で使用されているものが元になっている。これは Kazakov 氏によって考案されたベイン型移相器で、最初は挿入物が板だったものを、のちに丸棒に改良されたものである[2]。教育加速器で導入した S-band 移相器は、KEK 松本利広氏により、設計、製作されたもので、この L-band 移相器を S-band 用に改造し、丸棒の形状を最適化したものである。

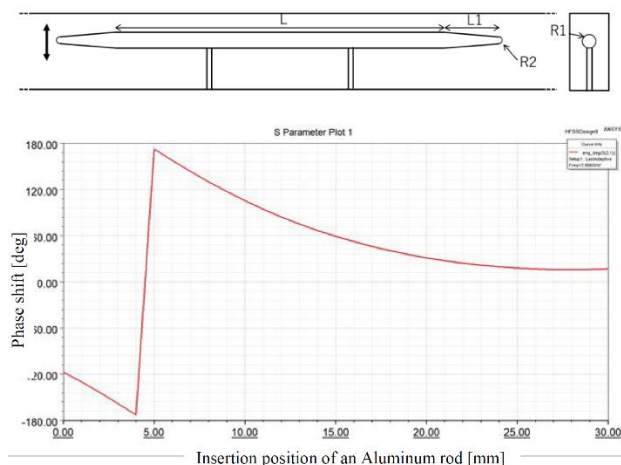


Figure 5: The structure of the Aluminum rod in the phase shifter and the phase shift as a function of an insertion position of the Aluminum rod.

移相器の断面は Fig. 5 の上のようにになっている。アルミの丸棒が導波管内部に入っており、この棒は、H 面に立てられた 2 本の棒で支えられている。この 2 本の棒は、外側でモーターとつながっており、丸棒の挿入量を変えられるようになっていく。挿入量によって RF 位相のシフト量が変わる。設計時に計算された結果が、Fig. 5 の下である。実際に製作したものは L=350 mm, L1=58 mm, R1=8.2 mm, R2=4.0 mm のものになり、移相量は最大約 170 deg となる。よって、2 台導入することで、おおよそ 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パワーをパワーメーターで測定し、それぞれの RF パワーをモニタしている。

4. ビームシミュレーション

運転時のビーム輸送効率、エネルギー、RF 位相などを見積もるため、ビームシミュレーションを行った。電子生成部は DGUN[3]、それ以降は、Geant4[4]を用いて作成したシミュレーターでビームトラッキングを行った。

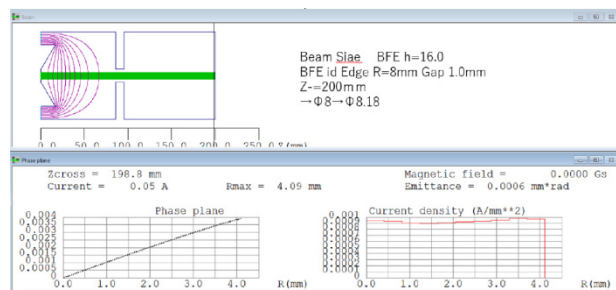


Figure 6: Beam tracking results simulated by DGUN in the thermal-electron gun.

Figure 6 が、DGUN で熱電子銃の部分のシミュレーションを行った結果である。電流値 50 mA、カソードから出るビームサイズは直径 8 mm として計算している。低い電流値なので、空間電荷効果の影響はほとんど受けず、カソードから 200 mm の地点で直径 8.18 mm とほぼ同じサイズで出てきている。右下の電流密度の分布をみると、どの R 位置でもほぼ同じなので、ほぼ平行で、均一な電流密度を持つ円筒のビームが出てくることが分かる。

カソードから 200 mm 以降は、Geant4 でビームトラッキングを行った。入力した電子数は 10,000 個で、Transverse 方向の分布は、Fig. 6 の左下の位相空間分布、Longitudinal 方向の分布は 5 buckets(1.75 ns)のパルス長で均一な分布を持つように、乱数を振って粒子データを生成し、この粒子をトラッキングした。

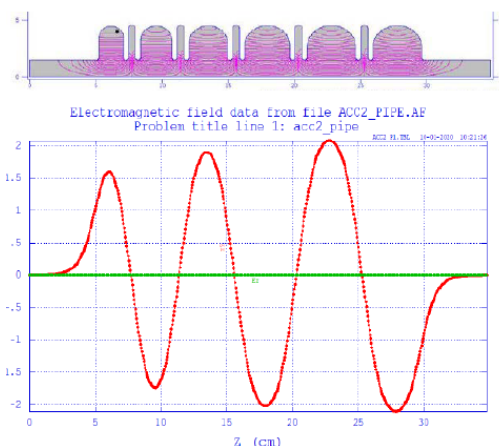


Figure 7: Electric field of the buncher calculated by SUPERFISH.

バンチャーの加速電界は、Fig. 7 にあるように、SUPERFISH[5]を用いて計算した。この E_z , E_r , B_ϕ の分布をシミュレーターへ入力した。また、加速管の加速電界については、進行波の式 $E_z(z,t) = E_0 \sin(kz - \omega t - \phi)$, $k = 2\pi/\lambda$, $\omega = 2\pi c/\lambda$ で計算した E_z のみを使用している。ここで、 E_0 は加速電界で 11.9 MV/m, λ は RF の波長で 104.97 mm, c は光速となっている。

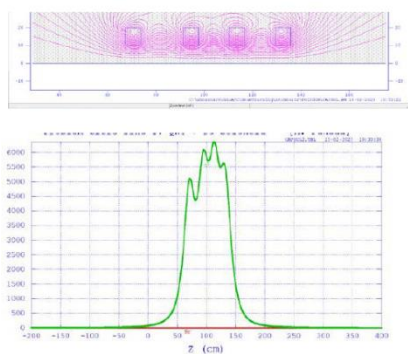


Figure 8: Magnetic field of the solenoid coil calculated by POISSON.

バンチャーを貫いているソレノイド磁場は、Fig. 8 にある POISSON[5]で計算した磁場分布 B_r, B_z を入力している。また、四極電磁石は磁極長の部分だけ $B' = 0.67 \text{ T/m}$ として、 $B_x = -B'y, B_y = -B'x$ の式で計算した磁場を入力し、偏向電磁石は、磁極の部分だけ $B_y = 0.155 \text{ kG}$ があると計算した。

トラッキングしたときの粒子の軌跡の様子が Fig. 9 に示してある。一番左がカソードで、そこから 200 mm の場所からトラッキングしている。赤い線が電子の軌跡で、右に進んでいく。バンチャーからダンプまでほぼサイズが広がらず輸送できているのが分かる。また、一部の電子がカソードの方で戻っているのが分かる。これはバンチャーで逆位相に載ったものがカソードに向かったと思われる。

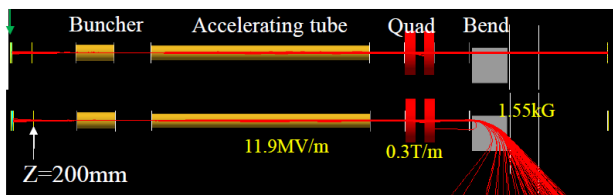


Figure 9: Geometry of the beam line and the beam trajectory calculated by Geant4.

バンチャーと加速管の相対的な RF 位相をスキャンしたときの、加速管出口での電子数を計算した結果が Fig. 10 となる。赤点が加速管出口に来た電子数、青点はそのうち、19 MeV 以上のものである。バンチャーでバンチングされた電子バンチと加速管での RF 位相がうまく合わないと加速できないので、19 MeV 以上の電子が多い方がうまく加速できているということなる。Fig. 11 の上が、位相が 160 deg のときのエネルギーと時間の関係で、この位相だと高エネルギー側に電子が良くまとまっている。バンチングもうまくいってバンチ長も短くなっている。よって、この位相が最適と思われる。この時、電子銃から出た電子のうち約 66% が加速管出口に到達する。途中で落ちたものは数 MeV 以下の低エネルギーの電子か、逆位相に載って上流に向かってしまったものである。Fig. 11 の中央が、160 deg でのエネルギー分布である。エネルギーは 25 MeV で、そこにほとんどの電子がまとまっているのが分かる。ただ、低エネルギー側にずっとテイルを引いている。Fig. 9 の下に偏向電磁石で曲げた時の電子の軌跡が載せてあるが、大きく曲がっている電子が、こ

の低エネルギーテイルに当たる部分になる。実際にはビームパイプを厚くして、低エネルギー側のビームを止める。また、Fig. 11 の下のグラフをみると、加速管出口まで輸送されてきたものは、うまくバンチングされ、まとまっているのが分かる。元々 5 buckets 分をトラッキングして、6 バンチ存在するのは、バンチャー付近の低エネルギー時に位相がスリップして隣のバケツに移る電子もいるためである。

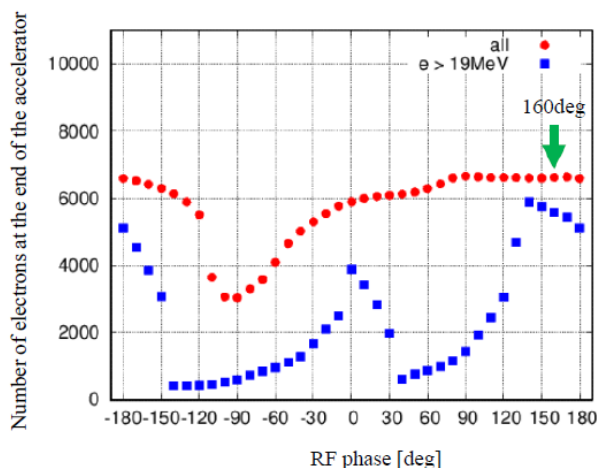


Figure 10: Simulation result of the rf phase scan.

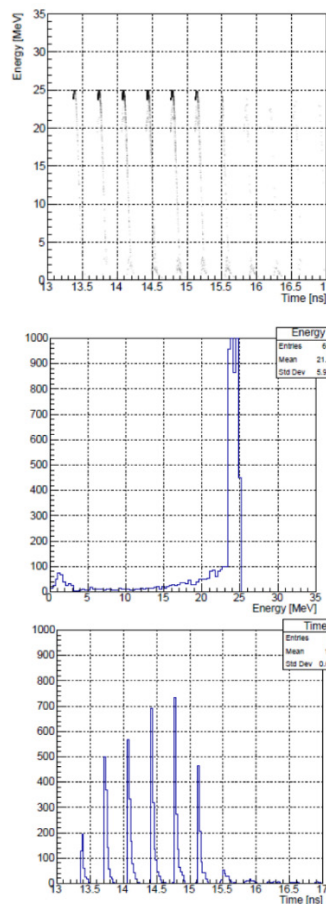


Figure 11: The scatter plot of energy vs time and the energy and the time distribution at the end of the accelerator.

5. 加速管の RF エージング

加速管は KEK 入射器グループより、借用したものである。しばらくの間使用されていなかったため、運転に必要な RF パワー15 MW が入力できるかや、暗電流の量がどのくらいかを確認するため、加速管単体で RF 運転を行った。Figure 12 は、その時の入力 RF パワーの変化の様子である。RF コンディショニングを行っていき、目標の 15 MW を超えて、22 MW まで到達しており、十分なパワーが入ることは確認できた。また暗電流も、22 MW の時で $1 \mu\text{s}$ のパルス当たり 0.2 pC と非常に低く、運転で問題にならないことが確認できている。

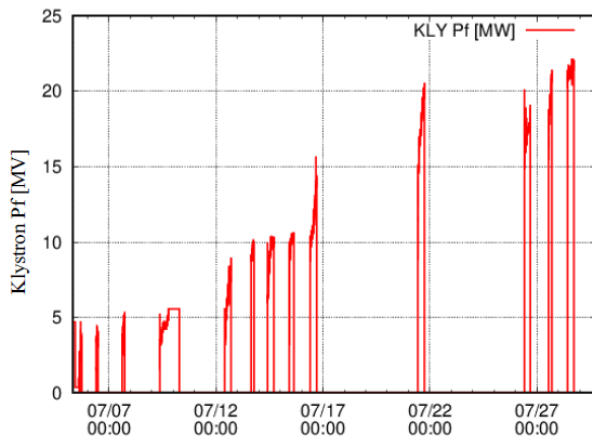


Figure 12: Trend of the klystron output power in the rf commissioning of the accelerating tube.

6. まとめと今後

現在、教育加速器は建設中で、ビーム運転に向けてビームラインや制御関係の構築、ビームシミュレーションでのビーム制御の検討などを行っている。Figure 13 は、現在建設中のビームラインの写真である。大きな加速器コンポーネントは設置されつつある。

今後、建設が完了し、原子力規制庁からの許可が出たら、試運転を開始し、原子力規制庁による施設検査を受けることになる。この検査を通過した後、授業やセミナーなどで学生などを対象とした加速実習を行っていく予定である。

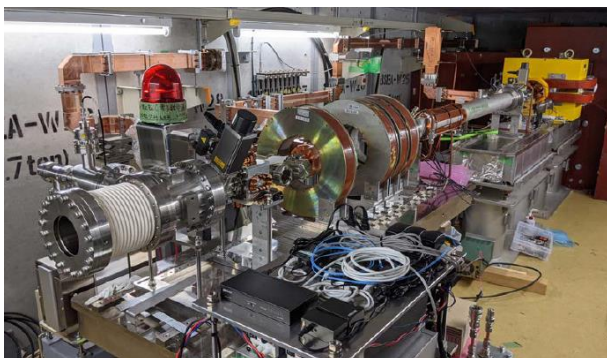


Figure 13: Photo of beamline under construction.

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、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。

参考文献

- [1] I. Sato *et al.*, “Design Report on PF Injector Linac Upgrade for KEKB”, KEK Report 95-18, March 1996 A.
- [2] S. Kazakov *et al.*, “L-BAND WAVEGUIDE ELEMENTS FOR SRF APPLICATION”, Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009, JAEA, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, Japan.
- [3] 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.
- [4] S. Agosinelli *et al.*, “GEANT4 - a simulation toolkit”, Nucl. Instr. Meth. A 506, 250-303 (2003).
- [5] T. Menzel and H.K. Stokes, User’s Guide for the POISSON/SUPERFISH Group of Codes (Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, 1987); https://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml