

コンパクト ERL におけるビーム電流約 1 mA の運転

OPERATIONS WITH 1-mA BEAM CURRENT AT THE COMPACT ERL

坂中章悟^{#, A)}, 芳賀開一^{A)}, 羽島良一^{B)}, 原田健太郎^{A)}, 本田洋介^{A)}, 河田洋^{A)}, 小林幸則^{A)}, 許斐太郎^{A)}, 松村宏^{A)}, 宮島司^{A)}, 中村典雄^{A)}, 西森信行^{C)}, 野上隆史^{A)}, 帯名崇^{A)}, 下ヶ橋秀典^{A)}, 阪井寛志^{A)}, 島田美帆^{A)}, 田中オリガ^{A)}, 高井良太^{A)}, 梅森健成^{A)}, 山本将博^{A)}

Shogo Sakanaka^{#, A)}, Kaiichi Haga^{A)}, Ryoichi Hajima^{B)}, Kentaro Harada^{A)}, Yosuke Honda^{A)}, Hiroshi Kawata^{A)}, Yukinori Kobayashi^{A)}, Taro Konomi^{A)}, Hiroshi Matsumura^{A)}, Tsukasa Miyajima^{A)}, Norio Nakamura^{A)}, Nobuyuki Nishimori^{C)}, Takashi Nogami^{A)}, Takashi Obina^{A)}, Hidenori Sagehashi^{A)}, Hiroshi Sakai^{A)}, Miho Shimada^{A)}, Olga Tanaka^{A)}, Ryota Takai^{A)}, Kensei Umemori^{A)}, Masahiro Yamamoto^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), ^{B)} QST, ^{C)} Tohoku University

Abstract

The compact ERL (cERL) is a superconducting accelerator which is aimed at demonstrating technologies for the future ERL-based light source. Production and recirculation of low emittance (< 1 mm-mrad) and high-average-current (≥ 10 mA) beams are primarily important. In March of 2016, we successfully transported the beam having an average current of approximately 1 mA to the beam dump. Due to careful accelerator tuning and the use of beam collimators, the beam losses were reduced to very small fractions of less than 0.01%, except for the collimator locations.

1. はじめに

コンパクト ERL (cERL)は、ERL 放射光源に必要な技術を実証するための超伝導加速器である[1]。cERLでは、低エミッタンス(規格化エミッタンス 1 mm-mrad 以下)かつ大電流(平均電流 10 mA 以上)のビームを生成・加速・周回させた後、エネルギーを回収してダンプまで導くことが目標である。電子ビームは、バンチ繰り返し周波数 1.3 GHz で連続的(CW)に出力される他、ビーム調整用にバーストビームの出力も可能である。

cERL は地上に放射線遮蔽体(cERL 加速器室)を建設し、その中に設置されている。大電流のビームを周回させる際には、加速器室外での放射線量率を十分低くする必要があり、非常に低いビーム損失率が要求される。周回部では、概ね 0.01%以下のビーム損失率が必要である。

大電流ビームの周回時に大きなビーム損失や加速器機器の異常が検出された場合には、Machine Mode System (MMS) がフォトカソード電子銃へのレーザー光を止め、ビームを高速に停止する。この為のロジックはこれまでの運転経験をもとに改良が進められ、信頼性のあるシステムが構築されている。

cERL では、2013 年の入射部コミッショニングも含めて 4 回の放射線変更申請を行い、ビーム電流を段階的に増強してきた。2015 年秋には、最大ビーム電流を 1 mA (最大運動エネルギー 26 MeV)に変更するための申請[2]を行った。並行して遮蔽を一部強化し、加速器の幾つかの改良も行った。

2016 年 2 月から変更申請後の調整運転を開始し、3 月 8 日に施設検査を受けて合格した。その後、ビーム電流を最大の 1 mA まで上げる調整を進め、ビームコリメータを使用することで、十分低いビーム損失を実現することが出来た[3]。典型的な運転条件を Table 1 に示す。運

転モードとして、まずバンチ繰り返し周波数 1.3 GHz、バンチ当たりの電荷 0.7 pC の連続(CW)運転を確立した。次に、バンチ繰り返し 162.5 MHz、バンチ電荷 5.5 pC でも良好な運転条件を確立した。

本稿では、cERL のビーム電流増強の準備、大電流運転時のビーム調整方法、および大電流運転の経験について報告する。またビーム電流 10 mA を実現する見通しについても述べる。

Table 1: Typical Operational Parameters of cERL

Beam energy	19.9 MeV
Injection energy	2.9 MeV
Bunch repetition rate (usual)	1.3 GHz
(for laser-Compton scattering)	162.5 MHz
Maximum average beam current	1 mA

2. ビーム電流増強の準備

2.1 レーザー導入ミラーの交換とセラミックへの覆い

2015 年 6 月までの大電流運転(最大 80 μ A)では、ビーム位置が数十分~1時間の間にゆっくりと変動する現象が観測された。また、大電流運転の後でビームプロファイルが非対称にゆがむ現象もあった。これらの原因として、フォトカソード電子銃にレーザー光を導入するための鏡(ガラス基材にアルミ蒸着を施したもの)が帯電し、その電場による影響が考えられた。2015 年 9 月にレーザー導入鏡を金属製に交換したところ、それ以降上記の現象は見られなくなった。

入射器空洞を通常(3.2 MV/m)より高い加速勾配(7 MV/m)で運転中に、電子銃直後のファラデーカップを使用すると、真空圧力のスパイク的な上昇が周期的に見られた。その原因として、ファラデーカップの絶縁用セラ

[#] shogo.sakanaka@kek.jp

ミックが入射器空洞からの暗電流電子に照射され、帯電して放電する現象が疑われた。2015年9月にセラミックを金属製のカバーで覆った後、この現象は見られなくなった。また2014年6月のCW運転(ビーム電流1~4 μA)では、ダンプラインでバースト的な圧力上昇が2回発生した。ビームダンプを絶縁するためのセラミックダクト(内面に約10 nm厚のTiNを蒸着)の内面を上流から見えないように銅製の筒で覆う改良を施した後は、同様の現象はほぼ起きていない。これらの経験より、暗電流や損失ビームが照射される可能性のある場所には、セラミックを剥き出しで設置してはならない事が明確になった。

2.2 ラスタリングシステムの稼働

cERLのビームダンプは最大40 kWまでのビームパワーを受けられるが、その際にビームを直径40 mm程度まで広げる必要がある。このため、ダンプラインにビーム位置を交流で走査させるシステム[4]を稼働させた。

2.3 ビームロスモニターの増設

CsIシンチレータと光電子増倍管から成る高速ビームロスモニターを増設し、合計27台とした。これらにより、CWビームおよびバーストビームに対して、ビーム損失を観測できる。高速ロスモニターのうち16台をインターロック用に使い、約10 μs 以下の時間遅れでビームを停止する。アーク部にはファイバーロスモニターも併設した。また、加速器室内に半導体式放射線モニター(日立アロカメディカルMAR-782)を12台設置しており、主に壁際での放射線量率の測定に使い、うち10台をインターロック(高速ロスモニターのバックアップ、応答時間約1秒)に用いている。

2.4 放射線の変更申請と追加遮蔽

以前の放射線申請の下で、最大電流80 μA 、バンチ繰り返し162.5 MHz、バンチ当たりの電荷0.5 pCでの運転条件を確立し、ビーム損失の場所と損失量を放射線測定により推定した[5]。これらを元に小規模な遮蔽強化を行う設計で、電流増強後の線量率の事前評価を行い、最大電流を1 mAに増強する変更申請を2015年秋に行った。2016年1月19日に申請が承認された。

変更申請書[2]に記載された主な追加遮蔽は、合流部コリメータと北直線部コリメータの遮蔽強化、南直線部側にある空調用貫通孔の側方遮蔽強化である。cERLの運転再開前にこれらを設置し、最大出力制限値を変更した。KEK放射線取扱主任者の検査を受け合格後、2016年2月15日からビーム運転を再開した。

3. 大電流運転時のビーム調整

3.1 バーストビームでの調整

大電流のCW運転を行う前に、低電流のバースト(パルス列)ビームを用いて加速器の調整を行う。マクロパルスの幅と繰り返しは0.5~1 μs 、5 Hzとし、バンチの繰り返し周波数(1.3 GHzまたは162.5 MHz)とバンチ当たりの電荷は目標の大電流運転時と同じとする。

バーストモードの運転では、まずスクリーンモニター、ビーム位置モニター等を使用してビームの軌道およびオペティックスの調整を行う。その後、ロスモニターを使用し

て、周回部でのビーム損失が小さくなるようにコリメータ等を調整する。十分低いビーム損失が達成された後、CW運転モードに切り替える。CW運転時には、ビーム強度をゼロから目標値まで徐々に上げる。この過程で、ロスモニターと加速器室内放射線モニター(MAR-782)を用いてビーム損失が小さい事を確認する。一旦大電流まで到達した後では、ビーム電流を瞬時に最大値まで上げても問題が無かった。

3.2 ビーム光学系の調整[6]

電子銃から主空洞手前までの区間(ビームエネルギー2.9 MeV)では、目標バンチ電荷に対する良いビーム輸送条件をGPTコードによるシミュレーションで見つけておき、その条件に近づけるように入射部の設定を調整する。ビーム軌道は、ソレノイドやバンチャー空洞、入射器空洞等の各機器の中心に通すことを原則とする。機器の設置誤差があるため、エミッタンス保存上重要な機器の中心に通すことを優先する。

2016年の運転では、入射部でビームの軸対称性が良くなるように入射部の調整を行った。2台の補正電磁石(ソレノイドの中に組み込み)の磁場が強いと磁場一様性が悪いことがわかり、これらの磁場を弱めることでビームの軸対称性が改善できた。そのため、ソレノイドの中心通しには拘らないことにした。

3台ある2セル入射器空洞については、ビームを垂直方向に少し角度をつけて入射すると、ビームハロー(またはテール)を削り易い事がわかった。現在ビームロスの主要原因となるのは、カソードの時間応答によりバンチの後方に発生するテールだと推測しており[7]、上記の方法では加速用高周波によりテールが横方向にキックされると考えられる。現時点での大電流運転では、この角度を付ける方法を用いているが、ビームの極低エミッタンスを得るためには、ビームテールを電子銃自体で減らすことで、この方法をやめるのが望ましい。

周回部では、ビーム光学関数を設計値に近づけるよう調整した。その為の手法として、周回部に7箇所のマッチング点(Qマグネット)を設定し、そのQマグネットとスクリーンモニターを用いたwaist scanの応答を測定する。応答を設計値に近づけるように、上流4台のQの強さを調整した。特に、主空洞直前の点(MP2A)でマッチングを取ることで、入射ビームと周回部とのマッチングが改善された。これらにより周回部の輸送条件が改善された。また主空洞の加速電圧を変えて分散関数を測定し、補正した。直線部での分散をゼロに近づける補正は、ビーム損失を減らすのに有効であった。

良い輸送条件を見つけた後の再現性も重要である。cERL電磁石の磁場は非常に弱く、残留磁場やヒステリシスの影響が大きい。そのため、調整前には電磁石の標準化(standardization)を行う事を徹底した。また良い輸送条件を見つけた後にも標準化を行い、輸送条件が再現できることを確認した。

ビーム軌道については、主要なQマグネットの強さを調整し、下流でのビーム位置変動を最小にする方法(beam-based alignment)でビームをQマグネットの中心に通した。この方法で確立した軌道を基準軌道とし、通常の運転ではビーム位置モニターで測定した軌道を基準軌道に近づけるように補正する。

3.3 ダンプラインにおけるビームのラストリング

ラストリングの振幅が大きいほどダンプラインでのビーム損失が上昇する傾向が観測された。現時点ではビームダンプの熱負荷(最大 2.4 kW)は設計値 40 kW に対して余裕があるため、ビーム損失との兼ね合いで、ダンプ直前での振幅を全幅約 10 mm(丸形)、周波数を 9.99 Hz とした。

3.4 ビームコリメータの調整

ビームハローを削るために 5 台のコリメータを設置している。コリメータでは、水冷した無酸素銅製のロッド(直径 14 mm)を上下左右から挿入する(Figure 1 参照)。コリメータのダクトを厚さ 20 mm の鉛ジャケットで覆い、その外側に場所に応じて鉛壁を立てて遮蔽した[2]。このように、局所遮蔽された場所でビームハローを落とすことにより、加速器室外での線量率を抑えることが出来る。

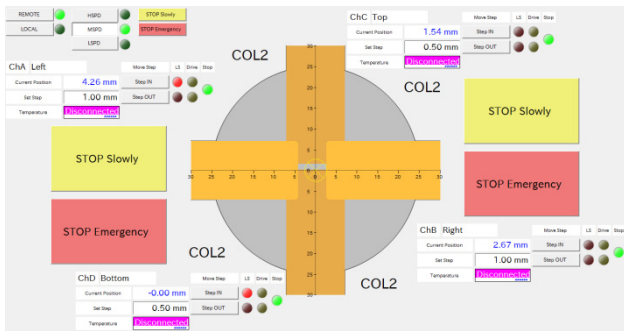


Figure 1: Control panel of beam collimator, COL2.

コリメータの設置場所を Table 2 と Figure 5 に示す。低エネルギー部(2.9 MeV)に設置されたコリメータ(COL1, COL2)では放射線レベルをあまり上げないでハローを落とすことができ、極めて有用である。それ以外のコリメータは、COL1, 2 でハローが十分落とせない場合に用いる。大電流運転(最大 0.9 mA)では、バンチ繰り返し 1.3 GHz の場合には COL1, 2 のみを使用し、バンチ繰り返し 162.5 MHz の場合には COL4 も併用した。

Table 2: Beam Collimators

Name	Location	Dispersion η_x
COL1	Exit of injector	0
COL2	Merger	0.23 m
COL3	North-straight section	0
COL4	First arc	-1.28 m
COL5	Second arc	-1.28 m

バーストモードでのコリメータ調整の例を Figure 2 に示す。図の上段は合流部コリメータ(COL2)の各ロッドの位置(ビームダクト中心からロッド先端までの距離)を、中段は第1アーク部入口と中央でのロスモニターの信号(ログスケール)を、下段はダンプで測定したビームのピーク電流を、それぞれ示す。この例では、ピーク電流約 300 μ A、バンチ繰り返し 1.3 GHz のバーストビームをビームダンプまで輸送しながら、COL2 の各ロッドを挿入し、周回部におけるビーム損失が最小になる位置を探した。た

だし、コリメータを挿入し過ぎてビームコアを削る(ダンプでのビーム電流が低下する)事は避けた。cERL では、ビームのハローのみを削り、コアを削らないコリメータ位置が見つかった。調整後の COL2 の設定値を Figure 1 に示す。コリメータ COL1 についても同様の調整を行った後、CW 運転に切り替え、平均ビーム電流 300 μ A までの運転でビーム損失が低い事を確認した。

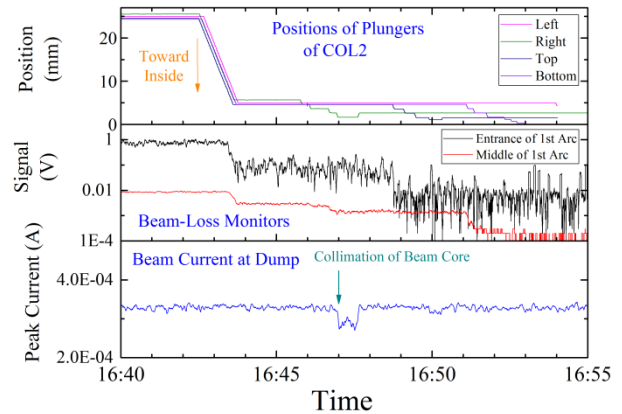


Figure 2: Typical process of collimator adjustment.

4. cERL 大電流運転

4.1 バンチ繰り返し 162.5 MHz での大電流運転

平均電流約 0.9 mA の大電流運転の例を Figure 3 に示す。この運転では、バンチ繰り返し 162.5 MHz の CW ビームを生成・加速・周回・減速してビームダンプまで輸送した。バンチ当たりの電荷は 5.5 pC、周回部の全ビームエネルギーは 19.9 MeV、入射エネルギーは 2.9 MeV であった。3.4 で述べたのと同様にコリメータ COL1, COL2, COL4 を調整し、Table 3 に示す位置に設定した。入射器空洞(2 セル空洞 3 台)の加速勾配は (3.18, 3.22, 2.89) MV/m、主加速空洞(9 セル空洞 2 台)の加速電圧は (8.56, 8.56) MV であった。図でビーム周回中にビーム電流を 2 回ゼロに下げているのは、室温変化のため電子銃用レーザー共振器の微調機構をリセットした事による。レーザー室の断熱を強化すれば改善できる。

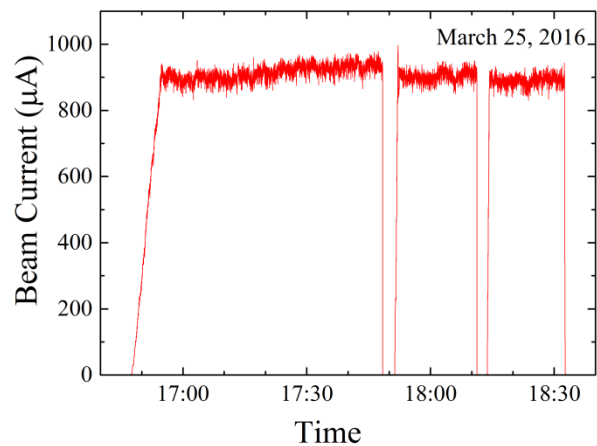


Figure 3: Beam current during high-average-current operation of cERL. Bunch repetition rate: 162.5 MHz.

Table 3: Example of Collimator Setting

Collimator	Positions of rods (top, bottom, left, right) mm
COL1	(3.87, 3.23, 6.54, 2.51) mm
COL2	(2.14, 0.26, 4.21, 4.59) mm
COL4	(-, -, 11.04, 9.03) mm

Figure 4 に大電流運転中のビームダクト内圧力をビーム電流に対して示す。電子銃直下流の入射部ミラーチェンバーではエキストラクタゲージで、それ以外では CCG で測定した。ミラーチェンバーの圧力はビーム電流によらず約 2×10^{-9} Pa の極高真空に保たれ、フォトカソードの長寿命に貢献している。第1アーク(などの周回部)の圧力もビーム電流によらずほぼ一定であった。ビームまたはビームハローが照射されるビームダンプとコリメータ近く(Merger)の圧力は、ビーム電流とともに上昇した。電子衝撃によるガス放出のためと考えられる。大電流運転を継続すると、焼きだし効果が見られた。将来ビーム電流を 10 mA まで増強する場合には、ガス放出点付近の排気系を強化するのが望ましい。

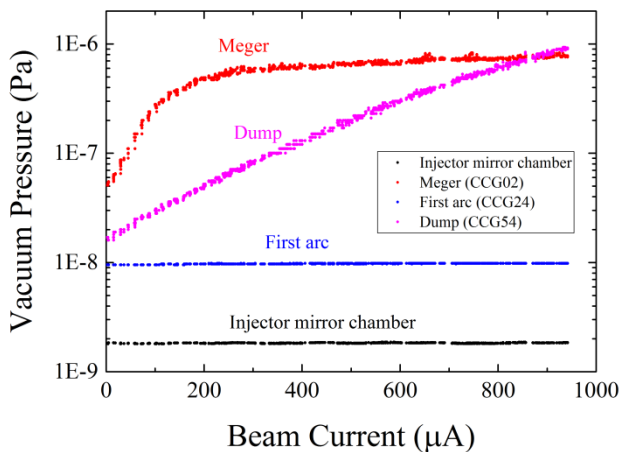


Figure 4: Vacuum pressure vs. beam current.

cERL 加速器室は天井の厚さ 1 m、側壁の厚さ 1.5 m の鉄筋コンクリート製である。天井の上で観測される放射線量率は加速器室内のビームロス分布を反映し、その値からビーム損失率が推定できる。Figure 3 に示した運転中に加速器室の天井上で線量率を測定した結果を

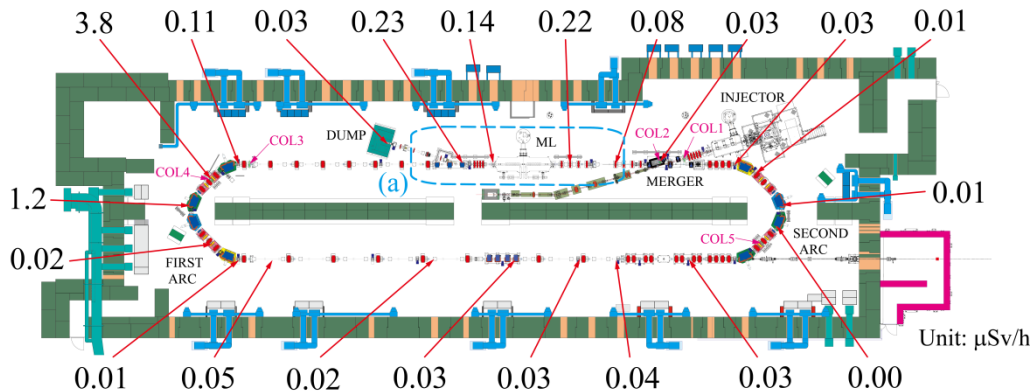


Figure 5: Measured radiation-dose rates (unit: $\mu\text{Sv/h}$) on the top of the cERL accelerator room. Average beam current: approximately 0.9 mA, bunch repetition rate: 162.5 MHz.

Figure 5 に示す。測定器は日立アロカメディカル TCS-171B を使い、バックグラウンド差し引き後の値を示した。

Figure 5 に示した線量率は十分低く、放射線管理区域として全く問題ない。最も線量率が高かった点は、ビームハロー (19.9 MeV) を落としているコリメータ COL4 の真上で、線量率 $3.8 \mu\text{Sv/h}$ であった。将来電流増強する場合には、コリメータ上部の遮蔽強化をする事で線量率を下げられる。また、図中(a)で示した領域でも線量率がやや高めであるが、線量率はビーム電流によらず、主加速空洞からの暗電流の寄与である。その他の場所では、 $0.05 \mu\text{Sv/h}$ 以下という非常に低い線量率であった。なおコリメータ COL1, 2 でもハローを削っているが、低エネルギーのため天井上の線量率へは殆ど寄与しない。

天井上で線量率が高めの場所について、ビーム損失率を見積もった結果を Figure 6 に示す。損失率は、ビーム損失点と推定される 1 点でビームの一部が損失したと仮定し MARS15 コードを用いて計算した天井上での線量率と、実測値を比較して推定した[5]。コリメータ COL4 と第 1 アーク出口(Q マグネット内を損失点と仮定)での損失率はそれぞれ、0.009%、0.0001%と推定される。周回部のそれ以外の場所では、エネルギー 19.9 MeV のビームの損失率は 1 箇所当たり 0.0002%以下であると推定される。

加速器室内放射線モニターとビームロスモニターによる測定では[3]、第 2 アークの後半部から出口までの区間と、主空洞の出口からビームダンプまでの区間において、比較的ビーム損失が大きいことも判っている。これらの区間での損失はビームオプティクス調整に敏感であり、オプティクスマッチング等をさらに精密に行う事で改善が期待できる。また、シミュレーションと実験との比較により、ビーム損失のメカニズムの理解も進んでいる[7]。

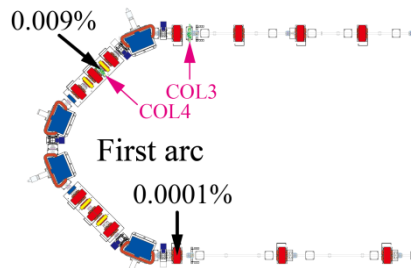


Figure 6: Estimated beam-loss rate.

4.2 主空洞におけるエネルギー回収

ビームは主加速空洞(主空洞)を2回通過する。ビームが1度目の通過で加速され、2度目で減速される事により、加速に必要な電力が減速時に回収される。主空洞でのエネルギー回収を示すデータを Figure 7 に示す。図では、2台の主空洞(ML1, ML2)について、空洞への入力 RF 電力(P_{in})と反射電力(P_{ref})の差をビーム電流に対して示した。バンチ繰り返しは 1.3 GHz、主空洞の加速電圧は(8.56, 8.57) MV、on-crest 加速であった。電力差($P_{in}-P_{ref}$)がビーム電流にほぼ依らない事から、ビーム負荷電力が、エネルギー回収無しの場合(最大 8.6 kW)に比べて格段に小さい事がわかる。特に、2台の空洞合計(ML1+2)では、測定誤差約 0.03%の範囲内で電力が100%回収されている。個々の空洞 ML1, ML2 については、ビームが1度目と2度目に通過する際に速度が僅かに異なる為、電力回収率が100%から±0.35%ずれている。なお Figure 7 の縦軸のオフセットは、ビーム電流がゼロの時の電力差をゼロと定義した。

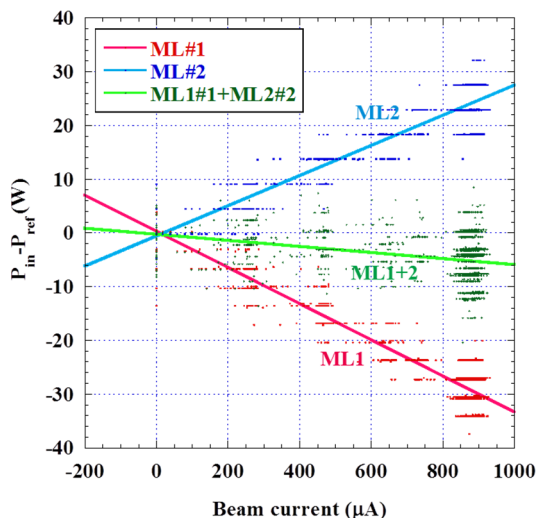


Figure 7: Energy recovery in main-linac cavities.

4.3 フォトカソードの寿命

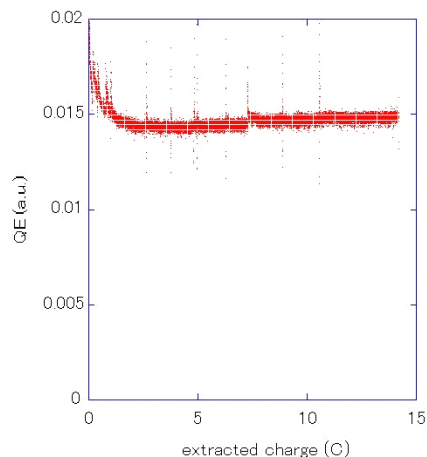


Figure 8: Change in the photocathode QE during a high-average-current operation of March 29, 2016.

cERL 電子銃では、NEA 表面 GaAs フォトカソードを用いている。電子銃チャンバーの到達圧力は 1×10^{-9} Pa であり、大電流運転時にカソードの寿命は十分長い。Figure 8 に、ある1日の大電流運転におけるカソードの量子効率(QE)を引き出し電荷に対して示した[8]。約 15 C の引き出し電荷に対しては、QE の低下は小さい事がわかる。QE は大電流運転開始直後に急速に下がるが、その後は徐々に増加する傾向が見られた。この QE の振る舞いは興味深いが、まだ理論的に説明出来ていない。なお大電流運転時には、カソード寿命を延ばすため、主にカソードの電場中心からずれた位置(例えば、水平・垂直方向ともに約 1.5 mm)からビームを引き出した。

5. まとめと今後の見通し

コンパクト ERL において、平均電流 0.9 mA (CW)の電子ビームの生成・加速・周回・減速に成功した。加速器の調整とビームコリメータの使用により、非常に低いビーム損失が達成された。

実績のある運転条件(バンチ繰り返し 162.5 MHz、バンチ電荷 5.5 pC、平均電流 0.9 mA)から繰り返しを 1.3 GHz に上げる事でビーム電流を8倍にできる為、ビーム電流を 10 mA に増強した場合でも放射線量率は許容範囲内と予想される。このため、放射線変更申請を行えば、ビーム電流を 10 mA に上げることが可能であると考えられる。なお電流増強の前には、ビームダンプへの追加遮蔽、ダンプラインでのビーム損失対策、コリメータ部への追加遮蔽、ダンプおよびコリメータ部の真空排気系強化など、比較的小規模な改造を施すことが望ましい。

謝辞

cERL の建設と運転を行った ERL チームのメンバー、ならびに放射線安全に関する検討や測定をして頂いた放射線科学センターの佐々木慎一(現在は共通基盤施設長)、波戸芳仁、三浦太一、穂積憲一、豊田晃弘、大山隆弘、長畔誠司の皆様に深く感謝致します。

参考文献

- [1] T. Obina *et al.*, "Recent Developments and Operational Status of the Compact ERL at KEK", in Proceedings of IPAC'16, TUPOW036.
- [2] 松村宏 他, "ERL 開発棟におけるコンパクト ERL の出力増強に伴う放射線安全対策", KEK Internal 2015-6, Feb. 2016; <http://cedb5fs.kek.jp/tiff/2015/1526/1526006.pdf>
- [3] S. Sakanaka *et al.*, "Measurement and Control of Beam Losses under High-average-current Operation of the compact ERL", in Proceedings of IPAC'16, TUPOW038.
- [4] 原田健太郎 他, "cERL のラスタリングシステム", this conference, MOP079.
- [5] H. Matsumura *et al.*, "Beam Loss Estimation by Measurement of Secondarily Produced Photons under High Average-current Operations of Compact ERL in KEK", in Proceedings of IPAC'16, WEPOR020.
- [6] 宮島司 他, "cERL コミッシュニング運転における軌道調整とビーム光学関数調整", this conference, TUP064.
- [7] 田中オリガ 他, "コンパクト ERL におけるビームロス低減のためビームハロー観察および解析", this conference, MOOL03.
- [8] 西森信行 他, "コンパクト ERL 電子銃の高性能化", this conference, MOP048.