

コンパクト ERL のコミッショニング状況とビーム利用に向けた取り組み PROGRESS ON THE COMPACT ERL COMMISSIONING AND EFFORTS TOWARD BEAM UTILIZATION

高井 良太^{#A)}, 足立 伸一^{A)}, 阿達 正浩^{A)}, 赤木 智哉^{A)}, 明本 光生^{A)}, 荒川 大^{A)}, 荒木 栄^{A)}, 浅岡 聖二^{A)}, 江並 和宏^{A)}, 遠藤 有聲^{A)}, 福田 茂樹^{A)}, 古屋 貴章^{A)}, 芳賀 開一^{A)}, 原 和文^{A)}, 原田 健太郎^{A)}, 本田 融^{A)}, 本田 洋介^{A)}, 本間 博幸^{A)}, 本間 輝也^{A)}, 細山 謙二^{A)}, 穂積 憲一^{A)}, 石井 篤^{A)}, 金 秀光^{A)}, 加古 永治^{A)}, 神谷 幸秀^{A)}, 片桐 広明^{A)}, 河田 洋^{A)}, 小林 幸則^{A)}, 小島 裕二^{A)}, 近藤 良也^{A)}, 小菅 淳^{A)}, 久米 達哉^{A)}, 松本 利広^{A)}, 松村 宏^{A)}, 松下 英樹^{A)}, 道園 真一郎^{A)}, 三浦 孝子^{A)}, 宮島 司^{A)}, 宮内 洋司^{A)}, 長橋 進也^{A)}, 仲井 浩孝^{A)}, 中島 啓光^{A)}, 中村 典雄^{A)}, 中西 功太^{A)}, 中尾 克己^{A)}, 濁川 和幸^{A)}, 野上 隆史^{A)}, 野口 修一^{A)}, 野澤 俊介^{A)}, 帯名 崇^{A)}, 尾崎 俊幸^{A)}, Qiu Feng^{A)}, 下ヶ橋 秀典^{A)}, 阪井 寛志^{A)}, 坂中 章悟^{A)}, 佐々木 慎一^{A)}, 佐藤 康太郎^{A)}, 佐藤 昌史^{A)}, 設楽 哲夫^{A)}, 篠江 憲治^{A)}, 島田 美帆^{A)}, 塩屋 達郎^{A)}, 宍戸 寿郎^{A)}, 清宮 裕史^{A)}, 多田野 幹人^{A)}, 田原 俊央^{A)}, 高橋 毅^{A)}, 高木 宏之^{A)}, 田中 織雅^{A)}, 竹中 たてる^{A)}, 谷本 育律^{A)}, 照沼 信浩^{A)}, 飛山 真理^{A)}, 土屋 公央^{A)}, 内山 隆司^{A)}, 上田 明^{A)}, 梅森 健成^{A)}, 浦川 順治^{A)}, 渡邊 謙^{A)}, 山本 将博^{A)}, 山本 康史^{A)}, 矢野 喜治^{A)}, 吉田 光宏^{A)}, 羽島 良一^{B)}, 松葉 俊哉^{B)}, 森 道昭^{B)}, 永井 良治^{B)}, 西森 信行^{B)}, 沢村 勝^{B)}, 静間 俊行^{B)}, 栗木 雅夫^{C)}, Cenni Enrico^{D)}, Hwang Ji-Gwang^{E)}

Ryota Takai^{#A)}, Shinichi Adachi^{A)}, Masahiro Adachi^{A)}, Tomoya Akagi^{A)}, Mitsuo Akemoto^{A)}, Dai Arakawa^{A)}, Sakae Araki^{A)}, Seiji Asaoka^{A)}, Kazuhiro Enami^{A)}, Kuninori Endo^{A)}, Shigeki Fukuda^{A)}, Takaaki Furuya^{A)}, Kaiichi Haga^{A)}, Kazufumi Hara^{A)}, Kentaro Harada^{A)}, Tohru Honda^{A)}, Yosuke Honda^{A)}, Hiroyuki Honma^{A)}, Teruya Honma^{A)}, Kenji Hosoyama^{A)}, Kenichi Hozumi^{A)}, Atsushi Ishii^{A)}, Xiuguang Jin^{A)}, Eiji Kako^{A)}, Yukihide Kamiya^{A)}, Hiroaki Katagiri^{A)}, Hiroshi Kawata^{A)}, Yukinori Kobayashi^{A)}, Yuuji Kojima^{A)}, Yoshinari Kondou^{A)}, Atsushi Kosuge^{A)}, Tatsuya Kume^{A)}, Toshihiro Matsumoto^{A)}, Hiroshi Matsumura^{A)}, Hideki Matsushita^{A)}, Shinichiro Michizono^{A)}, Takako Miura^{A)}, Tsukasa Miyajima^{A)}, Hiroshi Miyauchi^{A)}, Shinya Nagahashi^{A)}, Hirotaka Nakai^{A)}, Hiromitsu Nakajima^{A)}, Norio Nakamura^{A)}, Kota Nakanishi^{A)}, Katsumi Nakao^{A)}, Kazuyuki Nigorikawa^{A)}, Takashi Nogami^{A)}, Shuichi Noguchi^{A)}, Shunsuke Nozawa^{A)}, Takashi Obina^{A)}, Toshiyuki Ozaki^{A)}, Feng Qiu^{A)}, Hidenori Sagehashi^{A)}, Hiroshi Sakai^{A)}, Shogo Sakanaka^{A)}, Shinichi Sasaki^{A)}, Kotaro Satoh^{A)}, Masato Satoh^{A)}, Tetsuo Shidara^{A)}, Kenji Shinoe^{A)}, Miho Shimada^{A)}, Tatsuro Shioya^{A)}, Toshio Shishido^{A)}, Yuji Seimiya^{A)}, Mikito Tadano^{A)}, Toshihiro Tahara^{A)}, Takeshi Takahashi^{A)}, Hiroyuki Takaki^{A)}, Olga Tanaka^{A)}, Tateru Takenaka^{A)}, Yasunori Tanimoto^{A)}, Nobuhiro Terunuma^{A)}, Makoto Tobiyama^{A)}, Kimichika Tsuchiya^{A)}, Takashi Uchiyama^{A)}, Akira Ueda^{A)}, Kensei Umemori^{A)}, Junji Urakawa^{A)}, Ken Watanabe^{A)}, Masahiro Yamamoto^{A)}, Yasuchika Yamamoto^{A)}, Yoshiharu Yano^{A)}, Mitsuhiro Yoshida^{A)}, Ryoichi Hajima^{B)}, Shunya Matsuba^{B)}, Michiaki Mori^{B)}, Ryoji Nagai^{B)}, Nobuyuki Nishimori^{B)}, Masaru Sawamura^{B)}, Toshiyuki Shizuma^{B)}, Masao Kuriki^{C)}, Enrico Cenni^{D)}, Ji-gwang Hwang^{E)}

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

^{B)} Japan Atomic Energy Agency, JAEA

^{C)} Hiroshima University

^{D)} The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI

^{E)} Kyungpook National University, KNU

Abstract

The Compact Energy Recovery Linac (cERL) is a test accelerator for the ERL-based future light source. Since beam commissioning of the complete system was started in December 2013, its performance has been steadily enhanced through various machine studies. The average beam current is increased step by step toward our initial goal of 10 mA, we have succeeded in transporting the maximum beam current of 80 μ A with no significant beam loss so far. In parallel with such beam tuning, we have been preparing for the beam utilization. In the autumn of 2014, we installed a laser Compton scattering (LCS) system in the south straight section of the cERL. The LCS photons were first successfully generated in March 2015. We report the details of our recent progress in the cERL commissioning.

[#] ryota.takai@kek.jp

1. はじめに

現在 KEK では将来の大型放射光源や高繰り返し FEL の基盤となるエネルギー回収型ライナック (ERL) の研究開発を進めている^[1]。2013 年 12 月には、ERL の基本要素を一通り備えた試験加速器 “コンパクト ERL (cERL)” が完成し、およそ 2 ヶ月後の 2014 年 2 月には安定なエネルギー回収の下で平均電流 6.5 μA の CW 運転に成功した。前回の年会では、そのときのビーム調整の詳細や微小電荷におけるビーム応答の解析結果等を紹介した^[2]。今回はその後のコミッショニング状況とレーザーコンプトン散乱 (LCS) 実験を主としたビーム利用に向けた取り組みについて報告したい。

図 1 は現在の cERL の全体図である。最上流に位置する光陰極 DC 電子銃で生成された電子ビームは、3 台の 2 セル空洞で構成される超伝導加速空洞 (入射空洞) により 2.9 MeV まで加速され、ドッグレッグ式の合流部を介して周回部へと入射される。周回部では 2 台の 9 セル空洞からなる超伝導加速空洞 (主空洞) により 19.9 MeV まで加速され、アクロマーチングかつアイソクロナスの条件を満たすよう調整された 2 つのアーチ部を経て再び主空洞に入射される。このときビームを乗せる加速高周波の位相は、周回部の周長を調整することでオンクレストから 180° ずれた減速位相に設定し、周回前にビームに与えたエネルギーを回収する。入射エネルギーまで減速されたビームはダンピングシキンで選別され、ファラデーカップを兼ねた水冷式の主ダンピング導かれる。周回部におけるビームエネルギーの設計値は 35 MeV であるが、主空洞のフィールドエミッションによる暗電流増加に配慮し、現状では 20 MeV に制限して運転している。加速高周波の基本周波数は 1.3 GHz である。

図 2 に周回部を含むシステム全体でのコミッショニングを開始してからこれまでの月別運転時間 (ビームを出していた時間) の推移を示す。この期間での総運転時間は 945 時間となっている。典型的な一日の運転スケジュールとしては、まずその日の午前中に各空洞の冷却 (4 K \rightarrow 2 K) やエイジングを開始し、それらが完了した午後から電子銃やその他の機器を立ち上げて加速器を運転状態にする。立ち

上げの手順は既にマニュアル化されており、およそ 30 分でビームを出せる状態となる。その後は 23 時の運転終了まで約 9 時間運転状態がキープされ、この間にビーム調整や各種マシンスタディが行われる。

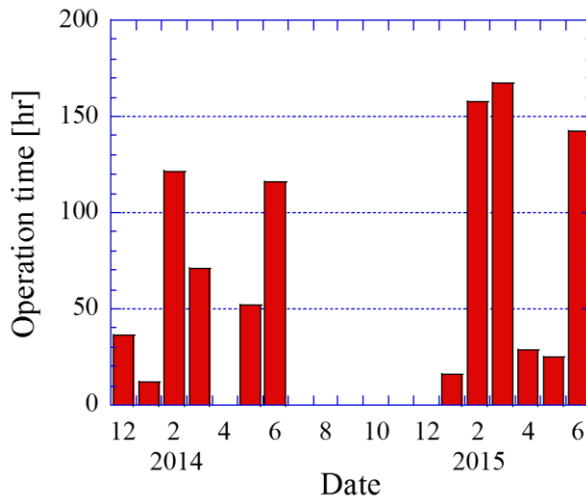


Figure 2: Monthly operation time of the cERL.

2. 平均電流の増強

前回の報告からこれまでににおける 2 大目標は、平均電流の増強と LCS による X 線発生を実現するための運転条件の確立であった。cERL では平均電流 10 mA を当面の目標としており、電流増強に伴う課題を一つ一つクリアしながら着実に開発を進めるため、施設で扱う最大ビーム電流の申請値を段階的に更新するようにしている。この最大電流の値は前回の報告時点では 10 μA であったが、6.5 μA での CW 運転成功を受けて、2014 年夏期の停止期間中に 100 μA への変更を申請し、認められた。

このような平均電流ではビーム調整の主力となるスクリーンモニターが使用できないため、普段の調整はバーストモードと呼んでいるマクロパルスビームを用いた運転モードで行っている。ビームの繰り返し周波数は 1.3 GHz のままであるが (LCS 実験時は 162.5 MHz)、マクロパルスの長さを 1 μs に制限することで平均電流を小さく抑えている。マクロパルスの繰り返し周波数は 5 Hz である。

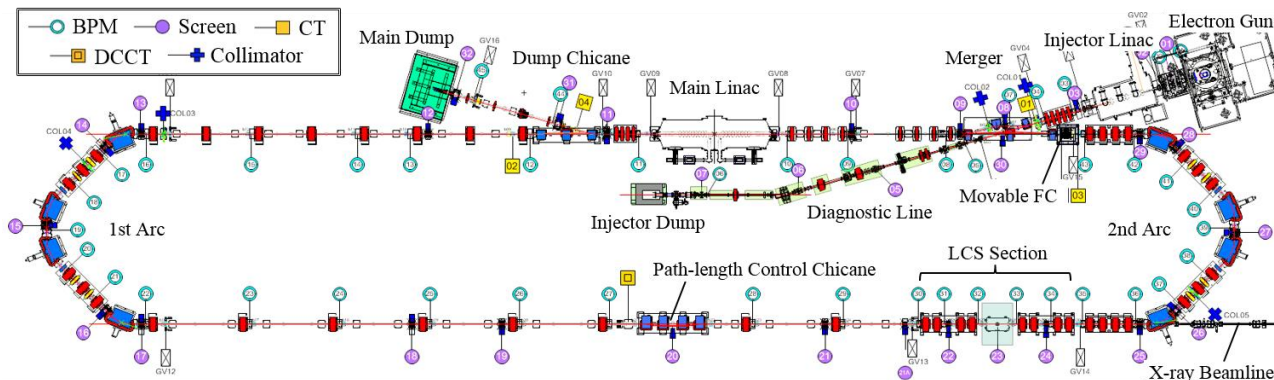


Figure 1: Layout of the cERL.

CW 運転確立までの調整手順を概説すると、まずビーム軌道の調整では、ビームを主なソレノイド電磁石や 4 極電磁石の磁場中心に通すことが基本となる。それには中心を通したい電磁石の電流 (K 値) を正弦的に変調し、下流のスクリーンにおけるビームの重心位置が動かなくなるよう、上流のステアリングコイルを調整する。この手順を上流の電磁石から順に行うことで、ビームベースの軌道調整を行っている。入射空洞および主空洞の RF 位相は、下流のステアリングコイルで軌道を振ったときの振幅、あるいは偏向電磁石通過後の重心位置をモニターしながら運動量が最大となる位相に合わせている (オンクレスト加速)。各空洞の中心を通すには、RF 位相を変えても下流での重心位置が動かなくなるよう軌道を調整する。すなわち、空洞が持つ集束力の変化が最も小さい場所を探すことで実現している。また、最近では入射空洞に各空洞の HOM ポートから出力される TM110 のダイポールモードを利用した HOM BPM を設置し、空洞の中心通しにおける新たなツールとして活用している^[3]。

2 つのアーク部におけるエネルギー分散の漏れは、ビームエネルギーを 1% 程度変えたときに生じる周回軌道の変化を BPM で観測して確認される。第 2 アーク直後には可動式のファラデーカップが設置されており、そこでビーム電流を確認してから主空洞への再入射、およびダンプラインへの軌道調整を行う。この調整では周回前後の 2 つのビームが共存する区間 (合流部からダンプシケインまで) の電磁石を使用できないので、主に合流部直前にある 4 連の 4 極電磁石が使用される。同様にこの区間ではスクリーンのような破壊型のモニターは使用できないため、BPM の出力信号を基に軌道を調整する^[4]。エネルギー回収の調整は、ダンプラインでの重心位置を見ながら運動量が最小となるよう周回部の周長を微調することで行う。周長は 2 つのアーク部と周長補正シケインで調整可能となっている。

ビームをほぼロスすることなく主ダンプまで導いたら、いよいよマクロパルスによるバーストモードから CW モードへと移行する。ビームの平均電流は電子銃電源と主ダンプで計測され、ビームラインに沿って配置したロスモニターの出力を注視しながら少しずつ増やされる。ビームロスの調整には、図 1 に示した 5 ヶ所に設置されたビームコリメータを使用する。これらは水冷した銅製のロッドを上下左右の 4 方向から独立に挿入できる構造になっており、ビームロスの原因となるビームハローやビームテイルの除去に利用される。図 3 にコリメータの外観とビームロス調整時に参照しているトレンドグラフの一例を示す。グラフには主ダンプで測定したビーム電流 (青) とダクト中心からコリメータロッド先端までの距離 (赤)、およびロスモニターの出力信号の振幅 (緑) が表示されており、コリメータをダクト中心に向かって挿入していくと次第にビームロスが減少し、さらに挿入するとビームのコアまで削ってビーム電流自体が減少する様子が示されている。コリメータの挿入量は、このようなグラフを参照し

ながらビーム電流に影響を与えない範囲でビームロスが最小になるよう決められる (図中に矢印で示した範囲)。特に周回部でのビームロス低減には、5 つのコリメータの中でも低エネルギーセクションに設置した 2 つ (図 1 中の COL01 と 02) を使用するのが効果的である。コリメータの周辺や他の要所には CsI シンチレータを用いた高速ロスモニターを設置しており、許容レベル以上のビームロスを検知した場合には即座にビームが止まるよう、高速のインターロックシステムに組み込んで使用している^[5]。

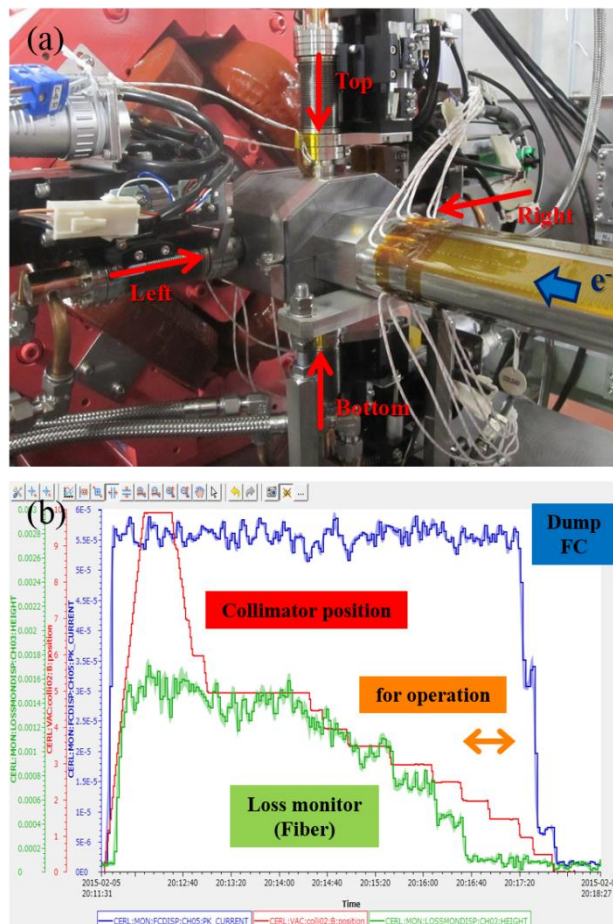


Figure 3: (a) The beam collimator for the arc section. (b) Collimator position tuning while monitoring the beam current and the beam loss.

以上のような手順で慎重にビーム調整を重ねた結果、2015 年 2 月に最大電流の約 3 割に当たる 30 μA での CW 運転に成功し、施設検査に合格した。その後も調整を続け、現在までにおよそ 80 μA での安定な周回に成功している。そのとき主ダンプと電子銃電源で測定したビーム電流の推移を図 4 に示す。測定は後述する LCS 実験用のオプティクス調整後に行われ、バンチ電荷は 0.5 pC、ビームの繰り返し周波数は 162.5 MHz であった。この測定の間、加速器室周辺で観測される放射線量も最大で 0.6 $\mu\text{Sv/h}$ 程度 (ほぼ主空洞からの暗電流の寄与) に維持されており、次回予定している 1 mA への電流増強に向けて明るい見通しが得られた。ただし、図 4 にも現れて

いるように、現状では CW 運転開始から数 10 分で電子銃電流とダンプ電流の間に数 μA の差が生じる。これはゆっくりとしたビーム軌道のドリフトに起因しており、両者の差はコリメータを再調整すると解消する。軌道ドリフトの原因は電子銃の直下流で使用しているレーザー導入ミラーのチャージアップと推定されており、次回のコミッショニングまでには金属製のミラーに変更する予定となっている。

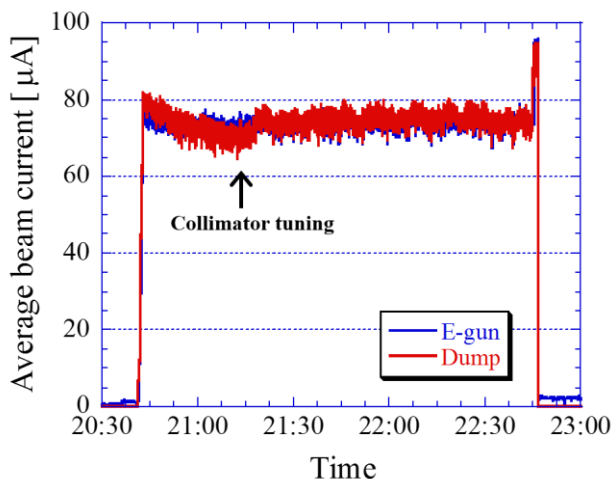


Figure 4: Average beam currents measured at the electron gun power supply and the main beam dump.

3. LCS による X 線発生実験

cERL のビーム利用計画として最初に推進されているのが LCS 実験である。LCS は準単色でエネルギー可変の X 線や γ 線を発生させることが可能な技術であり、その輝度は電子ビームの電流に比例し、エミッタンスの 2 乗に反比例する。したがって、大電流かつ低エミッタンスのビームを備える ERL は高輝度の LCS 光源として大変有望であり、cERL においてもその設計段階から LCS の導入が検討されていた^[6]。LCS 実験に必要な高出力レーザーやその蓄積装置、X 線ビームライン、実験ハッチ等は 2014 年 9 月から 12 月の期間に設置され、その後急ピッチで実験システムとしての立ち上げが進められた。加速器側の準備としては、2015 年 2 月に最大電流を 100 μA へ変更する施設検査に合格した後、LCS 実験に向けたビーム調整を開始した。

LCS 実験では、レーザーとの衝突点 (IP) において横方向の RMS ビームサイズを 10 μm のオーダーまで絞り込む必要がある。一方、そのようなオプティクスを実現しようとすると、図 5 に示すとおり IP 両側の 4 極電磁石におけるビームサイズが大きくなり、ビームロスが増える傾向がある。IP 付近でのビームロスはそれを見込む位置にある X 線検出器のバックグラウンドノイズに直結するため、できるだけ小さく抑えなければならない。したがって、LCS 実験に向けたビーム調整では、この相反する 2 つの条件を実験に支障のない範囲に収めることが目標となる。

LCS セクションにおけるビーム調整は、次のよう

な手順で行われた。まず前章で述べた手順によりマクロパルスのビームを主ダンプまで導いた後、IP 付近の 4 極電磁石の K 値を LCS オプティクスの設計値に設定する。当然それらの K 値は残留磁場の影響等による誤差を含んでいるので、Q スキャン法で実際の光学関数を測定しながら LCS セクション入口における光学関数をできるだけ設計値に近づける (オプティクスマッチング^[7])。その後 IP 直前の 4 極電磁石 (図 5 中の QMLC04) の K 値をスキャンし、IP に設置したスクリーンでビームサイズの応答を測定する。もしこのときビームサイズが最小になる K 値が水平方向と垂直方向で異なっているようであれば、もう一つ手前の 4 極電磁石 (図 5 中の QMLC03) を使ってそれらが一致するように調整する。この応答測定と調整を数回繰り返すことで、図 5 に示したような IP で同時に焦点を結ぶ LCS オプティクスを実現できる。ただし、現在 IP で使用しているアルミナスクリーンの空間分解能は 150 μm 程度であるため、応答測定のグラフから直接ビームサイズを読み取ることはできない。そこで、IP でのビームサイズは別途測定した規格化エミッタンスを拘束条件にし、フリーパラメータとしてオフセット項を加えた応答関数を測定データにフィットすることで推定した。

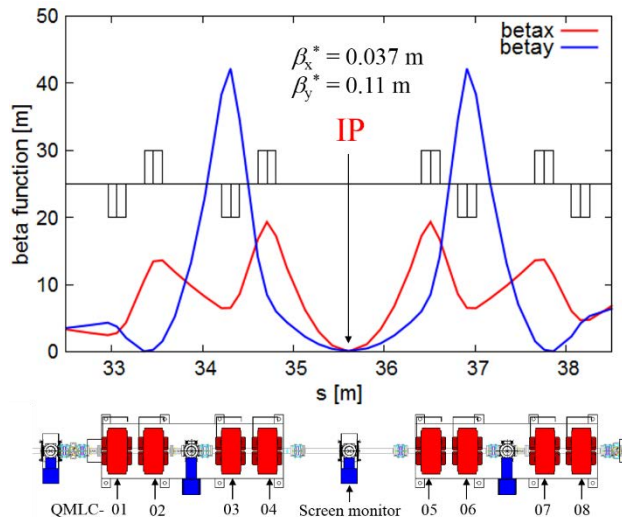


Figure 5: Design of low- β optics in the LCS section.

そして、調整を開始してから約 1 ヶ月後の 2015 年 3 月には、このようにして確立した LCS オプティクスで平均電流 58 μA の CW 運転を行い、LCS による 6.9 keV の準単色 X 線の発生に成功した^[8,9]。ビームの繰り返し周波数は、衝突させるレーザーの繰り返しに合わせて 1.3 GHz の 1/8 にあたる 162.5 MHz に設定された。バンチ電荷は 0.36 pC であり、規格化エミッタンスは水平・垂直とも 0.4 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$ であった。IP での RMS ビームサイズは、上記の方法により水平・垂直とも 30 μm 程度と推定され、レーザーのスポットサイズとほぼ同じになっていることが確認された。発生した X 線の強度は、IP から約 17 m 下流の実験ハッチ内に設置した口径 4.66 mm のシリコンドリフト検出器 (AMPTEK, XR-100SDD) で測定すると、最大 1200 cps であった。これを発生点で

の強度に換算すると 4.3×10^7 cps となり、今後の電流増強や蓄積レーザーパワーの改善を考えると十分既存の LCS 光源を凌ぐ X 線強度を期待できる。

また、2次元のフォトンカウンティング型検出器 (Rigaku, HyPix-3000) を用いて、X 線イメージングの予備実験も行った。イメージングサンプルにはスズメバチの標本を使用し、検出器はサンプルから 2.5 m 下流に設置した。空気による X 線の減衰を抑えるため、サンプルから検出器までの空間は He ガスを充填したチューブで接続した。実験ハッチ内のセットアップと取得したイメージング画像を図 6 に示す。検出器の露光時間は 10 分である。微小光源による屈折コントラストの効果で像のエッジ部分が強調され、薄い羽を支える翅脈や体内の細かい構造まで確認できる。その後もイメージング視野の拡大や空間分解能の評価、X 線エネルギーの可変性チェック等が行われ、LCS 光源としての性能向上に向けた努力が続けられている。

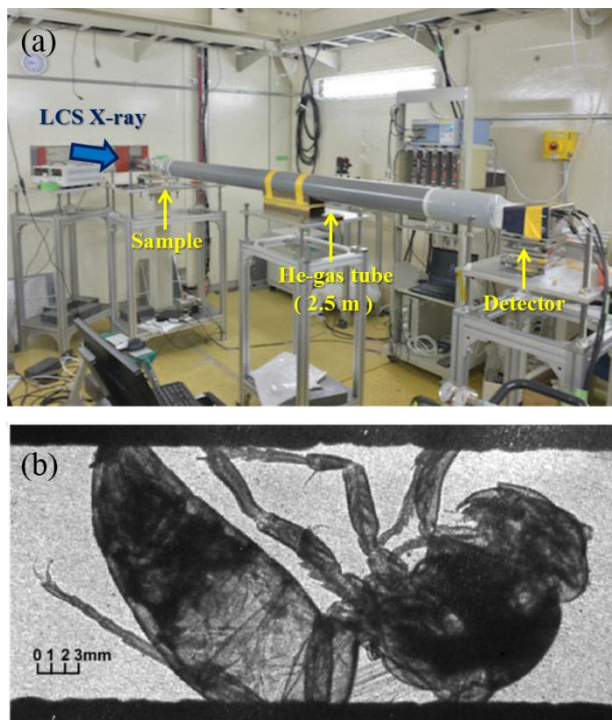


Figure 6: (a) Experimental setup for the LCS X-ray imaging. (b) An X-ray image of a hornet taken with LCS-produced X-ray.

4. まとめと今後

2013 年 12 月に建設が完了して以降、cERL のコミッションは順調に進んでいる。ビームの平均電流は慎重なビームロス調整の下で段階的に増強されており、現在までに最大 80 μ A での CW 運転に成功している。今後も当面の目標である 10 mA を目指して 1 桁ずつ着実に増強される。ビーム利用計画の第 1 弾である LCS 実験に向けた準備も順調に進み、2015 年 3 月には LCS による準単色 X 線の発生に成功した。この微小光源からの X 線を利用してイメー

ジングの予備実験も行い、屈折イメージングの特徴を活かした高精細の透過画像を得ることができた。これは cERL のビームが時間的にも空間的にも安定していることを示す証拠でもある。今後も電子ビームと蓄積レーザーの双方から X 線強度の増強に努め、より短時間で鮮明なイメージング画像の取得を目指す。

これらの実験と並行し、低エミッタンスを維持したまま高いバンチ電荷のビームを輸送するためのマシンスタディも精力的に行われている^[10]。これまでのスタディで 0.5 pC までのバンチ電荷に対してはほぼ初期エミッタンスを維持したまま主ダンプまで輸送することに成功しており、現在は空間電荷効果が顕著に表れる 7.7 pC (平均電流 10 mA に相当) での輸送に取り組んでいる。当然ながらビームのエミッタンスは上記の電流増強や LCS 実験にも大きく影響するため、今後はさらに優先度を上げて追及すべきテーマであるが、2015 年 6 月のスタディ中に入射空洞のフィールドエミッションが急増する事態が起こった^[11]。周回ビームのエミッタンス低減には入射ビームのエネルギーを 5 MeV 程度まで上げるのが効果的であることが分かっているが、現状ではこのフィールドエミッションの影響で難しい状況となっている。幸い普段の運転で使用している 2.9 MeV への加速では問題ないレベルにあるので、今後も運転を続けながら原因の究明と性能回復への対策がなされる。

また、今後のコミッションでは、もう一つのビーム利用計画である大強度テラヘルツ光源に向けたコヒーレント放射の発生も重要なテーマとなる^[6]。テラヘルツ領域のコヒーレント放射を発生させるにはバンチ長を現在の数 ps から 100 fs 以下まで圧縮する必要があり、そのためのハードウェアやモニター系の準備も着々と進められている^[12-14]。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省委託事業：光・量子融合連携研究開発プログラム「小型加速器による小型高輝度 X 線源とイメージング基盤技術開発」、および核セキュリティ強化等推進事業費補助金の支援を受けて実施された。

参考文献

- [1] “Energy Recovery Linac Conceptual Design Report”, KEK Report 2012-4 (2012); <http://ccdb5fs.kek.jp/tiff/2012/1224/1224004.pdf>
- [2] 島田美帆他, “コンパクト ERL のコミッション”, 第 11 回日本加速器学会年会議事録, pp. 1-5 (2014).
- [3] 本田野介他, “cERL 入射器超伝導空洞の高次モードによるビーム位置測定”, THP089, in these proceedings.
- [4] R. Takai, et al., “Design and Initial Commissioning of Beam Diagnostics for the KEK Compact ERL”, Proc. IBIC2014, Monterey, USA, MOCYB2 (2014).
- [5] 下ヶ橋秀典他, “cERL におけるインターロック用高速ロスモニタシステムの開発”, THP083, in these proceedings.
- [6] 羽島良一他, “コンパクト ERL の設計研究”, KEK Report 2007-7 / JAEA-Research 2008-032 (2008).
- [7] 宮島司他, “電子線形加速器における低エミッタンス

PASJ2015 FROM03

- ビーム輸送路光学系の最適化試験” , THP017, in these proceedings.
- [8] 永井良治他, “コンパクト ERL でのレーザーコンプトン散乱光源実証実験” , THP113, in these proceedings.
 - [9] 赤木智哉他, “レーザーコンプトン散乱による小型高輝度 X 線源開発” , THP114, in these proceedings.
 - [10] T. Miyajima, et al., “Status of Higher Bunch Charge Operation in Compact ERL”, Proc. IPAC'15, Richmond, USA, TUPWA067 (2015).
 - [11] 山田浩気他, “cERL 入射器クライオモジュールのビーム運転状況” , WEP051, in these proceedings.
 - [12] 中村典雄他, “コンパクト ERL におけるコヒーレントテラヘルツ放射発生のためのバンチ圧縮・復元の研究” , THP018, in these proceedings.
 - [13] 本田洋介他, “cERL における共振器型 CDR による THz 光源の検討” , WEP022, in these proceedings.
 - [14] 本田洋介他, “cERL 周回部におけるバンチ長の測定” , THP088, in these proceedings.