

コンパクト ERL における赤外 FEL 設置のためのビーム診断系改造 BEAM DIAGNOSTIC SYSTEM MODIFICATION FOR IR-FEL INSTALLATION AT THE COMPACT ERL

高井 良太*, 内山 隆司, 野上 隆史, 谷本 育律, 下ヶ橋 秀典, 帯名 崇

Ryota Takai*, Takashi Uchiyama, Takashi Nogami, Yasunori Tanimoto, Hidenori Sagehashi, Takashi Obina

High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Accelerator Laboratory

Abstract

At the compact energy-recovery linac (cERL), which is a superconducting accelerator of KEK, R&D for industrial and medical application of its bright electron beams is being actively advanced. Recently, a free electron laser (FEL) of a mid-infrared region was installed in the south straight section of the cERL as part of new light-source development for the next-generation laser-processing. This paper describes the modification of beam diagnostic system associated with the IR-FEL installation.

1. はじめに

KEK の加速器研究施設では、2013 年より超伝導加速器技術を利用したエネルギー回収型線形加速器 (ERL) の運用を続けている [1]。“コンパクト ERL (cERL)” と名付けられたこの小型加速器は、元々 ERL をベースとした次世代放射光源の原理実証機として建設されたものであるが、その後機構の将来光源計画が蓄積リング型光源にシフトしたことを受け、現在では ERL が産み出す高輝度・大電流・短バンチビームの産業・医療応用に主眼を置いた研究開発の場となっている [2,3]。2020 年の 1 月と 4 月には、次世代レーザー加工に向けた新規光源開発の一環として、中赤外領域の SASE 型自由電子レーザー (FEL) が段階的に設置された [4]。本発表では、この FEL 設置に伴い行った、ビーム診断系の移設・新設・改造について報告する。図 1 に、FEL 設置前におけるビーム診断系の全体配置図を示す。図中の点線で囲った部分が今回の改造区間である。

2. FEL 設置に伴うビーム診断系の改造

FEL 設置前後における改造区間の拡大図を図 2 に示す。長さ 3 m の同じアンジュレータ 2 台で構成される

SASE 型 FEL は、cERL 周回部の南直線部後半に設置された [5]。それに伴い、アーク部を利用した周長補正方法が確立して以降使用していなかった周長補正シケイン、並びに 2015 年にレーザーコンプトン散乱 (LCS) による X 線発生を実証したことでその役割を終えていた光共振器チェンバーとその付帯設備が撤去された [6]。アンジュレータ 1 号機 (U#01) の上流には、旧 LCS 衝突点の上流で使用していた 4 連の四極電磁石 (QM) を架台ごと移設し、後述するスクリーンモニターと合わせて FEL セクション入口でのオプティクスマッチングが可能となっている。2 台のアンジュレータ間には、やはりマッチングを取るための小型の 4 連 QM と、U#01 からの光と電子ビームの放射位相を合わせるためのシケイン電磁石 (フェイズシフター) が設置された [7]。このフェイズシフターは、ビーム進行方向のエネルギー分散 (R_{56}) を持たせることで、U#01 により生じたバンチ内の密度変動 (マイクロバンチング) を促進するのに利用することもできる。アンジュレータ 2 号機 (U#02) の下流には、将来の偏向空洞設置等を見据えて、長さ 1 m 程のドリフトスペースが確保された [8]。以下では、この改造で必要となったビーム診断系の変更点を各ビームモニターごとに分けて述べる。なお、各ビームモニターの詳細については過去の文献 [9] を参照されたい。

* ryota.takai@kek.jp

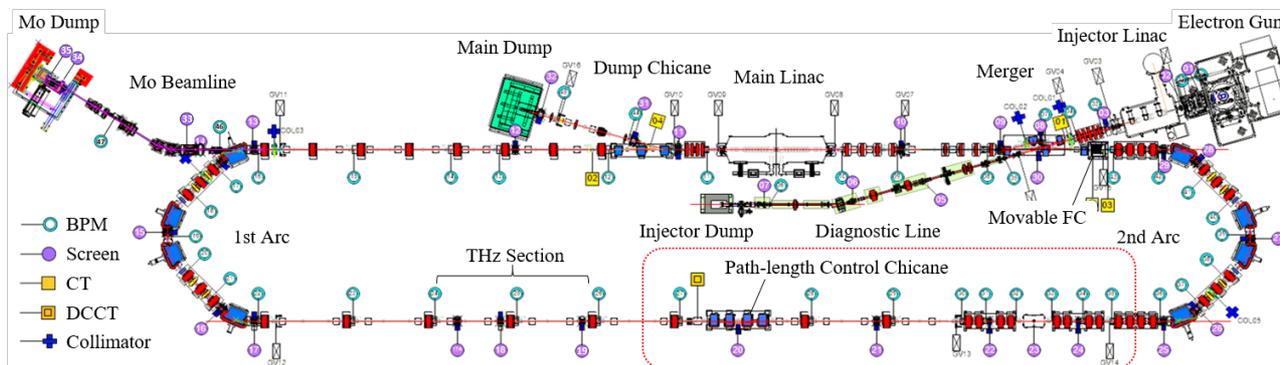


Figure 1: Layout of cERL beam monitors before the FEL installation. BLMs and FCs are not shown in this figure. The modified section is indicated by a red dotted line.

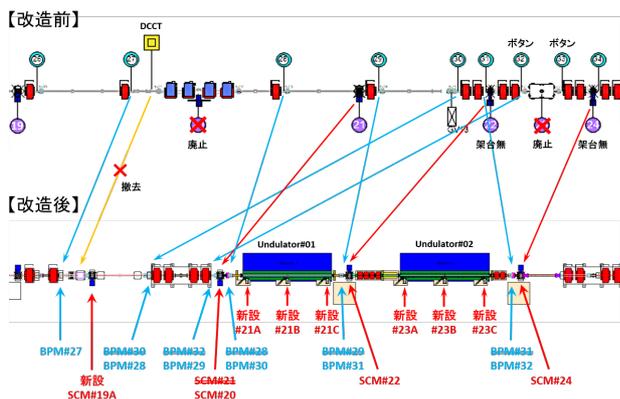


Figure 2: Enlarged figure of the modified section before and after the FEL installation.

2.1 ビーム位置モニター (BPM)

図 2 に示したとおり、BPM についてはこの区間に設置されていた 6 台の移設のみで、総数の増減はなかった。移設にあたっては、なるべく既設の同軸ケーブルを再利用できるよう配慮し、移設後には BPM の識別番号を上流から連番になるよう振り直した。

アンジュレータ前後におけるビーム位置の測定精度を上げるため、2 台のアンジュレータの上流・中間・下流に位置する 3 台の BPM (#30, #31, #32) には、従来のログアンプとデジタイザに代わって市販の信号処理回路“Libera Spark EL (Instrumentation Technologies, 以下 Libera)”を導入した [10]。Libera の標準的な位置分解能は RMS で $2.5\ \mu\text{m}$ 、温度安定度は最大で $1\ \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ となっており、ダイナミックレンジを重視した従来の回路よりも精密なビーム位置測定が可能である。また、Libera は大規模システムの制御フレームワークの 1 つである“EPICS [11]”に標準対応しているため、cERL の制御系と親和性が高く、少ない時間と労力で導入することも大きなメリットである。ただし、Libera のフロントエンドで使用されているバンドパスフィルターの中心周波数は 500 MHz であるため、cERL のビーム繰り返しに対応する 1.3 GHz の高周波信号を処理するためには、800 MHz の局部発振器信号を用いたダウンコンバータ (Instrumentation Technologies, DWC-SP) が別途必要であった。図 3 に増設した Libera とダウンコンバータの写真を示す。なお、cERL では予算の都合により運転開始当初から BPM の数に対して信号処理回路の数が不足していた。これまでは同軸スイッチ等を駆使してしのいできたが、今回の回路増設によりついに充足し、全 47 台の BPM が同時に測定可能となったことも特筆すべき進展と言えるだろう。

2.2 スクリーンモニター (SCM)

SCM については 7 台を新設、2 台を廃止、3 台を移設し、総数としては 5 台の増加となった。

新設した 7 台のうちの 1 台 (#19A) は、周回部で標準的に使用している RF シールド付きの 2 段式 SCM と同型のもので、FEL セクションの最上流でオプティク



Figure 3: Photos of the Libera Spark ELs and frequency down converter.

スマッチング等に利用される。その他の 6 台 (#21A-C, #23A-C) はアンジュレータ内でのビーム位置とプロファイルの観測を目的としており、各アンジュレータダクトに 3 台ずつ設置された。アンジュレータダクトの開口は、短径 7.8 mm、長径 50 mm の非常に扁平な楕円型となっているため、ダクト側面に設けた ICF34 ポートから挿入できる小型の SCM を新たに開発した。図 4(a)(b) に開発したアンジュレータ用小型 SCM の全体写真とダクト内の模式図を示す。この SCM では、圧空式の直線導入機によりスクリーンをビーム軌道に対して 45° の角度で挿入する。これを 90° 方向に設けられたビューポートから観測する。スクリーン表面で反射されたアンジュレータ放射が直接カメラに入射するのを避けるため、スクリーンの挿入ポートはビューポートに対して上流側の 45° 方向に設けられた。すなわち、ビームの入射面とは反対側の面を観測することになるが、スクリーンとして厚さ 0.1 mm の Ce:YAG セラミックス (以下 YAG シンチレータ) を使用するため、観測されるビームプロファイルへの影響はほぼ無視できる。チャージアップ防止のため、YAG シンチレータのビーム入射面には $30\ \text{\AA}$ のアルミコーティングが施されている。導入機のシャフト先端に取り付けるスクリーンホルダは、自重によるシャフトのたわみを軽減するため軽量のアルミ合金で製作し、その開口は $30\ \text{mm} \times 4\ \text{mm}$ の横長のレーストラック型となっている (図 4(c) 参照)。これを 45° の角度で挿入するため、ビームから見た開口の大きさは $21\ \text{mm} \times 4\ \text{mm}$ である。スクリーンを挿入した状態でのホルダとダクト内面間の最小距離は、ダクトの開口が楕円型であることもあり、設計値でおよそ 0.8 mm しかない。したがって、導入機のストロークには $\pm 3\ \text{mm}$ の調整しろを設けるとともに、シャフトの角度を大気側から調整できる機構も設けた。スクリーン観測用の光学系は他の SCM と同様、ビューポートの直後に置かれた 1 枚の平面ミラーを介して GigE カメラ (Allied Vision Technologies, Mako G-030B) により観測する構成となっている。ただし、他の SCM より作動距離が長く、被写体のサイズも小さいことから、比較的焦点距離の長い望遠レンズが必要であった ($f75 \times 1.5$)。最終的なセットアップにおける画素分解能は $40\ \mu\text{m}/\text{pixel}$ 程度となった。

廃止した 2 台は、周長補正シケインの中央で使用していたステッピングモーター駆動の無段式 SCM と、旧

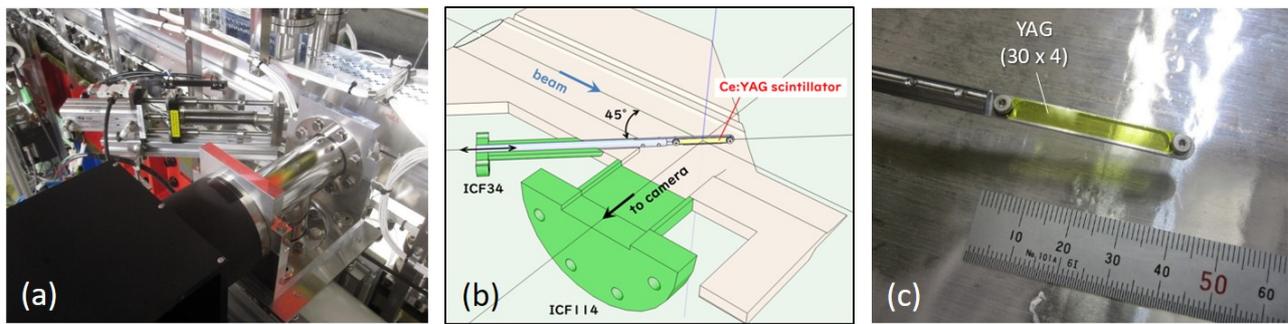


Figure 4: Photo and schematic drawing of the screen monitor for undulator (a)(b), and photo of its screen holder (c).

LCS 衝突点の光共振器チェンバーで使用していた 2 段式 SCM である。上述したように、これらは今回の FEL 設置に伴いチェンバーごと撤去された。スクリーンの制御回路やケーブル、カメラ、光学部品の一部は、新設した SCM に再利用された。

移設した 3 台 (#20, #22, #24) については、チェンバー内の 2 段式スクリーンホルダを改造して機能の拡張を図った。U#01 の入口に移設した SCM#20 では、ホルダ下段に付けていた OTR ターゲット (アルミコーティング付きシリコンウェハ) を取り外し、上段の YAG シンチレータ背面にある 45° ミラーを延長して上下段共通の大型ミラーに変更した。図 5(a) に SCM#20 用ホルダの写真を示す。ミラーの材質は厚さ 1 mm の SUS304 であり、両面とも鏡面仕上げされた後、下流側の面にのみ赤外領域での反射率を高めるための金コーティングが施された。また、ホルダ下段の中央にあたる位置には、ミラーを挿入した状態でも下流のアンジュレータにビームを通せるよう、短径 8 mm, 長径 11.3 mm の楕円穴が設けられた。ビームから見た穴の開口は直径 8 mm の円形となる。この穴開き金コートミラーを利用すれば、従来の YAG シンチレータによる SCM としての機能はそのままに、2 台のアンジュレータへ向けてアライメント用レーザーや赤外光を導入することが可能となる。実際に、2020 年の 3 月と 6 月に行われた FEL のコミッショニング前には、このミラーを利用して He-Ne レーザーを導入し、アンジュレータ用スクリーンのオフセット測定や赤外光検出用光学系のアライメントが行われた。将来的には外部レーザーや出力光のフィードバックによるシード光導入への利用も検討されている [12]。

一方、U#01 と U#02 それぞれの出口に移設した SCM#22, #24 には、従来の YAG シンチレータに加えて各アンジュレータからの出力光を検出器側へ取り出すための大口径ミラーが設置された。ミラーの材質は上述した光導入ミラーと同じであるが、鏡面仕上げと金コーティングは上流側の面のみに施された。ミラーでのビームロスを抑えるため、中心にはやはりビーム視点で直径 8 mm の円形穴が設けられた。GENESIS [13] によるシミュレーションによると、この穴で切り取られる出力光の割合は、U#01 が 28%, U#02 が 5% 程度と見積られる。また、ミラーの設置場所で予測される出力光の空間分布を考慮すると、ミラーの開口は従来の 28 mm×28 mm から 50 mm×50 mm 程度にまで広げる必要があった。し

かしながら、2 段式スクリーンホルダの挿入位置は再利用する直線導入機のストロークで決まっているため、下段のミラーの開口を拡げると、その分上段の YAG シンチレータの開口を狭めざるを得ない。このような制約の下で新規製作したスクリーンホルダの写真を図 5(b) に示す。できるだけ開口を狭めるような構造を避け、かつ駆動時にチェンバー内の周辺部品と干渉しないよう設計した結果、下段ミラーの開口として 46 mm×50 mm を確

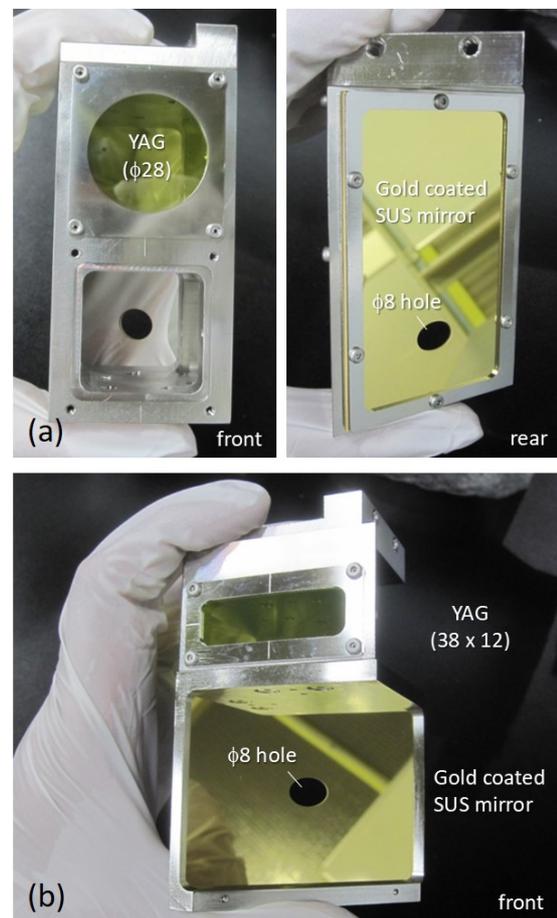


Figure 5: Photos of the screen holders for SCM#20 (a) and SCM#22/#24 (b).

保することができた。これに伴い、上段の YAG シンチレータの開口は 38 mm×12 mm となったが、直前のアンジュレータ用スクリーンの開口が 21 mm×4 mm であることを考えると、そこからのビームの発散を考慮しても大きさとしては十分である。YAG の蛍光とアンジュレータの出力光では取り出す方向が 180° 異なるため、上段と下段ではミラーの向きが 90° 異なっている。なお、これら 2 台の SCM チェンバーは、元々隣接する電磁石と共通の架台から支持されていたため、移設にあたっては独立の専用架台を 2 基新調する必要があった。

2.3 ビームロスモニター (BLM)

cERL では、応答速度を重視したインターロック用と検出感度を重視した診断用の 2 種類の BLM を使用しているが、今回の改造では後者を 4 台増設した。診断用 BLM の検出ヘッドは、TI をドープした CsI シンチレータと高圧電源を内蔵した小型の光電子増倍管モジュール (浜松ホトニクス, H10721) で構成されている。ビームロスの検出信号は、加速器室外に設置されたデジタイザ (横河電機, SL1000/720211) により電圧波形として測定される。垂直方向の開口が非常に小さく制限されている FEL セクションでのビームロスを最小化するため、4 台の BLM は各アンジュレータダクトの前後に 1 台ずつ設置された。次章で示すように、上述した穴開きミラー挿入時のビームロス検出にも有用である。

2.4 その他のビームモニター・関連機器

オプティクスマッチングやビームパラメータの測定に使用する一部の SCM には、カメラの画素が飽和するのを避けるため、透過率の異なる 5 種類の ND フィルターを遠隔で切り替えられる“ND フィルターチェンジャー”を設置している。このチェンジャーはスクリーン観測用光学系の光軸に合わせて小型化した特注品で、市販のリアルイーサネットコンバータを利用すれば EPICS から制御できる。これまでに 10 台設置して利用してきたが、今回の改造でさらに 5 台増設した。新たにチェンジャーを設置したのは SCM#15, #19A, #20, #26, #27 の 5 ヶ所で、アーク部の 3 台はエネルギー拡がりの精密測定、FEL セクション入口の 2 台はオプティクスマッチングに利用される。

また、図 2 にあるとおり、元々南直線部に設置されていた直流ビーム電流トランス (DCCT) を少し上流へ移設する予定であったが、移設後に DCCT ダクトのセラ

ミックブレイク付近で真空リークが見つかったため、急遽ダミー管と入れ替えた。これまでの運転ではビームの平均電流が少なかったこともあり DCCT を使用していなかったため、今回の改造で撤去しても今後の運転に支障はない。ビーム電流の測定は、これまでと同様、基本的にファラデーカップ (FC) を使用して行われる。

その他の CT や FC は今回の改造区間に含まれておらず、総数や配置に変更はなかった。

2.5 改造後のビームモニター総数

表 1 に改造後における各ビームモニターの総数をまとめた。括弧内の数字は今回の改造での変化量である。

Table 1: Total Number of Each Beam Monitor After the FEL Installation

Monitor	Quantity
BPM (Stripline/Button)	47 (±0)
SCM (Ce:YAG/OTR)	40 (+5)
BLM (CsI/Tl:CsI)	23 (+4)
CT	4 (±0)
DCCT	0 (-1)
FC (Movable/Dump)	6 (±0)

3. FEL コミッショニングでの使用例

前章で述べた各ビームモニターは、2020 年の 3 月と 6 月に行われた FEL のファーストコミッショニングで使用され、期待されていた性能を示すとともに、そのスムーズな進行に大きく貢献した [14]。ここでは、今回新たに開発したアンジュレータ用 SCM の使用例を 2 つ紹介する。

図 6 は、U#01 で発生した赤外光が初めて観測されたときの同アンジュレータ内におけるビームプロファイルである。図中に示した黄色い枠がカメラから見たスクリーンホルダの開口であり、21 mm×4 mm の範囲に相当する。ビームはアンジュレータのほぼ中心を水平に通過しており、長手方向の中央でウェストを結ぶように集束されていることが分かる。なお、スクリーンホルダの開口部周辺に写り込んでいる迷光は、YAG シンチレータからの蛍光がホルダフレームやダクト内面で反射されて生じたものである。

図 7 は、U#01 の出口に移設した SCM#22 の穴開きミ

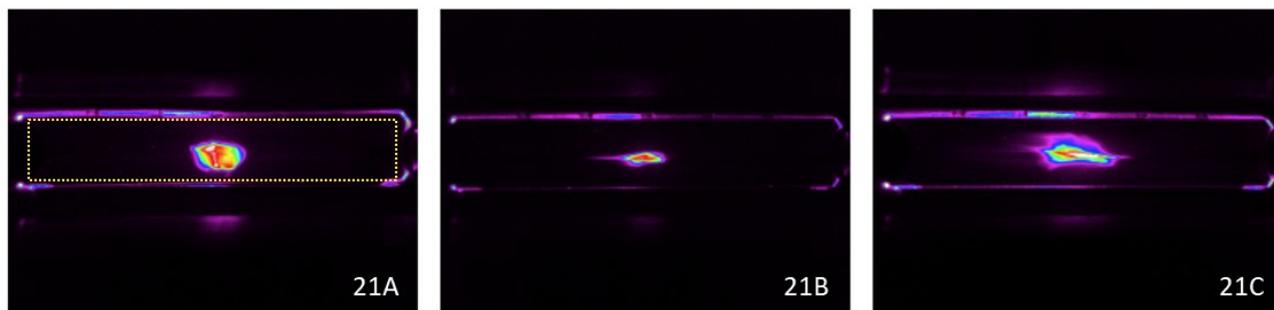


Figure 6: Beam profiles in the undulator chamber when an infrared light from U#01 was observed for the first time.

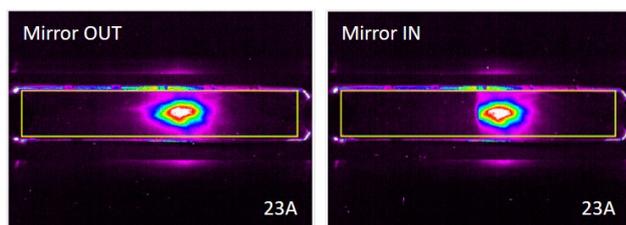


Figure 7: Beam profiles obtained before and after inserting the perforated mirror of SCM#22.

ラー挿入前後における SCM#23A でのビームプロファイルである。穴開きミラーの挿入により、ビームプロファイルの左端（周回部の外側に対応）が円弧状に欠けていることが分かる。このとき、SCM#22 の直上流に設置した BLM も反応しており、ビームを全ロスさせた場合のおよそ 10% にあたる振幅の出力信号が得られていたことから、ビームの一部を直径 8 mm の穴の縁で削ってしまっていたと判断できる。U#01 出口にある水平方向の補正電磁石を使用してビームプロファイルが欠けないよう軌道調整すると、BLM で検出されていたビームロスが解消することも確認された。

4. まとめ

cERL 南直線部に 2 台のアンジュレータから成る SASE 型 FEL が設置されたのに伴い、ビーム診断系も一部改造された。BPM については既存品の移設のみで総数の増減はなかったが、アンジュレータ区間のビーム位置精密測定用に市販の信号処理回路である Libera を 3 台導入した。SCM は 7 台新設、2 台廃止、3 台移設となり、計 5 台の増設となった。特に、垂直方向の開口が 7.8 mm、ビーム進行方向の長さが 3 m と非常に狭長なアンジュレータダクトには、新たに開発した小型 SCM を 3 台ずつ設置し、アンジュレータ磁場中でのビーム位置とプロファイルを観測できるようにした。また、アンジュレータ前後の 2 段式スクリーンホルダには、従来の YAG シンチレータと切り替えられる形で赤外光導入／取り出し用の穴開き金コートミラーを取り付けた。他にも BLM や ND フィルターチェンジャーを増設し、2020 年 3 月と 6 月に行われた FEL のファーストコミッションングではその進捗に大きく貢献した。

謝辞

ビーム診断系を改造するにあたり、その配置や仕様の立案・検討は、筆者らを含む cERL コミッションングチームで行いました。また、東日本技術研究所の路川徹也氏、亀田吉郎氏には、改造した各ビームモニターのソフトウェア開発を担当していただきました。この場を借りて、皆様に深く感謝申し上げます。なお、この成果は、

NEDO「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」プロジェクトによる委託業務、及び 2019 年度日米科学技術協力事業（高エネルギー物理分野）による支援の結果得られたものです。

参考文献

- [1] M. Akemoto *et al.*, “Construction and commissioning of the compact energy-recovery linac at KEK”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 877, pp. 197–219 (2018).
- [2] Y. Honda *et al.*, “High-efficiency broadband THz emission via diffraction-radiation cavity”, Phys. Rev. Accel. Beams 22, 040703 (2019).
- [3] Y. Morikawa *et al.*, “New Industrial Application Beamline for the cERL in KEK”, Proceedings of IPAC2019, Melbourne, Australia, May 19-24, 2019, paper THPMP012, pp. 3475-3477.
- [4] N. Higashi *et al.*, “Construction of cERL-FEL”, presented at the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Japan, Sep. 2-4, 2020, paper THPP65, this conference.
- [5] K. Tsuchiya *et al.*, “Magnetic adjustment of the tandem undulators for the cERL-FEL”, presented at the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Japan, Sep. 2-4, 2020, paper FRPP59, this conference.
- [6] T. Akagi *et al.*, “Narrow-band photon beam via laser Compton scattering in an energy recovery linac”, Phys. Rev. Accel. Beams 19, 114701 (2016).
- [7] N. Nakamura *et al.*, “Performance and operation of a chicane magnet for the cERL IR-FEL”, presented at the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Japan, Sep. 2-4, 2020, paper WEPP60, this conference.
- [8] D. Naito *et al.*, “Development of a compact deflecting cavity to measure the longitudinal bunch structure in cERL”, presented at the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Japan, Sep. 2-4, 2020, paper WEPP59, this conference.
- [9] R. Takai *et al.*, “Design and Initial Commissioning of Beam Diagnostics for the KEK Compact ERL”, Proceedings of IBIC2014, Monterey, CA, USA, Sep. 14-18, 2014, paper MOCYB2, pp. 7-11.
- [10] <https://www.i-tech.si/products/libera-spark-el/>
- [11] <https://epics-controls.org/>
- [12] Y. Honda *et al.*, “Options for upgrading IR-FEL at cERL”, presented at the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, paper WEPI021, unpublished.
- [13] <http://genesis.web.psi.ch/>
- [14] R. Kato *et al.*, “Development of mid-infrared free-electron laser based on cERL and its lasing experiment”, presented at the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Japan, Sep. 2-4, 2020, paper THOT07, this conference.