

## cERL のラスタリングシステム

### RASTERING SYSTEM WITH INTERLOCK FOR THE BEAM DUMP OF CERL

原田 健太郎<sup>#</sup>, 中村 典雄, 帯名 崇, 島田 美帆, 宮島 司,  
本田 洋介, 野上 隆史, 谷本 育律, 本田 融, 高井 良太

Kentaro Harada<sup>#</sup>, Norio Nakamura, Takashi Obina, Miho Shimada, Tsukasa Miyajima,  
Yosuke Honda, Takashi Nogami, Yasunori Tanimoto, Tohru Honda, Ryota Takai  
Accelerator Laboratory, KEK

#### Abstract

At the ERL, the used electron beam is decelerated by the main LINAC, extracted from the recirculation path by the dump chicane, and finally collected by the beam dump. The beam dump is the water cooled copper block with cone shape hole. With slopes of the dug cone, effectively larger area catches the electron beam. But for the larger beam current operation as 1mA in average, the heat load is very severe. In order to protect the beam dump, the rastering system is required. The rastering system shakes the electron beam and the beam hit all over the beam dump during one period. In this presentation, the rastering system and interlock system that watches the operation of the system are shown.

#### 1. はじめに

cERL[1]では周回部を通して主 LINAC で減速された後、電子ビームはダンプシケインでダンプラインに向けて取り出され、最終的にビームダンプで回収される。電子ビームが直接当たるビームダンプは、円錐状の穴をあけた水冷の銅ブロックで、電子ビームの熱負荷を分散させる為、ビームを斜めに受けて実効的な表面積を大きくするように設計されているが、それでも大電流の場合、1カ所に継続して電子ビームが当たり続けると発熱の問題が生じる。そこで、ビームダンプの局所的な熱負荷低減の為に、電子ビームを縦横とも AC 的に振ってビームダンプ全体(または十分広い領域)に均等に電子ビームが当たるようにするという、ラスタリングシステムが必要となる。また、大電流運転時[2][3][4]にはラスタリングシステムに不具合が生じた時にビームを止めるインターロックシステムも重要である。ここでは、cERL 用に開発したラスタリングシステムおよびそのインターロックについて発表を行う。

#### 2. ラスタリングシステムの概要

cERL のダンプラインの機器配置を Figure 1 に示す。図中の(a)がラスタリング用のステアリング電磁石 (Figure 2) で、コアは0.5mm厚の硅素鋼板の積層でコア長3cm、コイルは76巻でインダクタンス3mH、最大電流5Aで設計上、6MeVの電子ビームを20mrad 蹴ることができる。(今回の運転時の減速後の電子ビームのエネルギーは2.9MeVである。) (b)は BPM(beam position monitor)、(c)がビームダンプで、ダンプにはスクリーンモニタとファラデーカップが設置されている。ラスタリング電磁石からダンプまではおよそ3m、4極の効果を考えなければ6MeVで片幅約20cm振れることになる。実際の運転では、ダンプのオプティクス調整の為に下流の4極電磁石を変更した場合、ラスタリング電磁石の電流値の再調整が必要であった。真空ダクトは厚さ2mmのSUS製で、高

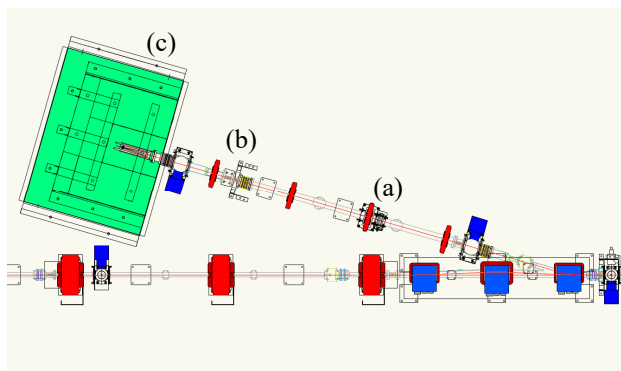


Figure 1: Layout of dump line of cERL. (a) is the fast steering magnet for rastering, (b) BPM and (c) the beam dump.

周波の磁場に対しては減衰や位相の遅れが大きくなるが、今回の10Hz程度であれば問題はない。

電磁石および電源は、東京大学高輝度光源計画の為に速い軌道フィードバックの為に電磁石および電源の試作品が再利用された。制御系は新規に購入、インターロック検出モジュールについても新規に設計製作されたものである。

制御系を Figure 3 に示す。電流波形は任意波形発生器に記憶させており、運転中の調整は振幅と周波数のみとした。任意波形発生器の出力をそのまま電源の電流設定端子に入力し、電源の電流モニタ出力をオシロスコープおよびインターロックモジュールに入力し、動作確認を行っている。

なお、ダンプの熱負荷低減の為に、オプティクスのビームを広げるという選択肢もあるが、減速後のビームプロファイルの歪みやエネルギー広がりの影響を考えると、ビームはある程度絞っておいて、全体に振ってばらまく方がよいと考え、ラスタリングを導入することとした。

<sup>#</sup> kentaro.harada@kek.jp

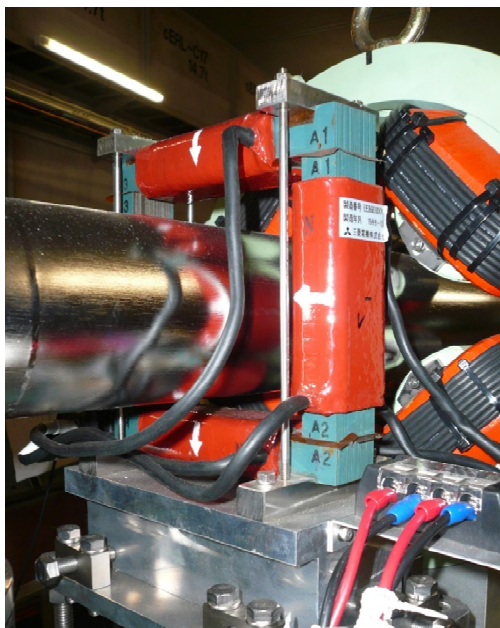


Figure 2: Fast steering magnet for rastering.

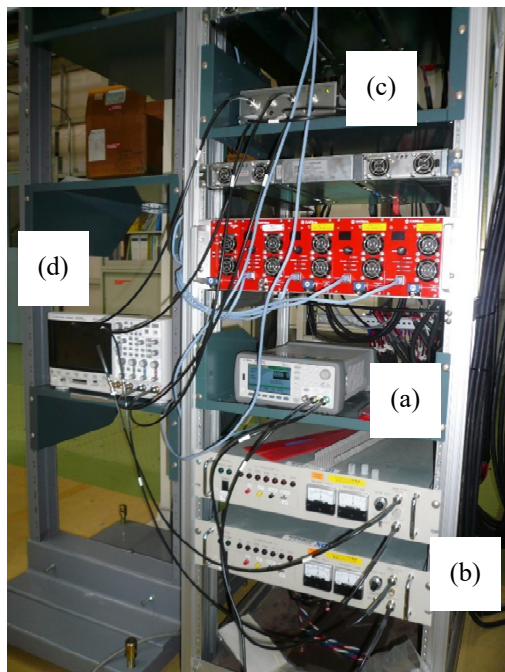


Figure 3: Control system for the rastering. (a) is the function generator, (b) the fast power supplies for the horizontal and vertical coils, (c) the interlock module and (d) the oscilloscope for the current monitor.

### 3. ラスタリング波形

ラスタリング波形を Figure 4 に示す。(a)は XY 平面内にプロットした電流パターンで、実際のビームの動きに相当する。(b)は電流のパターンで、水平コイル用と垂直コイル用のそれぞれの電源設定に対するものである。図で

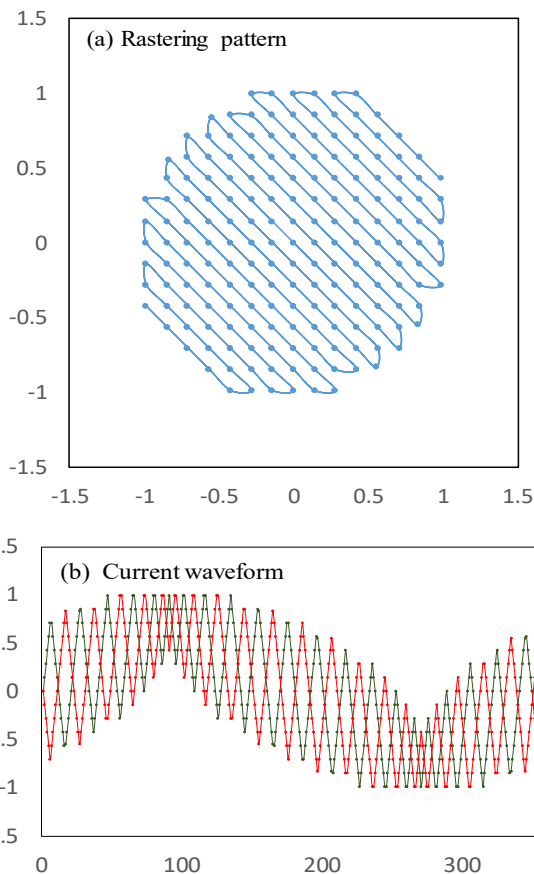


Figure 4: Rastering pattern and the magnetic current waveform.

は最大振幅が 1 になるように規格化してある。任意波形発生器には 1 周期を 360 点に分割してデータを登録した。実際の出力はスムージングを ON にし、滑らかになるようにしてある。

電磁石に対して 45 度傾けたパターンとすることで、水平と垂直の波形が対称となり、周波数を一致させることができる。これにより、減衰や位相遅れも等しくなるとともに、インターロックの検出のための波形検波も容易となる。

ラスタリング電磁石からビームダンプまでに間に非線形磁場要素はないので、4 極に対する補正は水平と垂直の振幅を独立に変えるだけで十分である。

### 4. インターロック検出

大電流運転の場合、ラスタリングに異常が発生した場合はビームを止める必要があり、その為のインターロックモジュールの試験も行った。今回の試験では、ラスタリングの周期は 10Hz、1 周期の中の細かい波形はおよそ 200Hz になる。パターンを全体として見ると、AC 的になる部分と DC 的になる部分、DC オフセットありの AC になる部分がある。考えられる動作異常についても、電源が落ちて AC、DC ともゼロになる場合、今回は使っていないが、タイミングやクロックが落ちて、DC オフセットのみになる場合など、いろいろなケースが考えられ、すべての場合に素早く動作するインターロックを作ることは容易ではない。すなわち、インターロックモジュールにも波形デー

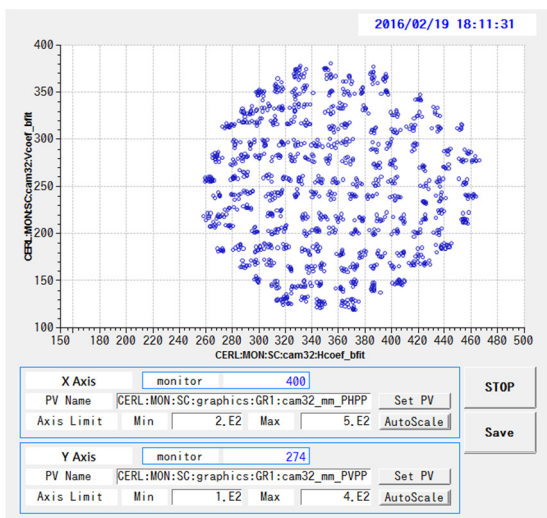


Figure 5: Rastering pattern measured at the screen monitor of the beam dump.

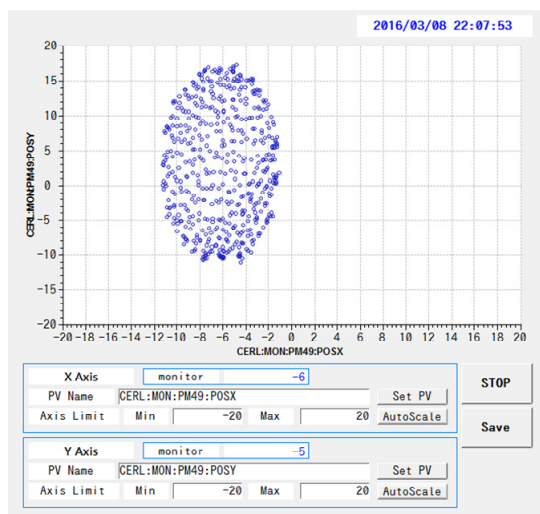


Figure 6: Rastering pattern measured by the BPM during 1mA operation.

タを読み込ませ、随時比較するのでなければ本当の速いインターロックは不可能である。波形データを考えずに検出する場合、最長で 1 周期分かかってしまうことが避けられない。

今回のインターロックモジュールでは、包絡線ともいべき 10Hz のゆっくりした動きと、内部の約 200Hz の速い動きとを独立して検出する様に回路を設計した。10Hz のゆっくりした平均波形に対しては、まず初段で DC カットし、AC 成分の平均電圧にする。ゼロクロス付近で異常とされないよう、時定数を調整することで、インターロックとすることができる。200Hz の速い波形に対しては、AC 成分だけを取り出した波形を過大に増幅(飽和させて矩形的にする)し、速い AC の ON/OFF ともいべき信号を作る。その、AC ON 状態信号と 100kHz のクロック信号との AND 信号を作り、それをある時定数で平均して検出する

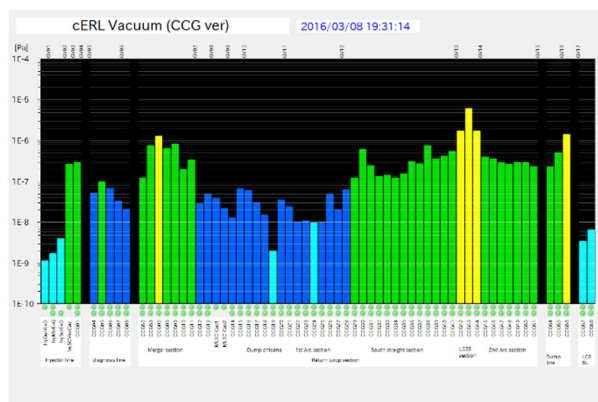


Figure 7: Vacuum pressure distribution during 0.9mA beam test.

ことにした。増幅率と時定数の 2 つのパラメータをうまく調節することで、パターンの端の振れ幅が小さいところを検出せず、一方で AC 的波形が落ちた場合に 10Hz よりも速く検出することができる。どのタイミングでどのように落ちるかで、異常発生から検出までの時間にばらつきが生じることは避けられない。

今回の試験では具体的な素早さの測定は行わなかったが、電流モニタとインターロック出力信号を同時にオシロスコープに入れ、インターロック側にトリガをかけて観測することで、電源異常の際は 1 周期よりも必ず速く検出できていることは分かった。

## 5. ビーム調整

施設検査に向けたビーム調整において、ラスタリングの動作試験とパラメータ決定を目的として、BPM およびスクリーンモニタによって、ラスタリング動作時のパターンを観測した。スクリーンモニタはバーストモード(小平均電流のパルスモード)の時だけ使用可能である。また、モニタはバースト、CW(リターンビーム検出用のギャップありだが、3GHz 連続、平均大電流モード)によらずに 5Hz で動作する。ラスタリング周波数を 9.99Hz、すなわち任意波形発生器の設定を 3596.4 点/sec とすることで、エイリアシングが発生し、ラスタリングパターン全体をゆっくりだが観測することができる。

バーストモードでのビーム調整中の、スクリーンモニタによる観測データを Figure 5 に示す。水平垂直の振幅を調整することで、ダンプではほぼ円形にラスタリングすることができている。パターンの大きさはダンプ上で約 14mm x 14mm、電流設定波形の振幅(10V が 5A に相当)は水平 1.5Vpp、垂直 1.125Vpp であった。

Figure 6 に 0.9mA 大電流試験時(2016 年 3 月 8 日、施設検査当日)のラスタリング中の BPM での観測データを示す。ビームダンプは設計上、直径 4cm で 40kW 受けられることになっている。2.4MeV、1mA の電子ビームの場合、直径 1.3cm 以上のラスタリングが必要である。オプティクス調整後のビームサイズはダンプで水平 2.5mm、垂直 1.6mm 程度である。試験開始時、直径 2cm を目標に水平 2Vpp、垂直 1.5Vpp の場合も試験したが、ダンプでの放射線モニタ値が上昇した為、事前の調整値同様

の直径 1.4cm で調整が行われた。検査合格後の運転時にも同じパラメータとしている。Figure 7 に 0.9mA での真空のグラフを示す。真空圧力の増大はラスタリングによって抑制でき、およそ  $1.6 \times 10^{-6}$ Pa となった。

## 6. 今後の課題

動作異常時のインターロック検出器を含むラスタリングシステムを構築し、実際にビーム試験を行い、0.9mA 運転時に熱負荷分散をすることができた。今後、さらに大電流の運転を目指す場合、インターロックの精密化、高速化、その為にも周波数の高速化が必要となる。その為には、インターロックモジュールの信頼性及び速度試験、ビームダクトのセラミック化、ビーム診断系の高速化などが今後の課題となる。

## 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] 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.
- [3] 坂中 章悟 他, “コンパクト ERL におけるビーム電流約 1 mA の運転”, this conference, WEOM15.
- [4] 宮島司 他, “cERL コミッショ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.