

コンパクト ERL の赤外 FEL 用シケイン電磁石 の性能と運転

PERFORMANCE AND OPERATION OF A CHICANE MAGNET FOR THE CERL IR-FEL

中村典雄^{#, A, B)}, 東直^{A)}, 原田健太郎^{A)}, 島田美帆^{A)}, 満田史織^{A)}, 高木宏之^{A)}, 長橋進也^{A)},
 本田洋介^{A)}, 田中織雅^{A)}, 帯名崇^{A)}, 加藤龍好^{A)}, 魯垚^{B)}
 Norio Nakamura^{#, A, B)}, Nao Higashi^{A)}, Kentaro Harada^{A)}, Miho Shimada^{A)}, Chikaori Mitsuda^{A)}, Hiroyuki Takaki^{A)},
 Shinya Nagahashi^{A)}, Yosuke Honda^{A)}, Olga Tanaka^{A)}, Takashi Obina^{A)}, Ryukou Kato^{A)}, Yao Lu^{B)}
^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
^{B)}The Gradual University for Advance Studies (SOKENDAI)

Abstract

A chicane magnet is placed between two IR-FEL undulators in the compact ERL (cERL) and used for improving performance of the cERL IR-FEL. The chicane magnet can increase the output power of the IR-FEL by converting the energy modulation to the density modulation in an electron bunch. It consists of three dipole magnets with laminated yokes made of 0.1-mm-thick permalloy sheets and the coil currents of the three magnets are independently controlled by three power supplies with the maximum current of 10 A. The maximum closed orbit bump made by the chicane magnetic field has the longitudinal dispersion (R_{56}) of -6 mm. The current ratio of the dipole magnets was tuned after installation to make its orbit bumps closed and then the chicane magnet was used for the FEL operation. The FEL output power was found to increase significantly by use of the chicane magnet.

1. はじめに

シケイン電磁石は FEL においてアンジュレータ間に置かれ、Fig. 1 のように電子バンチ内のエネルギー変調を波長間隔の密度変調に変換すること（マイクロバンチング）によって FEL 出力を高めることができる。コンパクト ERL (cERL) の赤外自由電子レーザー (FEL) [1, 2]において、FEL 性能を向上するためにシケイン電磁石を 2 台の FEL アンジュレータの間に設置した (Fig. 2)。このシケイン電磁石はヒステリシスの小さい積層パーマロイのヨークを持つ 3 つの偏向電磁石で構成され、バンパ軌道を作る偏向電磁石の磁場はコイルに電流を供給する 3 つの電源によって独立に制御できる。ここではシケイン電磁石の性能と運転結果について報告する。

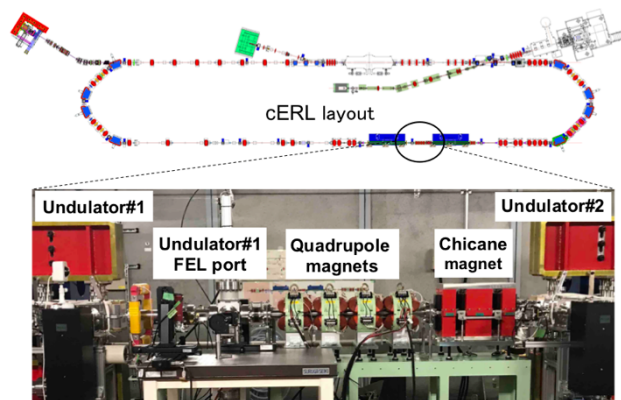


Figure 2: Layout of cERL components including the chicane magnet between the two FEL undulators.

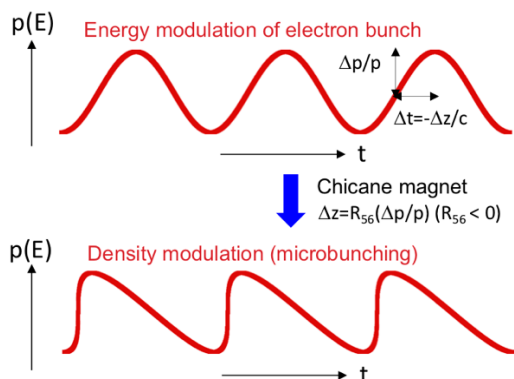


Figure 1: Schematic illustration of the effect of the chicane magnet in an FEL. R_{56} means the longitudinal dispersion of the chicane magnet.

2. シケイン電磁石の構造・仕様

本電磁石はもともと偏光制御軟 X 線アンジュレータ用移相器 (phase shifter) のプロトタイプとして開発されたものをシケイン電磁石として再利用している [3]。Figure 3 に cERL に設置後のシケイン電磁石の写真を示す。シケイン電磁石はヨーク長が 7 cm, 14 cm, 7 cm の 3 台の H 型偏向電磁石 (上流から順に BMIS01, 02, 03 と呼ぶ) をビーム進行方向に 6 cm ずつのスペースを空けて並べた構造で、電磁石は上下で半割できる。上下のヨークは Fig. 4 に示すように同一断面形状の 0.1 mm 厚積層パーマロイで製作されている。ヨーク磁極間のギャップは 32 mm で、磁場の一様性を広く確保するために幅 50 mm の上下磁極面にシム構造 (ビーム側に幅 10 mm、その反対

側に幅 8 mm、高さ 1 mm となる台形の凹み) が設けられている。使用されたパーマロイは、高透磁率かつ低渦流損失の PC 系で、最大比透磁率約 400000、飽和磁束密度約 0.75T である。そのため、通常のヨーク材 (純鉄やケイ素鋼板) と比べて磁場の再現性に優れている。



Figure 3: Chicane magnet installed in the cERL.

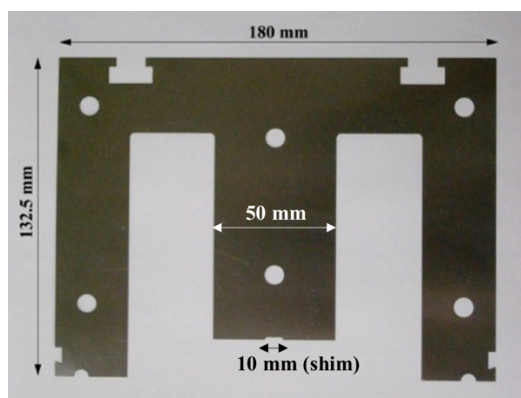


Figure 4: 0.1-mm-thick permalloy sheet for the chicane magnet yokes.

Table 1: Specifications of the Chicane Magnet

Yoke	
Material	0.1mm-thick permalloy lamination
Permeability	400000 (max.)
Saturation field	0.75 T
Adhesive insulation	Varnish
Coil	
Turn number	168
Material	Rectangular copper wire (2 x 3 mm)
Adhesive	Epoxy resin
Current per turn	10 A (max.)

コイルは 1 偏向電磁石当たり上下 2 個あり、平角ノーマックス銅線 (2 mm x 3 mm) が 168 ターン巻かれ、エポキシ樹脂で固められている。製作当初は

直径 2 mm のエナメル銅線 300 ターンのコイルを使っていたが、コイルのインピーダンスを下げる目的で現在のものに交換している。各偏向電磁石のコイル電流は独立した電源で制御され、電源の最大電流は 10 A である。Table 1 にシケイン電磁石のヨークとコイルの仕様をまとめる。

3. 磁場分布とバンブ軌道

2008 年に測定・計算されたシケイン電磁石の中心軸上の垂直磁場分布を Fig. 5 に示す[3]。磁場測定はホールプローブを、磁場計算は 3 次元磁場解析コードを用いて行われた。Figure 5 において偏向電磁石 BMIS01, BMIS02, BMIS03 のアンペアターン(AT)はそれぞれ 1170 AT, 1400 AT, 1170 AT で、測定時は 300 ターンのコイルに対してコイル電流 $I_{\text{BMIS02}} = 4.67$ A, $I_{\text{BMIS01}} = I_{\text{BMIS03}} = 3.90$ A で行われたが、これは現在の 168 ターンに換算するとコイル電流では $I_{\text{BMIS02}} = 8.33$ A, $I_{\text{BMIS01}} = I_{\text{BMIS03}} = 6.96$ A に対応する。今回の再利用に当たって時間と磁場測定装置のビーム進行方向のストロークの問題もあって、シケイン電磁石全長での磁場測定ができなかったが、 $I_{\text{BMIS02}} = 4.67$ A, $I_{\text{BMIS01}} = I_{\text{BMIS03}} = 3.90$ A に対してシケイン電磁石中央から ± 160 mm の範囲で測定した軸上磁場は Figure 5 の測定磁場にコイル比 ($168/300=0.56$) をかけた値と良い一致を示した。

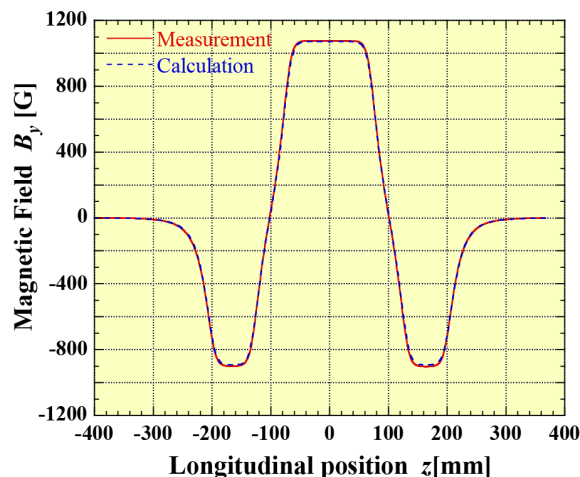


Figure 5: Measured and calculated magnetic fields of the chicane magnet along the center axis for 1400 AT of BMIS02 and 1170 AT of BMIS01 and BMIS03 [3].

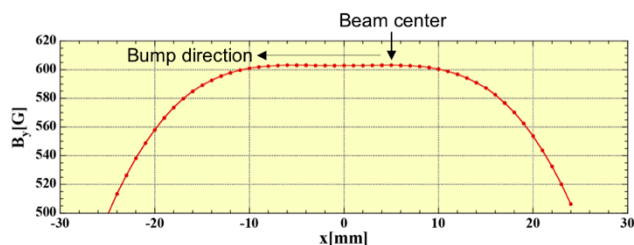


Figure 6: Horizontal distribution of the measured vertical magnetic field at the center of BMIS02 for $I_{\text{BMIS02}}=4.67$ A. The chicane magnet was installed so that the magnetic center was separated from the beam center by 5 mm.

Figure 6 に $I_{\text{BMIS02}}=4.67$ A での BMIS02 中央での水平方向の垂直磁場の分布の測定結果を示す。磁場の様子は中心から ± 10 mm の範囲で 0.05% 以下を保っている。ただし、 ± 10 mm を少し越えると急激に磁場の様子が悪くなる。各偏向電磁石の励磁曲線については 10 A まで直線よく近似され、磁場の飽和は見られなかった。

シケイン電磁石磁場による水平バンプ軌道の位置 x と傾き x' は及び進行方向分散 (R_{56}) は次式で表せる。

$$x'(z) = \frac{e}{mcy\beta} \int_{-\infty}^z B_y(z_1) dz_1 \quad (1)$$

$$x(z) = \frac{e}{mcy\beta} \int_{-\infty}^z dz_2 \int_{-\infty}^{z_2} B_y(z_1) dz_1 \quad (2)$$

$$R_{56} = - \int_{-\infty}^{\infty} x'(z)^2 dz = -2\Delta L_z \quad (3)$$

ここで、 $e, m, c, \gamma, \beta, z, B_y, \Delta L_z$ は、電子の電荷と質量、光速、ローレンツ因子、電子の速度を光速で割ったもの、進行方向の位置、シケイン電磁石の垂直磁場、バンプ軌道有無での軌道長の差である。Figure 7 に、Eq. (1) と (2) より求めたシケイン電磁石のバンプ閉軌道を I_{BMIS02} の電流値とともに示す。ここで、電流比 $I_{\text{BMIS01}}/I_{\text{BMIS02}}$ は Fig. 5 と同じく 0.8357 で、この時にシケイン電磁石通過後の x と x' がほぼゼロになる。Figure 6 に示したようにビーム中心と磁場中心を 5mm ほどバンプと反対方向にずらして高いバンプ軌道での磁場の様子をなるべく損なわないようにシケイン電磁石を設置している。Equation (3) より電子エネルギー 17.5 MeV では R_{56} の値は最大磁場となる $I_{\text{BMIS02}}=10$ A で -6 mm である。 R_{56} の値は Eq. (2) からわかるように、軌道長の伸びと共に電流 (磁場) の 2 乗に比例している。

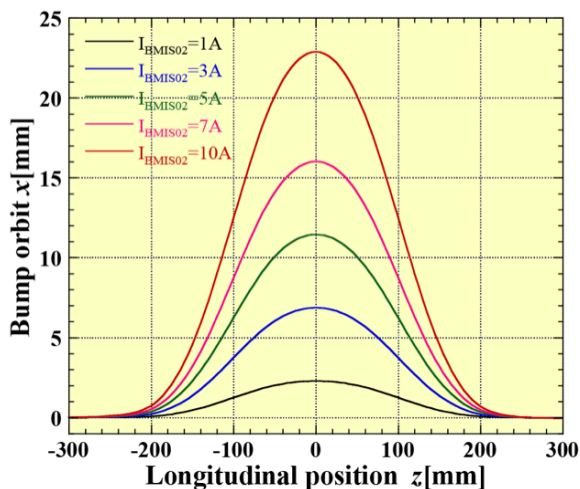


Figure 7: Bump orbit made by the chicane magnet.

4. バンプ閉軌道調整

シケイン電磁石の cERL への設置後に実際にビームを使ってバンプを閉軌道にするためのコイル電流比の調整を行った。この調整ではアンジュレータ 2 号機に取り付けられている 3 つのスクリーンモニタ

の中で最下流のもの (cam23C) を使ってビーム位置を観測し、ビーム中心位置がシケイン励磁前と同じ位置になるようにシケイン電磁石のコイル電流比を決めた。ただし、 $I_{\text{BMIS01}}=I_{\text{BMIS03}}$ として I_{BMIS02} との比 $R = I_{\text{BMIS01}}/I_{\text{BMIS02}}$ を I_{BMIS02} の関数として求めた。Figure 8 にバンプ軌道がほぼ閉じる電流比 R を電流の関数として図示し、6 次多項式の fitting 曲線と共に示す。近似された 6 次多項式は $I = I_{\text{BMIS02}}$ として、

$$R = a_6 I^6 + a_5 I^5 + a_4 I^4 + a_3 I^3 + a_2 I^2 + a_1 I + a_0 \quad (4)$$

で、 $a_0=0.83399$, $a_1=6.8774e-5$, $a_2=-5.2135e-4$, $a_3=-5.2346e-5$, $a_4=2.4306e-5$, $a_5=-3.4936e-6$, $a_6=1.3889e-7$ であった。Figure 8 からわかるように、 $I_{\text{BMIS02}}=0-6$ A で R は一定で 0.834 となった。これは、軸上磁場によるデザイン電流比である 0.8357 とほぼ一致する。他方、6 A を越えていくと電流比が小さくなる方向にずれてくる。同様に、Fig. 9 からわかるようにビームプロファイルも 6 A を越えたところで有意な変化が観測されている。この原因は、高いコイル電流でバンプ軌道が大きくなって、水平方向の磁場の様性が悪化するためと考えられる。

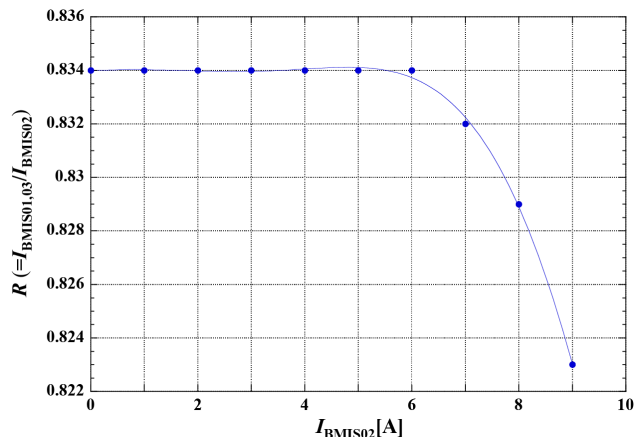


Figure 8: Current ratio of the chicane magnet as a function of I_{BMIS02} for making the bump orbit closed and the fitted sixth-order polynomial curve.

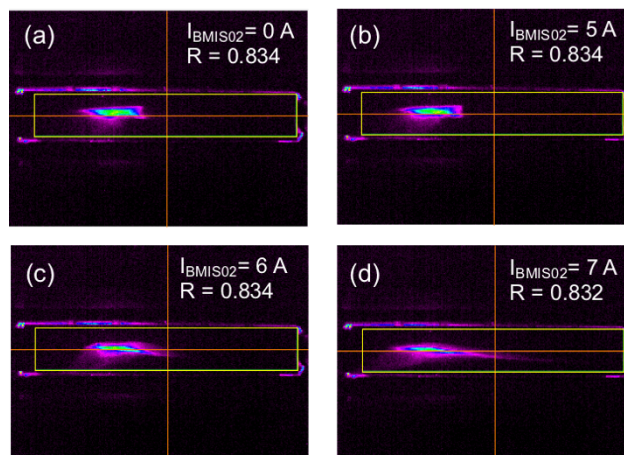


Figure 9: Beam profiles after the chicane magnet with $I_{\text{BMIS02}} =$ (a) 0 A, (b) 5 A, (c) 6 A and (d) 7 A at the screen monitor (cam23C) in the Undulator #2.

5. オプティクスへの影響

ここではシケイン電磁石の励磁によるオプティクスへの影響を調べた。Figure 10 にシケイン電磁石が励磁されていない時のアンジュレータ 1 号機入口から 2 号機出口までのベータトロン関数（設計値）を示す。2 つのアンジュレータ[4]（長さ $L_u=2.976$ m, 偏向定数 $K_u=1.421$, 周期 $\lambda_u=2.4$ cm）入口でのマッチング条件は、 $\beta_x=2.976$ m, $\beta_y=0.13$ m, $\alpha_x=1$, $\alpha_y=0$ である。シケイン電磁石励磁によって分散関数の発生とベータトロン関数のマッチングの崩れが起きる。分散関数の発生は $I_{BMIS02}=10$ A でもバンプ内で最大約 1.6 cm と小さく、バンプが閉じることで下流での分散の漏れをなくすることができる。Figure 11 にシケイン電磁石励磁によって変化するシケイン電磁石下流からアンジュレータ 2 号機出口までの垂直方向ベータトロン関数を計算した結果を示す。尚、水平方向のベータトロン関数は計算より垂直方向よりも変化が小さいことがわかっている。Figure 11 からシケイン電磁石の電流（磁場）が大きくなると、下流でのベータトロン関数の振動振幅が大きくなり、マッチングのずれも大きくなることがわかる。このずれをシケイン電磁石直上流にある 4 つの四極電磁石（QMIS07-10）で補正した場合に生じる四極電磁石 K 値の変化量 ΔK を計算した結果を 4 次多項式 fitting 曲線と共に Fig. 12 に示す。 $I_{BMIS02}=6$ A まではマッチング 4 条件を全て満たす補正が可能であるが、7 A 以上では 4 条件を全て満足できなかったために 3 条件（ $\beta_x=2.976$ m, $\beta_y=0.13$ m, $\alpha_x=0$ ）を満足する補正となっている。ここで、前章で述べた磁場の一様性の崩れについては考慮していない。

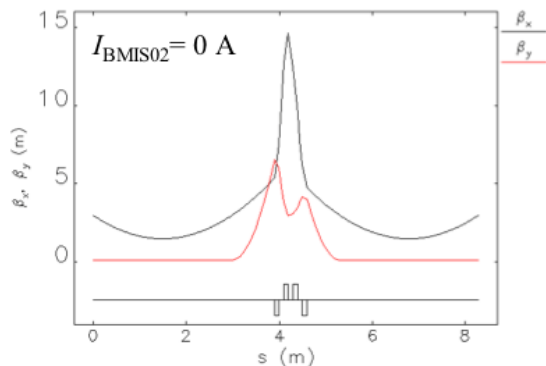


Figure 10: Horizontal and vertical betatron functions with the chicane magnet off from the Undulator#1 entrance to the Undulator#2 exit.

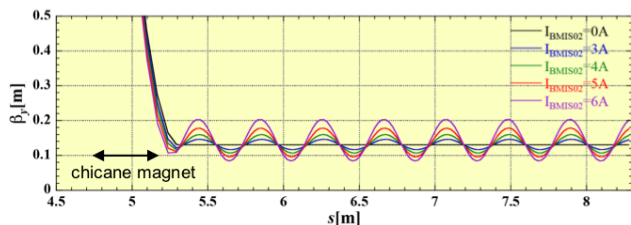


Figure 11: Vertical betatron functions from the chicane magnet to the Undulator#2 exit for $I_{BMIS02} = 0$ A, 3 A, 4 A, 5 A and 6 A.

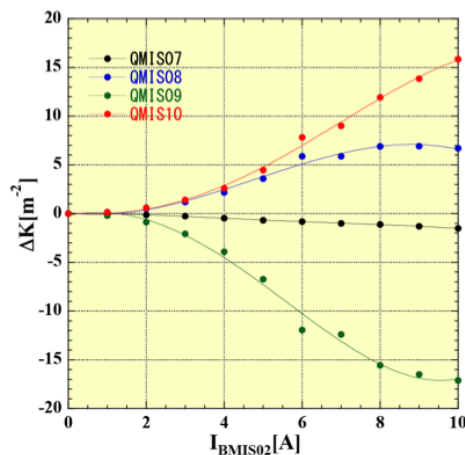


Figure 12: Correction field strengths of four quadrupole magnets (QMIS07-10) to make optics matching for $I_{BMIS02} = 0-10$ A and fitted fourth-order polynomial curve.

6. FEL 運転

シケイン電磁石は 2020 年 2 月にアンジュレータ 1 号機とともに設置され、アンジュレータ 2 号機設置後の 6 月から本格的な運転が開始された。運転に使用されたシケイン電磁石の制御画面を Fig. 13 に示す。画面左上で I_{BMIS02} の設定を行う。また、画面左下ではその I_{BMIS02} でのバンプ閉軌道の電流比 R 、 I_{BMIS01} と I_{BMIS03} の値、シケイン電磁石の R_{56} 、軌道長の伸び ΔL_z などを、右では 5 章で計算した四極電磁石によるマッチングの補正值を表示している。ただし、現状ではそれら四極電磁石の補正值の設定を自動的に は行っていない。

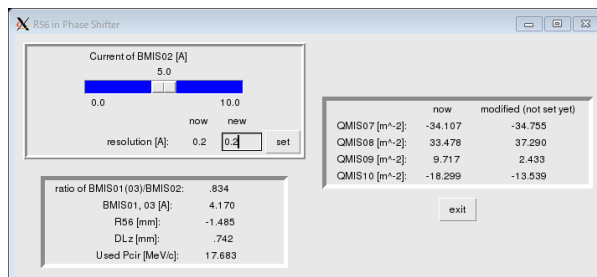


Figure 13: Control panel for the chicane magnet.

FEL 運転は、周回エネルギー約 17.5 MeV、入射エネルギー約 5 MeV、第 1 主空洞（ML1）の加速電圧は約 5 MV の on-crest 加速で行われた。第 2 主空洞（ML2）は残りのおよそ 7.5 MeV の加速を担うが、RF 位相は固定せずにいくつかの ML2 RF 位相で FEL 出力がどう変わるかを調べた。Figure 14 にシケイン電磁石を使用した FEL 運転の 1 例を示す。この運転での ML2 の RF 位相は $+2.5^\circ$ （ 0° を on crest 加速と定義）である。ビーム調整では、MCT 検出器による FEL 出力[5]が最大になるように第 1 アーク部の R_{56} 値および 2 つの六極電磁石の強度、アンジュレータでのビームの位置・角度、アンジュレータ 1 号機前や 2 つのアンジュレータ間の四極電磁石の強度等を振った。ビーム調整（FEL 出力最大化）後にシケイン電磁石の電流（ I_{BMIS02} ）も走査してそ

の依存性も測定した。Figure 15 はその時の依存性を図示したものである。シケイン電磁石の磁場強度と共に FEL 出力が有意に増加していることがわかる。

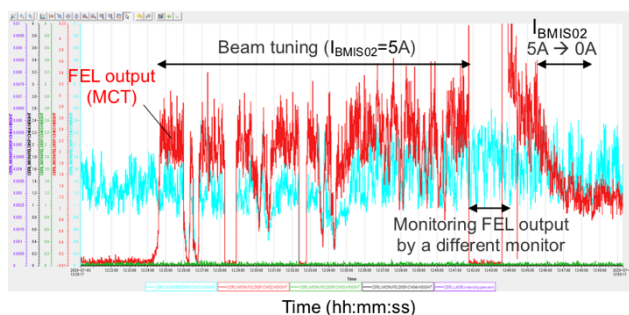


Figure 14: Example of FEL operation using the chicane magnet for the ML2 RF phase of $+2.5^\circ$. The FEL output measured by MCT is shown by red line as a function of time.

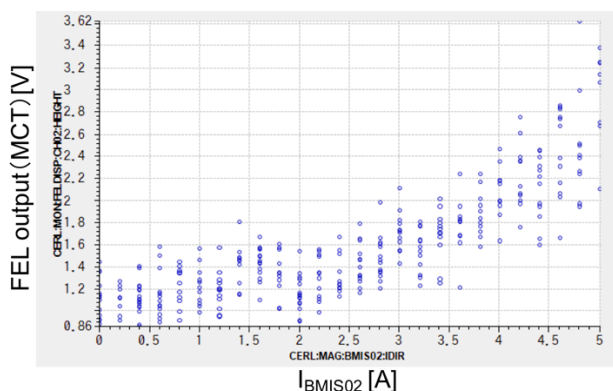


Figure 15: Dependence of the FEL output on I_{BMIS02} in the FEL operation for the ML2 RF phase of $+2.5^\circ$. These data correspond to the FEL output data for $I_{BMIS02} = 5 \text{ A} \rightarrow 0 \text{ A}$ in Fig. 13.

同様に ML2 の RF 位相を -25.5° に設定した運転で、ビーム調整後にシケイン電磁石の電流 (I_{BMIS02}) を 0 A から 8 A まで走査した時の FEL 出力を Fig. 16 に示す。ここでも、シケイン電磁石の使用によって FEL 出力が最大で 2 倍程度まで増加していることが確認できる。FEL 出力は電流 6.4 A 付近で最大となり、それ以上の電流で減少に転じているが、これは 4 章で述べた磁場の一様性の悪化が原因と考えられる。磁場の一様性が 6.4 A 以上でも確保されれば、さらに FEL 出力が増加した可能性はある。

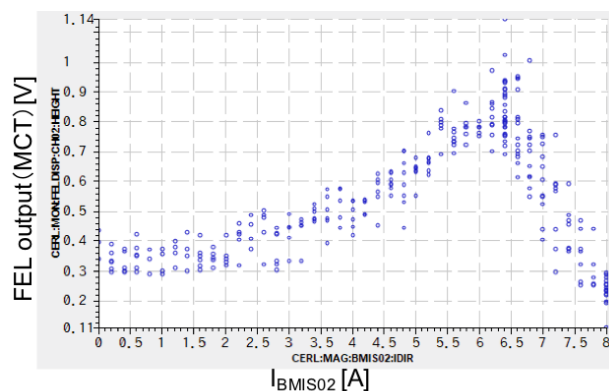


Figure 16: Dependence of the FEL output on I_{BMIS02} in the FEL operation with the ML2 RF phase of -25.5° . The FEL output had the maximum around $I_{BMIS02} = 6.4 \text{ A}$.

7. まとめ

本論文の内容をまとめると次のようになる。

- cERL FEL の出力向上を目的として、2 つのアンジュレータ間にシケイン電磁石を設置した。
- シケイン電磁石はヒステリシスの小さい 3 つの積層パーマロイ製偏向電磁石とその電源で構成されていて、最大の R_{56} は -6mm (最大電源電流 10A) である。
- バンプが閉軌道となる電流比は $I_{BMIS02} = 6 \text{ A}$ までほぼ一定であった。6 A を越えると電流比とビームプロファイルに変化が生じるが、水平方向の磁場一様性の悪化が原因と考えられる。
- シケイン電磁石の励磁によるオプティクスのマッチングの崩れはアンジュレータ間の四極電磁石によって補正可能である。
- FEL 運転において、シケイン電磁石の励磁によって FEL 出力が顕著に (最大 2 倍程度まで) 増加することを確認できた。

謝辞

本研究は NEDO 「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」プロジェクトの支援の下で行われている。

参考文献

- [1] R. Kato, “KEK コンパクト ERL の現状”, The 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sep. 2-4, 2020, FRSP01.
- [2] N. Higashi *et al.*, “cERL-FEL の建設”, The 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sep. 2-4, 2020, THPP65.
- [3] N. Nakamura *et al.*, “Phase shifter prototype with laminated permalloy yokes for a polarization controlled undulator”, Proceedings of PAC09, Vancouver, Canada, May 4-8, 2009, pp.342-344.
- [4] K. Tsuchiya *et al.*, “cERL 自由電子レーザー用アンジュレータの開発”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31 - Aug. 3, 2019, pp. 1064-1065.
- [5] Y. Honda *et al.*, “cERL 赤外自由電子レーザーにおける赤外出力光の診断”, The 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sep. 2-4, 2020, FRPP07.