

cERL の電源システム

THE POWER SUPPLY SYSTEM FOR THE COMPACT-ERL

原田 健太郎^{#,A)}, 長橋 進也^{A)}, 中村 典雄^{A)}, 上田 明^{A)}, 久米 達哉^{B)}
Kentarō Harada^{#,A)}, Shinya Nagahashi^{A)}, Norio Nakamura^{A)}, Akira Ueda^{A)}, Tatsuya Kume^{B)}

^{A)} KEK-PF

^{B)} KEK Applied Research Laboratory, Mechanical Engineering Centre

Abstract

The recirculation loop of the cERL (compact Energy Recovery LINAC) was constructed in 2013. In this paper, we show the power supply system for the recirculation loop of the cERL. The recirculation loop consists of the eight main bending magnets, sixty quadrupole magnets and ten small bending magnets for the three chicanes of the injection, extraction and circumference adjuster. The four power supplies are used for the chicane bending magnets, sixty for the quadrupoles, forty-eight for the horizontal correctors, and thirty-three for the vertical correctors. The EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) was used for the control of the power supplies.

1. はじめに

ERL(エネルギー回収型 LINAC)は電子銃、入射部、合流部、周回部、取出部、ビームダンプからなる加速器である。電子銃で生成した電子ビームを加速後、周回部を1周回させ、その後、減速し取出部でビームを取り出し、ビームダンプに打ち込む。蓄積リングと異なり、ビームは1周回しかしないため、シンクロトロン放射によるビーム品質の悪化が避けられる。

KEK の cERL (コンパクト ERL) は放射光源用 3GeV ERL (PEARL) の為の試験器として建設された小型の ERL である。電圧約 400kV の電子銃で生成した高品質の電子ビームを、入射部超伝導空洞で約 3MeV まで加速、合流部で周回部に入射し、主超伝導空洞で約 20MeV まで加速、周回部を周回させたのち、主加速空洞で約 3MeV まで減速してエネルギー回収、取出部でビームをダンプラインへ取り出し、ビームダンプへ打ち込む[1],[2],[3]。ここでは、

cERL の周回部の電磁石及び電源系について述べる。

2. 周回部の電磁石

周回部の電磁石配置を図 1 に示す。図の電磁石名称で B は偏向電磁石を、Q は 4 極電磁石を、ZH は水平補正電磁石 (補正コイル)、ZV は垂直補正電磁石用 (補正コイル) である。

2.1 偏向電磁石

弧部の 8 台の主偏向電磁石は曲げ角 45°、セクタ型である。磁場の強さに関するパラメータを表 1 に示す。8 台の偏向電磁石は 1 台の電源で励磁され、途中のケーブルはループにならない様に配線されている。図 2 に偏向電磁石の写真を示す。コアは珪素鋼板を積層接着後、セクタ型に削って製作された。配線に使用したケーブル断面積は 200mm²、20MeV で必要な電流値は電流約 50A である。245MeV 運転まで対応可能な様に設計されており、その際の最大電流値は 800A である。現在使用している電源の容

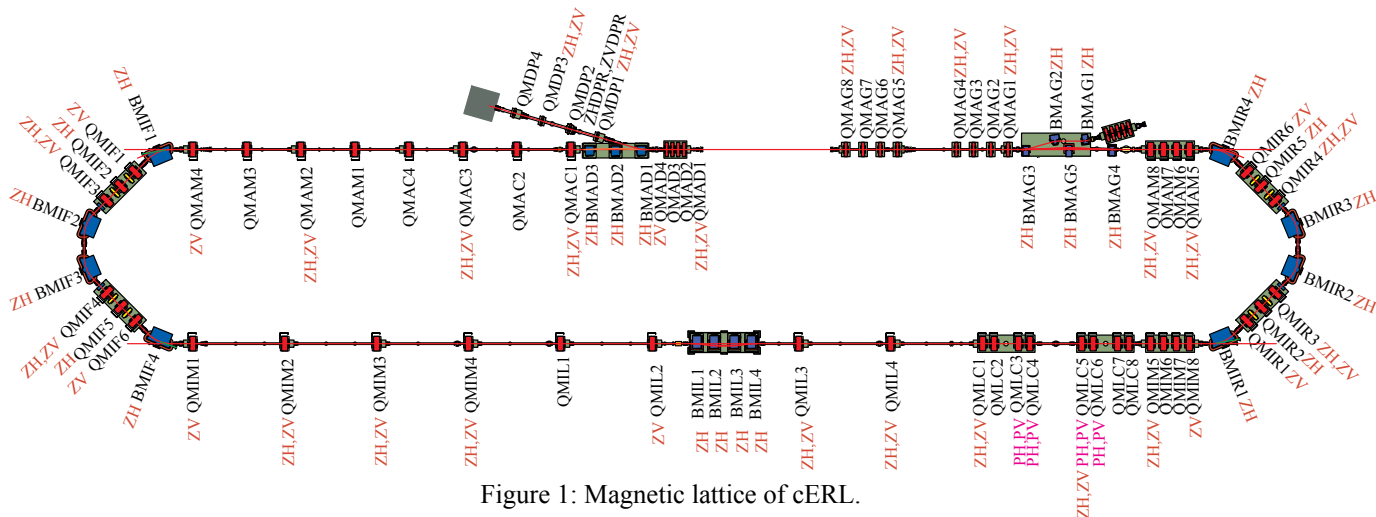


Figure 1: Magnetic lattice of cERL.

[#] kentaro.harada@kek.jp

Table 1: Parameters of the bending magnets. The maximum magnetic fields are the measured effective magnetic field for the maximum magnetic current. The correction coils are used for the horizontal corrector.

	Number	Core length [m]	Gap [mm]		Maximum current [A]	Coil turn numbers	Maximum magnetic field [T]
Main bending magnet (BMIF1-4, BMIR1-4)	8	0.82	60	Main coil	100	14 x 4	0.127
				Correction coil A	5	50 x 2	1.812E-05
				Correction coil B	not used	1 x 2	3.624E-07
Circumference adjuster chicane (BMIL1-4)	4	0.3	70	Main coil	30	184 x 2	0.248
				Correction coil	5	40 x 2	8.991E-03
Dump chicane A (BMAD1,3)	2	0.3	70	Main coil	10	79 x 2	0.0351
				Correction coil	5	8 x 2	1.777E-03
Dump chicane B (BMAD2)	1	0.3	70	Main coil	10	158 x 2	0.0701
				Correction coil	5	16 x 2	3.551E-03
Merger chicane A (BMAG1,3,4)	3	0.2	70	Main coil	10	95 x 2	0.0456
				Correction coil	5	10 x 2	2.400E-03
Merger chicane B (BMAG2)	1	0.2	60	Main coil	10	82 x 2	0.0498
				Correction coil	5	10 x 2	3.034E-03
Merger chicane C (BMAG5)	1	0.2	70	Main coil	10	190 x 2	0.0925
				Correction coil	5	20 x 2	4.868E-03

Table 2: Parameters of the quadrupole magnets. The maximum magnetic fields and field gradients are the measured effective magnetic field and gradients for the maximum magnetic current. The correction coils are used for the horizontal and vertical correctors.

	Core length [m]	Bore diameter [mm]		Coil turn numbers	Maximum current [A]	Maximum field gradient [T/m]	Maximum magnetic field [T]
10cm QM (QMAG1-4, QMAD1-4)	0.1	60	main coil	240/pole	5	4.545	
			correction coil A	2/pole	5		9.174E-04
			correction coil B	2/pole	5		8.663E-04
20cm QM	0.2	60	main coil A	25/pole	100	8.310	
			main coil B	280/pole	5	4.622	
			correction coil A	10/pole	5		3.074E-03
			correction coil B	10/pole	5		3.048E-03
			correction coil C	1/pole	5		2.868E-04
			correction coil D	1/pole	5		2.380E-04
JAEA 10cm QM (QMAG5,8)	0.1	102	main coil	398/pole	5	2.709	
			correction coil A	4/pole	5		8.707E-04
			correction coil B	4/pole	5		8.324E-04
JAEA 5cm QM (QMAG6,7, QMDP1-4)	0.05	102	main coil	398/pole	5	3.522	
			correction coil A	8/pole	5		2.434E-03
			correction coil B	8/pole	5		2.389E-03

量は 100A/40V である。偏向電磁石にはバックレグ（補助コイル）が取り付けられており、50 巻のバックレグコイルを水平ステアリングとして使っている。なお、100A までの励磁の場合、電磁石及びコイルの温度上昇は大きくない為、コイルは中空の銅パイプ（ホロコ）で巻かれているが、冷却水配管は行っていない。

合流シケインの電磁石 5 台（図 3(a)）は 2 台の電源で励磁される。周回部側（BMAG3-5 の 3 台）と入射部側（BMAG1,2 の 2 台）とで分けている。いずれも電源は±10A/±40V（方極性でよいが、両極性の既製品を利用）で、コイル巻き数の比を変え、

同じ電流値で励磁しておよそバンプが閉じる様に設計されている。さらに、入射部側の電磁石については、中央の BMAG02 のコアの形状を逆台形にする（エッジ角度をつける）ことで、水平分散関数を消す設計になっている。また、5 台とも補助コイルが巻いてあり、バンプを精密に閉じる為の水平ステアリングとして利用している。最大入射エネルギー 10MeV まで対応できるように設計されているが、現在の入射ビームのエネルギーは約 3MeV である。

取出シケイン電磁石(BMAD1-3、図 3(b))については入射シケイン同様、中央(BMAG2)の電磁石のコイル巻数が、バンプが閉じる様に調整されており、3

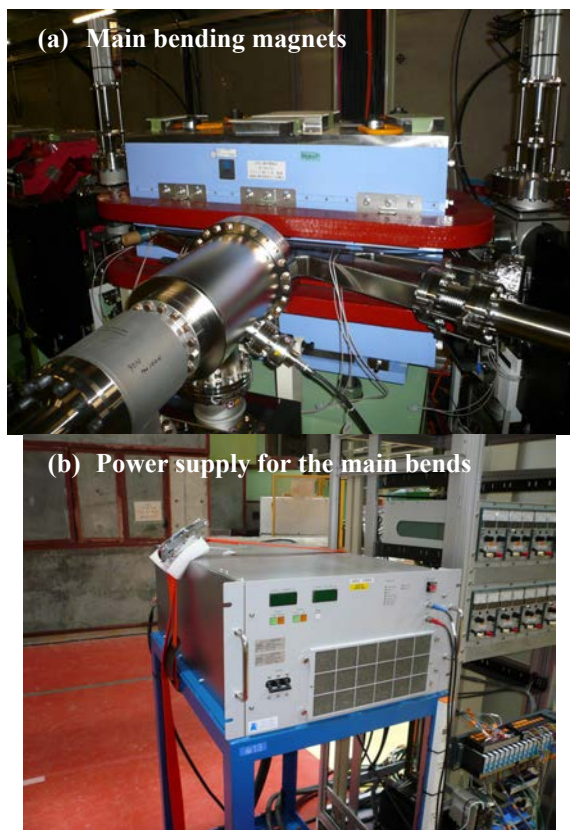


Figure 2: Main bending magnet and power supply.

台直列に 1 台の電源に接続されている。10MeV まで取り出しできるように設計されている。5 台ともバックレグがついており、水平ステアリングとして使っている。

周長補正シケインの電磁石 (図 3(c)) も 4 台直列に 1 台の電源で励磁されている。バックレグも同様である。周回ビームのエネルギー 125MeV まで対応可能な様に設計されており、その際にはコイルは冷却水で間接冷却される予定であるが、20MeV 運転の場合、最大 10A では温度上昇は無視できるため、冷却水配管は省略されている。通常、最大バンプの半分の高さのバンプで運転し、周長の増減どちらも調整可能になっている。

2.2 4 極電磁石

合流部から取出部までの間の 4 極電磁石 (QMAG1-8, QMAD1-4) については、加速前と減速後の低エネルギーのビームに対して最適化されている。コア長 10cm の新しい QM (8 台) と、JAEA の FEL 用 ERL で使われていた電磁石の再利用(4 台)からなる。それぞれの電磁石の磁極には補助コイルが 2 セット巻いてあり、それぞれ水平ステアリング用の垂直 2 極磁場、垂直ステアリング用の水平 2 極磁場を発生させることができる様になっている。実際の運転におけるステアリング配置は図 1 に示されており、図中の ZH が水平ステアリング、ZV が垂直ステアリングである。ダンプリンの 4 極電磁石 (QMDP1-3) も JAEA からの譲渡再利用品である。最大 10MeV で K 値 ($B^2L/B\rho$) が 3 まで可能な様に

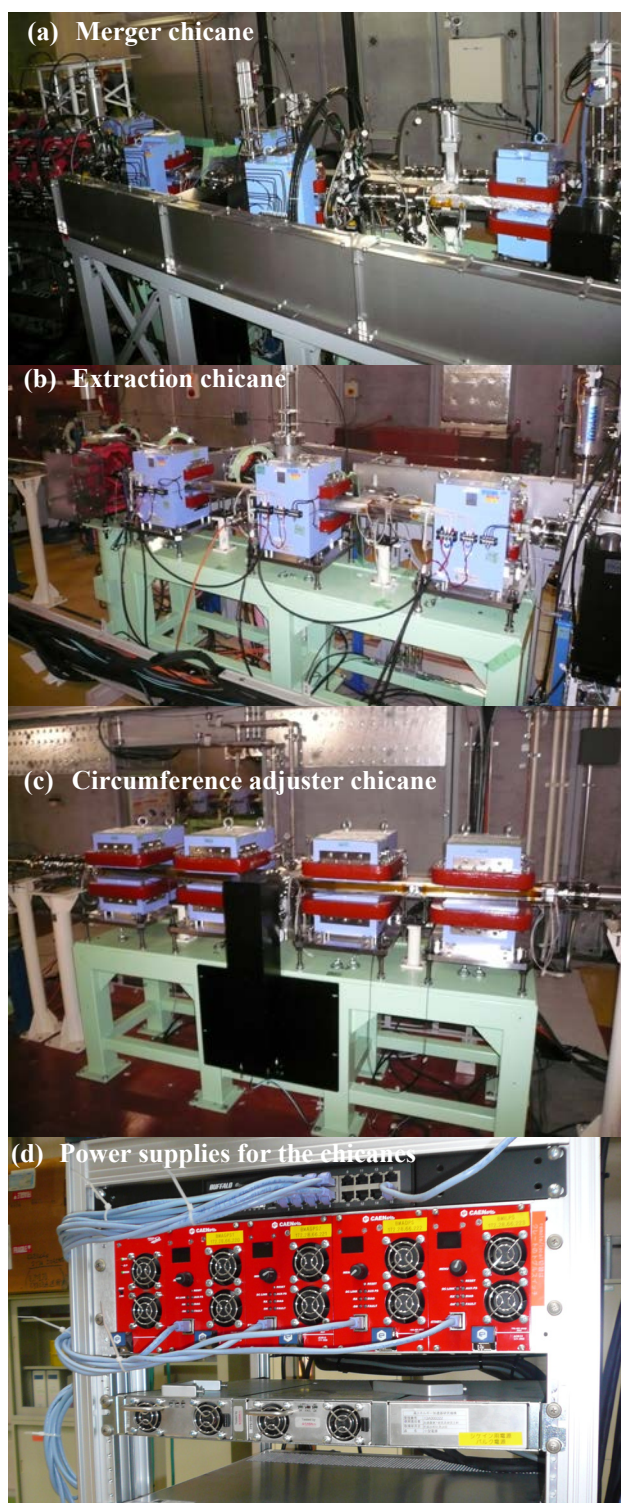


Figure 3: Chicane bending magnets and power supplies.

設計、配置を行った。

加速後のビームが通過する部分の 4 極電磁石 (例えば図 4(a)) は、コア長 20cm の新しい 4 極電磁石で、コイルは 125MeV まで対応可能な様に、ホロコンで巻いてある。ただし、最初の 20MeV (予定では 35MeV) 運転ではそこまで強い磁場 (勾配) は必要



Figure 4: Quadrupoles and power supplies.

ない為、低エネルギー運転用に銅線の 4 極磁場用コイルも巻いてあり、現在はそちらのみ使っている。35MeV で K 値が 3 まで余裕を持って対応可能な巻き数となっている。水平垂直ステアリング用の補助コイルについては、精密補正用の 1 巻コイルと通常の補正用の 10 巻コイルとがあり、現在は 10 巻の方をステアリングとして使っている。(配置は図 1。) 例えば、水平垂直ステアリングが必要な場所では、1 台の 4 極電磁石に 3 台の電源が接続されていることになる。

4 極電磁石の主コイル用の電源、補助コイル用の電源、偏向電磁石のバックレグ(補助コイル)の電源については、全て同じ電源で、容量は $\pm 5A/\pm 60V$ である。入射部と故障時の予備品を合わせ、現在 177 台の電源が導入されている。

3. 周回部用電源の概要

3.1 電源の台数とスペック

弧部主偏向電磁石の電源 1 台(図 2(b))は東京電子製で容量は 100A/40V である。制御はビット制御で、横河の PLC を用いている。合流、取出、周長補正シケインについては CAENels 社製 SY3634 で 1 台のクレートに 4 モジュールの $\pm 10A/\pm 40V$ 電源が挿してある(図 3(d))。制御については、電源モジュールに直接ネットワークケーブルを挿して制御を行っている。(telnet ポートで ascii コマンドを送る形式で、EPICS の stream device を使っている。) 4 極電磁石及びステアリング用の補助コイル、偏向電磁石の補助コイルについては、入射診断部を含めて最初 163 台導入された(図 4(b))。(現在は 10 台増強され、172 台利用、5 台予備。) その他、入射部の電子銃付近とビーム取出後のダンプリーンについては、菊水製 PAD シリーズの電源を 16 台用いており、横河の PLC の DAC モジュールを介して制御している。

cERL では、現在レーザー逆コンプトン散乱実験の準備が進められており、その衝突点付近のフィードバック用(図 1 の PH,PV)として CAENels 社の LiAM6005 が 10 台追加で導入されて試験中である。また、新しい周長調整の方法として、弧部中央の軌道を変えて周長補を制する方法が提案されており、その為のステアリング電磁石も設置され、試験中である。電源はシケインと同じ CAENels 社の SY3634 シリーズを採用した。(現在 SY3634 シリーズは 8 台(2 クレート分)ある。)

3.2 電源の発振と対策

CAENels 社の LiAM6005 は他社の同規模の電源と比較して、制御系が内部組み込みでネットワークケーブルを挿すだけで利用可能であること、リップルやノイズが 1 桁以上小さいこと、環境温度の変化($10^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ までを仕様として指定)に対して、出力電流の変化がほとんどないことなど、優れた特性を持っている(それらの特性は cERL の運転によっても示されている)。しかしながら、2013 年 4 月の最初の試験時には電源が発振し、対策を行う必要があった。それについて述べる。

4 極や偏向電磁石のメインコイルのインダクタンスは数 mH、一方、補正コイルは数ターンであるため、負荷インダクタンスがほぼゼロである。同一の電源を採用するにあたり、幅広いインダクタンスに対応するため、電源側でも工夫がなされているのだが、今回、配線に特殊なケーブルを採用した為、電源が発振するという現象が起こった。cERL の電磁石配線は、主偏向電磁石用の 200mm^2 ケーブルを除き、全て KEKB 建設時からストックされていた KEKB 電磁石インターロック用ケーブルを譲渡して頂いたものを利用している。3 芯 3.5mm^2 のケーブルで、例えば、1 台の 4 極電磁石にそれを 2 本接続し、芯線 6 本をメインコイル、水平ステアリング、垂直ステアリングで各 2 本ずつ利用するという方式を

とった。ところが、1本のケーブル中の2芯を利用した4極電磁石補助コイル配線の一部で、電源が発振するという現象が見られた。アースの問題、クロストークの問題、負荷の問題など、様々な調査を行った結果、結論はケーブルの問題であり、負荷としてケーブルのみを接続し、200mから5mずつ切断して末端を短絡しながら電源を試験したところ、片道80m~120mの長さの場合のみ発振することが分かった。また、今回利用したケーブル以外のケーブルでは、この様な現象は起こらないことも分かった。電源と電磁石の間のケーブルの距離、ケーブルの選定の両者がかみ合い、非常に希な現象をうまく引き当てたのだが、負荷インダクタンスが大きければ防止できることも分かったため、電源のノイズカット用のチョークコイルを負荷に直列に挟んで対応することにした。初期の163台については電源背面にチョークコイルを取り付け、新規製造するものについては内部に入れてある。

参考文献

- [1] N.Nakamura, et al., “コンパクト ERL の進捗状況”, in these proceedings.
- [2] M.Shimada, et al., “コンパクト ERL のコミッションング”, in these proceedings.
- [3] T.Kume, et al., “cERL 周回部電磁石のアライメント”, in these proceedings.