

cERL シケイン用偏向電磁石の設計と製作

DESIGN AND FABRICATION OF THE COMPACT-ERL CHICANE MAGNETS

上田 明[#], 原田 健太郎, 長橋 進也, 久米 達哉, 島田 美帆, 宮島 司, 中村 典雄, 遠藤 有聲
Akira Ueda [#], Kentaro Harada, Shinya Nagahashi, Tatsuya Kume, Miho Shimada, Tsukasa Miyajima,
Norio Nakamura, Kuninori Endo

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The bending magnets for the cERL chicanes are designed and fabricated to use for injecting an electron beam from an injector, ejecting the decelerated beam to its dump and adjusting the circumference of the recirculation loop. For designing these magnets, we use 2D and 3D simulation codes to establish the good field region required by the lattice and beam dynamics. As these magnets are made of electromagnetic soft iron, their magnetic properties deteriorate due to machining process. To restore them magnetic annealing is applied after the machining process. Results of the simulation and the field measurement with flip-flop coil are compared to check whether the magnets have the required magnetic properties.

1. はじめに

Compact Energy Recovery Linac (cERL)は、2014年に運転が開始され、現在、順調にコミッションングを行っている^{[1][2]}。cERLでは高輝度電子銃で発生した電子ビームをその品質を損なうことなく加速・周回し、その後エネルギーを回収しダンプに導いている。cERLの鳥瞰図をFigure 1に示す。

このcERLには入射器からの合流部にMerger及びInjection chicane（合わせてMerger chicaneと呼ぶ）、ダンプラインへの分岐部にDump chicane、及び周長を調整するためのCircumference adjuster chicaneを配置している^[3]。これらは各部3~4個の偏向電磁石により構成される。これらの電磁石は、低いエネルギー領域で使用されるが、合流・分岐の偏向角等のために広い有効磁場領域が必要である。それと共にLinacの特性上、各電磁石での誤差の影響が累積するため高い精度が必要である。

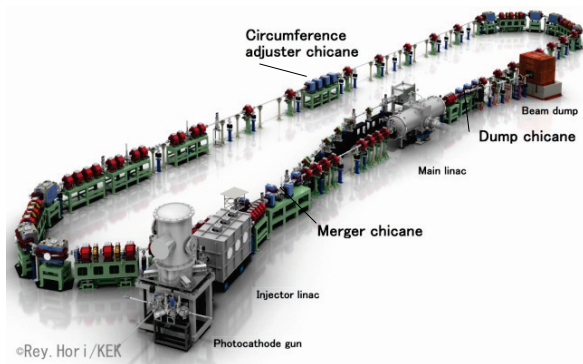
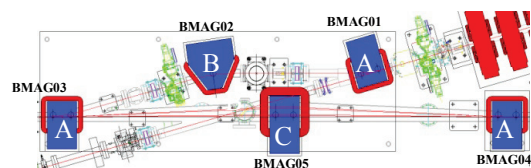


Figure 1: Illustration of the Compact ERL.

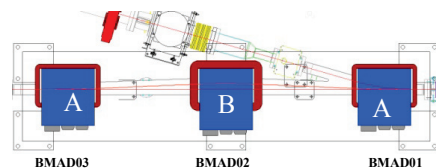
ここでは、これら偏向電磁石の基本仕様を述べた後、具体的な設計、特に2D及び3Dでのsimulationによる磁極形状、End Shim形状の決定及び加工による電磁軟鉄の劣化と熱処理の問題について説明し、最後にsimulationと磁場測定と比較を行う。

2. シケイン用偏向電磁石

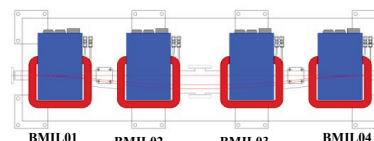
各chicaneはFigure 2に示のように、Merger chicaneに3種類（5台）、Dump chicaneに2種類（3台）、Circumference adjuster chicaneに1種類（4台）計6種類12台の偏向電磁石からなる。各偏向電磁石のパラメータをTable 1に示す。



(a) Merger chicane (Merger and injection chicane).



(b) Dump chicane.



(c) Circumference adjuster chicane.

Figure 2: Magnets of the merger and chicanes.

[#]akira.ueda@kek.jp

Table 1: Parameters of the Merger and Chicane Magnets

Magnet type	Number of magnets	Core WxHxL [mm]	Gap Height [mm]	Pole Width [mm]	Maximum current [A]	Coil turn numbers	Maximum magnetic field [T]	Good field region [mm]
Merger A	3	420x320x200	70	180	10	95x2	0.0456	80
Merger B	1	410x335x200 (at center)	60	215	10	82x2	0.0498	30
Merger C	1	420x385x200	70	180	10	190x2	0.0925	115
Dump A	2	425x325x300	70	195	10	79x2	0.0351	95
Dump B	1	435x345x300	70	195	10	158x2	0.0701	95
Circumference adjuster chicane	4	440x450x300	70	240	30	184x2	0.248	140

入射器からの低エネルギー電子は Merger (BMAG01-03) を通り合流電磁石 BMAG03 により周回部に合流する。BMAG03 は、同時に周回部の BMAG04-05 と共に Injection chicane を形成し周回部の高エネルギー電子が低エネルギー電子と同じ基準軌道に乗るためのバンパを形成する。また、Merger B 型偏向電磁石は、Merger での水平分散を消すために 28.576° のエッジ角を持つ。Merger chicane と同様に Dump chicane (BMAD01-03) の分岐電磁石 (BMAD01) は、低エネルギー電子を 16° 偏向させダンプと導き、BMAD02-3 と共に高エネルギー電子が基準軌道に乗るようにバンパを形成する。

cERL では、主空洞で加速された電子のエネルギーを周回後に同じ主空洞で減速する。そのため周回後に電子が主空洞の減速位相に乗るように周長を合わせる必要がある。Circumference adjuster chicane (BMIL01-04) は、その周長を合わせるために使用する。

cERL は段階的にエネルギーを増強する計画であるため Merger chicane 及び Dump chicane の電磁石は低エネルギー電子 5MeV ~10MeV に Circumference adjuster chicane は高エネルギー電子 35MeV ~125MeV に対応できるように設計した。(現在の運転エネルギーは、低エネルギー部 3MeV, 高エネルギー部 20MeV である。)

Merger の電磁石及び Injection chicane、Dump chicane の合流・分岐電磁石は低エネルギー電子に対して 16° の偏向角を有する。Injection chicane、及び Dump chicane の電磁石は低エネルギー電子と高エネルギー電子の運動量比が 1:6 まで許容できるように設計された。Circumference adjuster chicane の電磁石は 4 台の電磁石で構成され周長を ± 5 mm の範囲で調整する事が出来る。

3. 各偏向電磁石の設計

3.1 電磁石の形状、材質及びコイル

各電磁石の形状は、C 型及び Merger B 以外の電磁石は rectangle である。電磁石の長さは、Merger

chicane で 200mm、Dump chicane 及び Circumference adjuster chicane で 300mm である。また、Merger B 型電磁石は、水平分散を消すために 28.576° のエッジ角を持ち、磁極中央部の長さが 200mm である。

アーク部のメインの偏向電磁石は珪素鋼板を使用した。これらの電磁石には電磁軟鉄 SSM250 を使用した。これは、個数が少なく種類が多い場合、珪素鋼板は抜き型が必要な分、割高になるためである。

コイルは、Merger chicane 及び Dump chicane は空冷であり、Circumference adjuster chicane は、間接水冷である。各電磁石にはバンパ軌道の補正のためにメインコイルの 10% 程度の補正コイルを取りつけてある。

各電磁石の有効磁場領域 ($\Delta B_y/B_{y0} \leq 5E-4$) は、低エネルギー電子の偏向角 (16°) 及び各 Chicane のバンパの高さによって Table1 のように決定した。

3.2 Simulation による磁極及び End shim の設計

この有効磁場領域を確保するために、まず 2D simulation により磁極長、ヨークの厚み、コイルスペース、磁極形状及びシムの形状を決定した。これらの電磁石は磁極側面に End shim を取りつける事によりフリンジの影響を補正する。この End shim 形状は 3D simulation により決定した。

磁極部 Add Shim^[4]及び End shim のパラメータを Table 2 に、3D simulation model(merger A)を Figure 3 に示す。磁極部の Add shim は磁極両端にあり 1.5mm 程度盛り上がり両端は 45° に面を取った形状となる。磁極側面の End shim は、コイル内側に幅 20 mm 程度厚み 10mm 程度の鉄の板状である。位置は Figure 3 のように磁極部の両端に取り付ける。

各電磁石は、磁極部に Add shim を設け有効磁場領域を広げている。磁極形状の決定は、2D simulation により有効磁場領域を確保できるように最適化され、Table2 に示すように inside(ヨーク側)と outside の形状は同じではない。これは C 型であるため磁路長が inside と outside で違うためである。

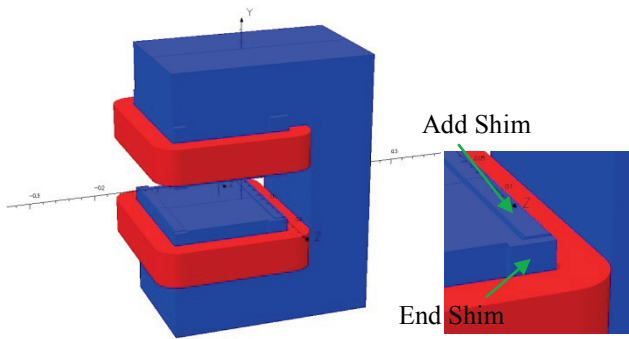


Figure 3: 3D Simulation models of Merger A magnet.

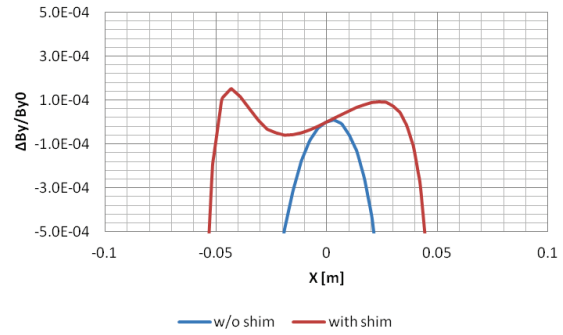
Table 2: Add Shim and End Shim

Magnet type	Add shim		End shim	
	WxH [mm]		WxHxD [mm]	
	inside	outside	inside	outside
Merger A	20x2	20x2	30x95x7	20x95x7.5
Merger B	18x1.5	18x1.5	80x95x3	
Merger C	18x2	20x2	30x95x6.5	30x95x6.0
Dump A	22x2	20x2	30x95x7.5	20x95x7.5
Dump B	20x2	20x2	30x100x7	20x100x8
Circumference adjuster chicane	20x1.5	22x1.5	30x110x8.5	30x110x7.5

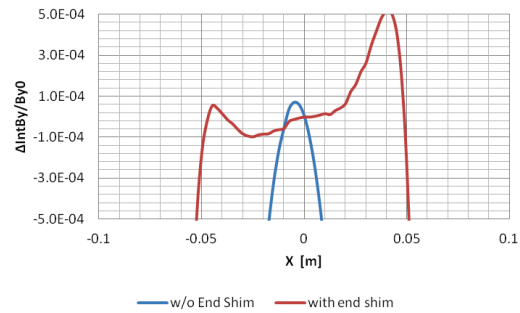
これらの電磁石は長さが 200 mm、300 mm と短い
ためフリンジにより実効的な有効磁場領域が狭くなる。
これを補正するために End shim を取りつける。End
shim の形状は 3D simulation により磁場を軌道方向
に積分して実効的な有効磁場領域が確保できるよ
うにした。また End shim も磁極部の Add shim と同じ
ように inside と outside は必ずしも同じ形状でない。

Add shim 及び End shim の有無による水平方向の
有効磁場領域 ($\Delta B_y/B_{y0} \leq 5E-4$) 及びそのビーム軸
方向の積分 ($\Delta \text{Int}B_y/\text{Int}B_{y0} \leq 5E-4$) の simulation の
結果(Merger A)を Figure 4 に示す。Figure 4 の a)に
示すように磁極面に shim が無い状態では、狭い有効
磁場領域しか得られないがこれに Add shim を取り
つける事により磁極両端の磁場を持ちあげ有効磁場
領域を広げている事がわかる。

このように磁極に Add shim を設けてもフリンジ
の影響により実効的な有効磁場領域は、狭くなって
しまう。このフリンジの効果を補正するために End
shim を取りつける。この実効的な有効磁場領域を評
価するために 3D simulation を行い。軌道面の B_y を
ビーム軸方向に積分した $\text{Int}B_y$ を使用する。Figure 4
の b)に示すように End shim が無い状態では、実効
的な有効磁場領域は非常に狭くなる。これを補正す
るために磁極部端面に End shim を取りつけると軌道
の要求にあう有効磁場領域が得られる事がわかる。



(a) Result of the 2D simulation; with and w/o shim.



(b) Result of the 3D simulation; with and w/o shim.

Figure 4: Simulation results of the good field region.

4. 電磁軟鉄の磁気特性の劣化と焼鈍

4.1 加工による劣化と回復

cERL のシケイン電磁石には、電磁軟鉄 (SSM250)
を使用した。この電磁軟鉄は加工により磁気特性が
劣化し、その劣化は磁場が低いほど大きく低磁場で
使用する電磁石の場合問題になる。この磁気特性を
回復させるには、加工後に 890°C、1 時間の磁気焼
鈍を行う事が必要である^[5]ため、製作にあたっては、
最終工程で磁気焼鈍を行った。

Table3 に住友金属工業株式会社(現新日鐵住金株式
会社)より提供された加工による磁気特性の低下と熱
処理による回復のデータを示す^[5]。ここでは、電磁
軟鉄板から標準トロイダルコアを削り出し、加工の
まま、600°C、700°C、890°Cの熱処理をしたコアに
よりそれぞれについて磁気特性を測っている。

この Table3 は、磁場の強さ 1,2,3,5,10,25[Oe]の
時の磁束密度 B を示している。890°Cはこの電磁軟鉄
の再結晶化温度であり、鉄の結晶が新たに置き変わ
り磁気特性が回復する^[6]。Table3 より加工後の磁気
特性は、高磁場領域では問題とならないが、低磁場
になるほど落ち 1[Oe] (79.58[A/m]) では、本来の磁
気特性から半減する事がわかる。また、通常行われ
る応力除去の熱処理(温度 600、700°C程度)では、磁
気特性は完全に戻らない事がわかる。

Table 3: Magnetic Flux Density after Heat Treatment^[5]

Heat treatment [°C]	B[T]					
	1[Oe]	2[Oe]	3[Oe]	5[Oe]	10[Oe]	25[Oe]
no heat treatment	0.44	0.78	0.94	1.15	1.39	1.58
600	0.60	1.04	1.25	1.44	1.56	1.65
700	0.72	1.20	1.38	1.52	1.58	1.66
890	0.81	1.30	1.44	1.52	1.58	1.66

cERL のシケインの電磁石は低エネルギーで使用されるが、その外形は必要な有効磁場領域を確保するためにある程度の大きさが必要である。この電磁石で使用される磁場領域を Figure 5 に示す。このような低磁場の電磁石の場合は、電磁軟鉄の加工による磁気特性の低下は問題になり、切削加工後に磁気焼鈍を行い電磁軟鉄の特性を回復する必要がある。

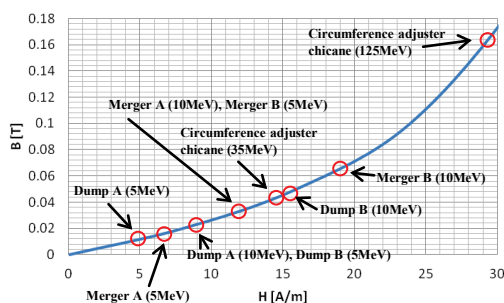


Figure 5: BH curve of the SSM250^[5].

4.2 磁気焼鈍と鉄材の変形

このように電磁軟鉄は切削加工後に磁気特性を回復するために磁気焼鈍をする必要性がわかった。しかし実際の製作の際に、磁気焼鈍による変形により Gap 精度などが公差内に入らない可能性も考慮する必要があった。

これらの電磁石は

- Dump 及び Circumference adjuster chicane
- Merger chicane

に分けて順に製作された。

先行した Dump 及び Circumference adjuster chicane の製作では、磁気焼鈍による変形を補正するために焼鈍後に微小の仕上げ加工を行う事とした。しかしこの仕上げ加工により磁気特性が低下するため加工法は素材の負荷が小さい研削加工とし加工代も最小限の 0.1mm とした。

後発の Merger chicane の製作時は、テストブロックによる磁気焼鈍後の変形量測定の結果から磁気焼鈍後の研削加工を行わなくても Gap 寸法は公差内であると結論した。そのため Merger chicane の電磁石は、磁気焼鈍後に加工を一切行わずに製作した。

テストブロックによる磁気焼鈍前後の電磁軟鉄の変形の結果を Table4 に示す。テストブロックは 300

mm (L) × 240mm (W) × 105mm(D)の電磁軟鉄の厚板である。P1~P5 は平面度の測定位置を示し長辺 4ヶ所ずつ 8ヶ所を測定している。また L1~L6 は、テストブロック内に設けた測定点間の長さの変化 L7 は短辺の長さの変化、L8 は長辺の変化である。

Table 4 から平面度の変化は磁気焼鈍前後で数 μm であり、長さ方向の変化も 100mm につき数 10 μm である。

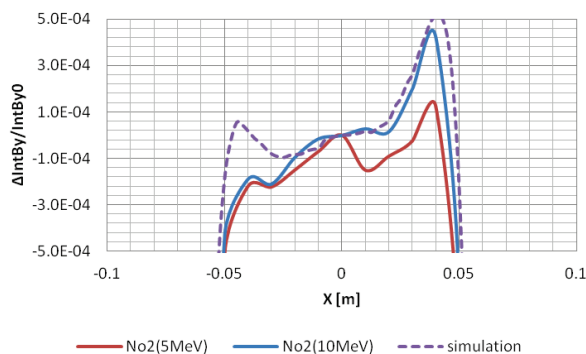
Table 4: Result of Dimensional Measurement before and after Magnetic Annealing

	Before annealing [mm]	After annealing [mm]	Difference [mm]
P1	0.0029	-0.0012	-0.0041
P2	-0.001	0.0006	0.0016
P3	-0.0034	0.0009	0.0043
P4	0.0014	-0.0003	-0.0017
P5	0.0035	0.0014	-0.0021
P6	-0.0018	-0.002	-0.0002
P7	-0.0034	-0.002	0.0014
P8	0.0018	0.0026	0.0008
L1	49.9986	50.014	0.0154
L2	49.9978	50.0178	0.0200
L3	99.9861	99.9991	0.0130
L4	99.9864	99.9886	0.0022
L5	99.9817	99.982	0.0003
L6	99.9806	99.953	0.0147
L7	240.067	240.0809	0.0139
L8	300.07	300.0945	0.0245

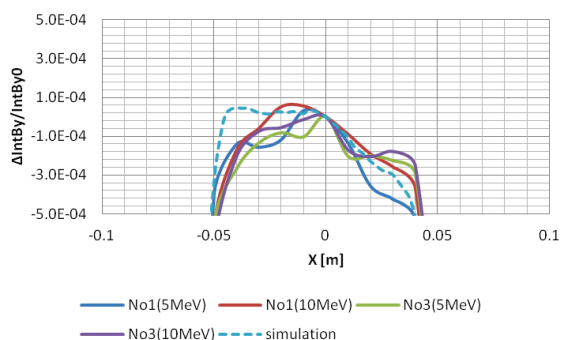
5. 磁場測定との比較

各電磁石はフリップフロップ法による磁場測定を行った。この測定ではビーム軸に沿って積分された磁場の分布が得られるので、これにより水平軸上の実効的な有効磁場分布を計算し simulation の結果と比較する。

Figure 6 に磁気焼鈍後に磁極面の研削加工をしなかった電磁石の例として Merger A 電磁石の結果を示す。(a)に示す No.2 の電磁石の結果は、shim 部での磁場の持ち上がり方を含めて simulation とよく合っている。しかし、(b)に示す No1 及び No3 の結果は shim の効果が小さいように見える。しかしこれは、製作上のミスで磁極部の Add shim の高さが 0.1 mm 低くできてしまった事による。実際に Add shim を 0.1mm 低いモデルでの simulation 結果と比べると、形状はよく一致する。



(a) Merger A, No.2.



(b) Merger A, No.1 and No.3.

Figure 6: Magnetic field measurement for Merger A without grinding process.

次に磁気焼鈍後に磁極面を研削加工した電磁石の例として Dump A 電磁石の結果を Figure 7 に示す。No1 及び No2 では積分した磁場の傾きや shim の影響の仕方も違う事がわかる。shim の影響により $\Delta \text{IntBy}/\text{IntBy}_0$ が有効磁場領域の定義 $\pm 5E-4$ を超えている所もある。

この磁場特性は、実際の運転に支障するほどではないが、磁極面の研削加工をしない場合に比べて磁気特性が悪い事がわかる。

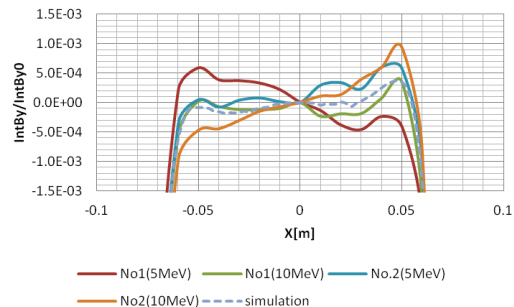


Figure 7: Magnetic field measurement for Dump A after grinding process.

Merger A 電磁石と Dump A 電磁石の製作上の違いは、磁気焼鈍後に仕上げ加工として研削をしたかどうかである。したがってこの違いは研削加工による磁気劣化の影響であると推測される。この事から cERL のような低磁場で使用する電磁石は、加工での磁気特性劣化を製作時に考慮する必要があると言える。

6. まとめ

cERL のシケイン部に使用するために 6 種類 12 台の偏向電磁石が製作された。各電磁石は、2D simulation により必要な有効磁場領域を確保するように磁極長、ヨークの厚み、コイルスペース、磁極形状及び shim の形状を決定され、さらにフリンジの効果を補正するための End Shim は 3D simulation により最適化された。

これらの電磁石は電磁軟鉄で製作されたが、電磁軟鉄は、加工により磁気特性が劣化し、この劣化した磁気特性を戻すためには磁気焼鈍が必要となる。

これらの電磁石は Dump 及び Circumference adjuster chicane と Merger chicane を分けて製作された。先行の Dump 及び Circumference adjuster chicane の製作の過程で最終工程の磁気焼鈍で磁極等が変形する可能性が問題になり、最終工程後にこの変形を補正するために 0.1mm の研削加工を行った。しかしテストブロックによる磁気焼鈍前後の変形試験からその差は微小であり、研削加工を行わなくても公差内に入る事がわかったため、後発の Merger chicane の電磁石は、磁気焼鈍後の加工を一切行わずに製作した。

こうして製作された電磁石はフリップフロップ法による磁場測定との比較により磁気焼鈍後に加工を行わなかった場合は、simulation と非常に良く合う事がわかった。しかし、磁気焼鈍後に研削加工を行った電磁石を、simulation と比較するとその結果は加工を行わなかった物に比べて悪い結果となり、わずかであるが加工による磁気特性劣化により磁場特性が悪くなっている事が推測される。

参考文献

- [1] S.Sakanaka, et al., "RECENT PROGRESS AND OPERATIONAL STATUS OF THE COMPACT ERL AT KEK" Proceedings of IPAC2015, Richmond, VA, USA, May. 3-8, 2015.
- [2] N.Nakamura, et al., "コンパクト ERL の進捗状況", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, August 9-11, 2014.
- [3] K.Harada, et al., "THE MAGNET AND POWER SYSTEM FOR THE COMPACT-ERL", Proceedings of IPAC2015, Richmond, VA, USA, May. 3-8, 2015.
- [4] K.Endo, "加速器における電磁石の基礎", OHO'97, 1997, III-10.
- [5] M.Nishio NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL CORPORATION, private communication.
- [6] 不二越熱処理研究会, "新・知りたい熱処理", ジャパンマシニスト社, 2001.10, p112.