

# Bending Magnets Design of cERL

Akira Ueda #, Kentaro Harada, Miho Shimada, Shinya Nagahashi, Yukinori Kobayashi

High Energy Accelerator Research Organization, KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

We are now constructing Compact Energy Recovery Linac (cERL) to start commissioning in March of 2013. We started constructing 35MeV, 10mA, 1loop design, and after step by step reinforcement, we will complete 245MeV, 100mA, and 2loop facility of cERL. We use 2 type bending magnets, sector type magnet and branch bend. Both magnets are trapezoid shape and bending radiuses are 1m, bending angles are 45degree. After constructing second loop, we use the branch bend to separate low energy electron to first loop and high energy electron to second loop. We report these two type bending magnets design of cERL.

## cERL 用偏向電磁石の設計

### 1. はじめに

Compact Energy Recovery Linac (cERL) は 2013 年 3 月の運転開始に向け建設が進められている。ビームエネルギー 35MeV、10mA、1 ループの計画からスタートし、段階的に主加速空洞の増強、2 ループ目の建設を行い最終的には 245MeV、100mA を目標としている[1][2][3]。

この cERL の偏向電磁石はセクタ型マグネット及び分岐ベンドの 2 種類である。セクタ型マグネットは、台形の C 型マグネットとし、分岐ベンドは、やはり台形の H 型のマグネットとして設計した。この分岐ベンドは将来 2 ループ目の完成時に、低エネルギー電子を内側ループ、高エネルギー電子を外側ループに分岐、合流するために使用される。これらのマグネットは小さい曲率半径 ( $\rho=1\text{m}$ ) のためサジッタ (偏向電磁石出入り口を結ぶ直線に対して、軌道が描く円弧のふくらみの最大値) が大きく、またバンチ圧縮モードではビームサイズが大きくなる。さらに、分岐ベンドにおいては低エネルギー及び高エネルギー電子が違う軌道を通るため、広い有効磁場領域が必要である。また、35MeV より出発する cERL は、段階的にエネルギーを上げていくため、1 ループ目は 35MeV-125MeV、2 ループ目は 65MeV-245MeV のエネルギーになる可能性がある。それらの様々なエネルギーに対応できるように、セクタ型マグネットは 1 ループ目、2 ループ目を共通の物を使用できるように設計した。

ここでは、このセクタ型マグネット及び分岐ベンドの設計について報告する。

### 2. セクタ型マグネットと分岐ベンド

#### 2.1 セクタ型マグネットと分岐ベンド

cERL の偏向電磁石としては、 $\rho=1\text{m}$  で台形の形を持つセクタ型マグネットの他に、2 ループ目に高エネルギー電子を導くための分岐ベンドが必要である。加速空洞で 1 回加速された低エネルギー電子と 2 回加速された高エネルギー電子は、この分岐ベ

ンドで 1 ループ目と 2 ループ目に軌道を分けられる。したがって分岐ベンドには 2 つの違ったエネルギーの軌道があり、広い磁極が必要である。図 1 に 2 ループラティスのアーク部を示す。

1 ループ目は、分岐ベンド 2 台、セクタ型マグネット 6 台で構成される。また将来建設予定の 2 ループ目は、分岐ベンドを 1 ループ目と共通として、セクタ型 6 台、そして分岐ベンドと対称位置の 2 台が分岐ベンドと同じ、もしくは同等のマグネットとなる。

セクタ型マグネットは 1 ループ目 2 ループ目共に同じ物を使用できるように設計するので、cERL はこの 2 種類の偏向電磁石で賄える事になる。(2loop 目の分岐ベンドと対称位置のマグネットも分岐ベンドと同じとした場合)

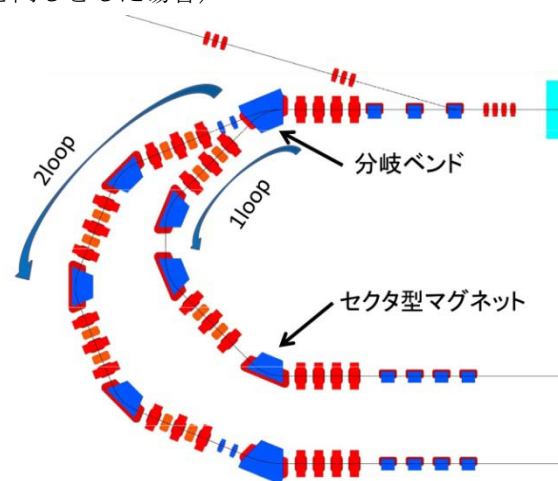


図 1 : cERL のアーク部 (2loop ラティス)

#### 2.2 マグネット形状と有効磁場領域

これらのマグネットの偏向角は  $45^\circ$  (分岐ベンドは高エネルギー電子に対して  $22.5^\circ$ ) と大きい、そのため、これらのマグネットのエッジは電子軌道に対して  $90^\circ$  の傾きを持つセクタ型を選択した。ただし分岐ベンドの片方のエッジは高エネルギー電子に対

# akira.ueda@kek.jp

しては 22.5° の傾きを持つ。

また、セクタ型マグネットはC型を採用し、分岐ベンドに関してはC型では形状が大きくなるためH型を採用している。

これらのマグネットは曲率半径が  $\rho=1\text{m}$  と小さいため大きなサジッタを持つ。さらに cERL で計画されているバンチ圧縮を行うとビームサイズが最悪 60mm 膨らむ可能性がある。そのためこれらのマグネットは広い有効磁場領域を必要とする。

有効磁場領域の定義をストレージリング並みの  $\Delta B_y/B_0 = \pm 5 \times 10^{-4}$  とし、セクタマグネット、分岐ベンドの有効磁場領域は 150mm、230mm 必要である。この内、サジッタ分は 76mm と 151mm である。(分岐ベンドについては 2 つの電子軌道の差も入る。)

セクタ型マグネット及び分岐ベンドの主なパラメータを表 1 に示す。

表 1：偏向電磁石のパラメータ

	セクタ型	分岐ベンド	
		low energy	high energy
Magnet type	C 型	H 型	
偏向角	45°	45°	22.5°
曲率半径	1m	1m	2m
エッジの角度	90°	90°	90° -22.5°
Gap の高さ	60mm	60mm	
磁極長	230mm	300mm	
有効磁場領域	150mm	230mm	
エネルギー	35-245MeV	35-125MeV	65-245MeV
磁場[T]	0.117-0.817	0.117-0.417	

### 3. コア部の設計

#### 3.1 工法と素材

これらの偏向電磁石は電子軌道と 90° のエッジとするためにエッジ部を斜めに削る必要がある。その製作方法としては、ブロックから削り出す方法が一般的である。しかし、ブロックから削り出す場合に

は、材料として電磁軟鉄 (SUYP-1) 相当が必要である。しかし、このような材料は、一般に入手が困難であり、コストも高くなる。そこで今回は、比較的入手が容易な珪素鋼板を打ち抜き、それらを接着させた後にエッジ部を斜めに削るという工法を取る事にした。

#### 3.2 珪素鋼板の選定

cERL のセクタマグネットは、35MeV(0.117T)から 245MeV(0.817T)までの広い領域で使用する。

これらの電磁石に使用する珪素鋼板は、PF-AR のステアリングマグネット等で実績のある新日鉄の 50H600 を想定していた。しかし 50H600 材は、低磁場では、比透磁率が低く 0.1[T]付近では、 $\mu_r$  は 2000 程度しかない[4]。そのため低磁場では、コア内の磁気抵抗が大きくなり有効磁場領域に影響する。

図 2 に 50H600 材を使用した場合の磁場の平坦度を示す。磁極の中心が X=0 である。

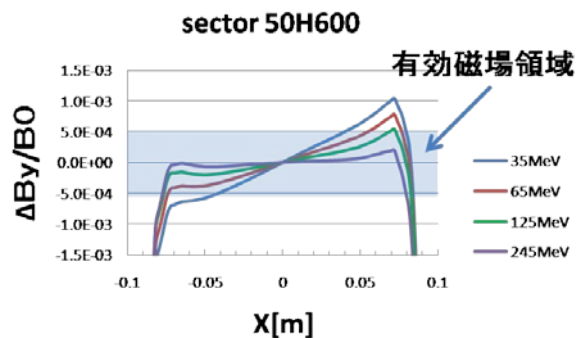
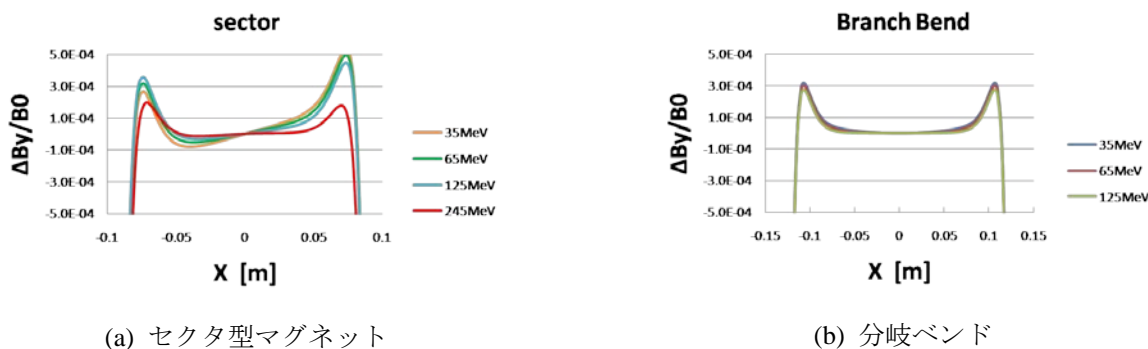


図 2：セクタマグネットの磁場平坦度 (50H600)

この図より、50H600 材では、125MeV (1 ループ目の最終値) 程度に磁場が大きい場合は 150mm の有効磁場領域が取れるが、それ以下の 35MeV や 65MeV では、十分な有効磁場領域が取れない事がわかる。低磁場でも十分な有効磁場領域を確保するために、珪素鋼板は、比較的低磁場でも比透磁率の高い新日鉄 50H250 材とした。図 3 に 50H250 材の使用でのセクタマグネット及び分岐ベンドの磁場の平坦度を示す。これによりセクタ型マグネット及び分岐ベンドの双方で十分な有効磁場領域が取れている事がわかる。



(a) セクタ型マグネット

(b) 分岐ベンド

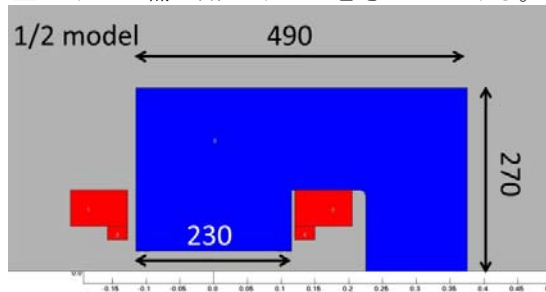
図 3：セクタマグネット及び分岐ベンドの磁場の平坦度 (50H250)

### 3.3 コア形状と励磁曲線

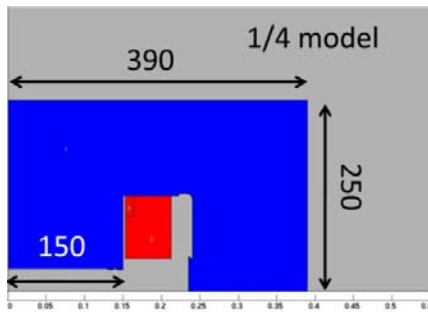
これらのマグネットは、その広い有効磁場領域の為に大きな磁極が必要である。セクタ型マグネットの磁極長は 230mm、分岐ベンドは 300mm である。分岐ベンド共に 1.1mm×20mm のシムを磁極の両端に配置している。またヨークも有効磁場領域が確保できる幅に調整しコア形状を決定した。

マグネットの高さは及び幅はセクタ型 540(H)×490(W)mm で分岐ベンドは 500(H)×780(W)mm である。

図 4 にセクタ型マグネット(1/2)、分岐ベンド(1/4)の磁極形状をしめす。セクタ型マグネットの主コイルの下には補正用コイルが巻かれ、また分岐ベンドは主コイルに補正用コイルが巻きこんである。



a) セクタ型マグネット (1/2)



b) 分岐ベンド (1/4)

図 4：セクタ型及び分岐ベンドのコア形状

図 5 にセクタ型マグネット及び分岐ベンドの励磁曲線を示す。これによるとセクタ型マグネットは 245MeV の時に若干飽和する事がわかる。

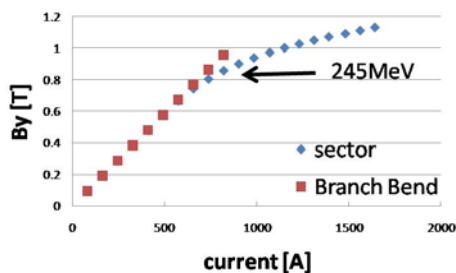


図 5：セクタ型及び分岐ベンドの励磁曲線

## 4. コイル部の設計

これらのマグネットは共に 11×11mm-φ6mm のホローコンダクターを使用する。巻数は 56 ターンである。表 2 に各エネルギーでの電流値及び電流密度を示す。

表 2：主コイルの電流値及び電流密度

		セクタ型	分岐ベンド
35MeV	電流値	107A	100A
	電流密度	1.167 A/mm <sup>2</sup>	1.085 A/mm <sup>2</sup>
65MeV	電流値	185A	185A
	電流密度	2.018 A/mm <sup>2</sup>	2.017 A/mm <sup>2</sup>
125MeV	電流値	357A	356A
	電流密度	3.884 A/mm <sup>2</sup>	3.880 A/mm <sup>2</sup>
245MeV	電流値	752A	
	電流密度	8.188 A/mm <sup>2</sup>	

コイルは 245MeV で使用しても、水冷の限界電流密度である 10A/mm<sup>2</sup> を超えないように設計されている[5]。また、主コイルの他に 5A×100 ターンの補正用コイルを取りつける。主コイルは、共に同じ巻数であるため、補正コイルで調整すれば分岐ベンドは 1 ループ目のセクタ型マグネットと同じ電源で使用する事が可能である。

## 5. まとめ

cERL 用のセクタ型マグネット及び分岐ベンドについて広い有効磁場領域及び、35MeV から 245MeV に及ぶエネルギー領域での使用を考慮して設計をした。

コア形状は、十分な有効磁場領域が取れるように最適化し、さらに低磁場でも比透磁率の高い素材の使用で広いエネルギー領域に対応している。

今後、セクタマグネットのテスト機を製作し、珪素鋼板を接着した後に斜めに削る製作方法の確認を行い、さらに磁場測定等により広いエネルギー領域で十分な性能が確保できているかの確認を行う予定である。

### 参考文献

- [1] 坂中 章悟,他 “ERL 計画の現状”、本プロシーディングス、FSRP09
- [2] 原田 健太郎,他 “cERL 運転開始に向けてのラティス設計”、本プロシーディングス、THPS002
- [3] 島田 美帆,他 “2 ループ Compact ERL のラティス設計”、本プロシーディングス、WEPS029
- [4] <http://www.nsc.co.jp/product/sheet/pdf/DE106.pdf>
- [5] 遠藤有馨 “シンクロトロン電磁石” KEK Internal 2001-2, July 2001